

**EVALUACIÓN DEL ARRASTRE DE NUTRIENTES EN ZONA DE LADERA
GENERADO POR ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN DOS
AGROECOSISTEMAS DENTRO DE LA ZONA DE AMORTIGUACIÓN DEL
PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ.**

JUAN DIEGO OTERO SARMIENTO

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
POPAYÁN
2009**

**EVALUACIÓN DEL ARRASTRE DE NUTRIENTES EN ZONA DE LADERA
GENERADO POR ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN DOS
AGROECOSISTEMAS DENTRO DE LA ZONA DE AMORTIGUACIÓN DEL
PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ.**

JUAN DIEGO OTERO SARMIENTO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Biólogo

**DIRECTOR.
APOLINAR FIGUEROA CASAS Ph.**

**ASESOR:
Biol. FERNANDO ANDRES MUÑOZ GOMEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
POPAYÁN
2009**

Nota de aceptación

Director

 Apolinar Figueroa Casas. (Ph. D.)

Jurado

 MSc. Isabel Bravo R.

Jurado

 MSc. Giovanni Varona B.

Fecha de sustentación: Popayán Septiembre 24 de 2009.

Este trabajo esta dedicado a todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de mi carrera, de quienes siempre he recibido apoyo amor y dedicación.

Mi familia; mis padres Víctor Hugo y Eneida.
 Mi abuela Marta Julia
 Mis hermanos: Hugo Andrés, Martha Isabel, Dominique.
 Mis pequeños sobrinos: Alejo y Juanes

Y especialmente a Katerine B.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, Dueño de mi vida, por su amor infinito y la bendición de realizar uno de mis sueños.

Mis padres, Abuela, hermanos y sobrinos, por su amor, apoyo, esfuerzo, paciencia y compañía incondicional.

A mi novia, **Katerine Bravo Salazar**, por su apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo.

Al profesor Apolinar Figueroa Casas. Ph.D. Director del trabajo, por la oportunidad, enseñanzas, valiosos aportes, constante preocupación y gestión para sacar adelante este proyecto.

Al Biólogo **Fernando Andres Muñoz**, por su apoyo, paciencia y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Samir Carlos Joaqui Daza, Juan Pablo Martínez,: Biólogos, Grupo de Estudios Ambientales. Por su Amistad y aportes a este trabajo.

Al profesor Edwin Rengifo, por su valioso aporte en el análisis y procesamiento estadístico de los datos.

Al Cabildo Indígena de Puracé: Por la confianza depositada y aporte con sus conocimientos del territorio y acompañamiento en las jornadas de campo.

Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales Dirección Territorial Surandina. (UAESPNN). Especialmente al Parque Puracé por el apoyo logístico permanente y acompañamiento.

A **mis compañero del Grupo de estudios Ambientales**, Universidad del Cauca. Por su amistad, oportunos y generosos aportes en la consolidación de este documento.

A **mis compañeros de trabajo de campo**, Angélica Mosquera, Fernando F. Muñoz, y especialmente a Diana M. Ruiz.

A **los jurados del trabajo**, por las recomendaciones y sugerencias.

Al Señor Héctor Piso, por facilitarme su finca y ser mi auxiliar de campo.

Al Grupo de Agroquímica de la Universidad del Cauca, por su colaboración en el análisis de suelos.

A todas aquellas personas que resultaron involucradas en el desarrollo de este trabajo y estuvieron dispuestos a colaborar.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL:	16
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:.....	16
3 JUSTIFICACIÓN.....	17
4 HIPÓTESIS.....	18
5 MARCO TEÓRICO	19
5.1 NUTRIENTES:.....	19
5.1.1 Nitrógeno:.....	19
5.1.2 Fósforo:	20
5.2 SUELOS DE PARAMO:.....	21
5.3 PROCESO DE LA EROSIÓN:	22
5.3.1 Factores que condicionan la erosión hídrica:	22
5.4 EROSIÓN Y PÉRDIDA DE NUTRIENTES	23
5.5 AGROECOSISTEMAS	24
5.6 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELOS.....	25
5.6.1 Textura	25
5.6.2 Densidad	25
5.6.3 Permeabilidad.....	26
5.6.4 Materia orgánica.....	26
5.6.5 Aluminio intercambiable	26
5.6.6 pH.....	26
5.6.7 Porosidad	26
5.6.8 Humedad.....	26
5.7 SIMULADORES DE LLUVIA	27
6 ANTECEDENTES.....	28
6.1 PROCESO DE LA EROSIÓN	28
6.2 EROSIÓN, NUTRIENTES Y LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA.....	29
6.2.1 ARRASTRE DE SUELO Y NUTRIENTES EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA	30
6.3 SIMULADORES DE LLUVIA	31
7 UBICACIÓN DE LA ZONA EXPERIMENTAL.....	33
7.1 ASPECTOS BIOFÍSICOS:.....	33
8 METODOLOGÍA	35
8.1 RECONOCIMIENTO DEL ÁREA DE ESTUDIO	37
8.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MINISIMULADOR DE LLUVIA.....	37
8.2.1 Características generales:.....	37
8.2.2 Características de la simulación de lluvia:	39
8.3 CALIBRACIÓN DEL SIMULADOR	40
8.4 EVALUACIONES CON EL MINISIMULADOR EN CAMPO.....	41

8.4.1	Variables a determinar	42
8.5	DETERMINACIONES FÍSICAS DEL SUELO EN EL LABORATORIO	43
8.5.1	Textura	43
8.5.2	Humedad.....	43
8.5.3	Densidad aparente (D_a).....	43
8.5.4	Densidad real (D_R).....	44
8.5.5	Porosidad Total	44
8.5.6	Permeabilidad.....	44
8.6	DETERMINACIONES QUÍMICAS DEL SUELO EN EL LABORATORIO	44
8.6.1	Determinación de materia orgánica en el suelo.....	44
8.6.2	Aluminio intercambiable	45
8.6.3	Fosfatos, Método de Bray II.....	45
8.6.4	Nitrógeno total, Método kjeldhal	45
8.7	ANÁLISIS DE LA ESCORRENTÍA EN EL LABORATORIO	45
8.7.1	Determinación del pH.....	45
8.7.2	Conductividad de la Escorrentía.....	45
8.7.3	Método de determinación de Nitratos NO_3^-	45
8.7.4	Método de determinación de Fosfatos PO_4^{3-}	46
8.8	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO	46
8.9	INTERPOLACIÓN DE LOS RESULTADOS POR MEDIO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	46
8.10	EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO	46
9	RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
9.1	COMPORTAMIENTO DE SUELO ERODADO, INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.....	47
9.2	COMPORTAMIENTO DE LAS TRES VARIABLES DEPENDIENTES (suelo erodado, infiltración y escorrentía superficial), RESPECTO A LAS VARIABLES INDEPENDIENTES (uso, pendiente y meses)	49
9.2.1	Comportamiento de las tres variables dependientes respecto al uso.....	50
9.2.2	Comportamiento de las tres variables respecto a las pendientes.....	52
9.2.3	Comportamiento de las tres variables respecto a los meses.	54
9.3	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS SUELO: Los resultados se presentan en la tabla 7.....	56
9.3.1	Textura.	56
9.3.2	Densidad Aparente.....	58
9.3.3	Densidad Real.....	58
9.3.4	Porosidad.	59
9.3.5	Humedad.....	60
9.3.6	Permeabilidad Hidráulica.....	60
9.4	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO	61
9.4.1	Materia Orgánica	61
9.4.2	pH.....	62
9.4.3	Aluminio Intercambiable.....	62
9.4.4	Nitrógeno en el Suelo	63
9.4.5	Fósforo en el suelo	63

9.5	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESPECTO A LAS TRES VARIABLES INDEPENDIENTES (uso del suelo, pendientes y meses).....	64
9.5.1	Conductividad de la escorrentía superficial.	64
9.5.2	pH del agua de escorrentía superficial.	65
9.6	ANÁLISIS DE NUTRIENTES ARRASTRADOS POR EL AGUA DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESPECTO A LAS TRES VARIABLES INDEPENDIENTES.	66
9.6.1	Análisis de fosfatos (P-PO ₄ ³⁻) en escorrentía superficial.	67
9.6.2	Análisis de nitratos (N-NO ₃ ⁻) en escorrentía superficial.	69
10	EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES	72
10.1	Matriz de FEARO para el Agroecosistema de pastura	72
10.2	Matriz de FEARO para el agroecosistema de papa.....	77
11	MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN.....	82
12	CONCLUSIONES	87
13	RECOMENDACIONES.....	90
14	BIBLIOGRAFÍA.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del nitrógeno.....	19
Figura 2. Ciclo del fósforo.....	21
Figura 3. Estructura general de un sistema agrícola y su relación con los sistemas externos, según Briggs <i>et al.</i> citados por Altieri (1999).....	25
Figura 4. Mapa de área de estudio.....	33
Figura 5. Datos de precipitación para Pilimbalá. Periodo 1970-1993.....	34
Figura 6 Diagrama metodología general de la investigación.....	36
Figura 7. Componentes del mini-simulador.....	37
Figura 8. Sistema Formador de Gotas del Mini-simulador de Lluvia.....	38
Figura 9. Trípode Graduable.....	38
Figura 10. Bandeja de Escorrentía.....	39
Figura 11. Verificación de la homogeneidad de la lluvia.....	40
Figura 12. Calibración del Simulador.....	41
Figura 13. Parcela de 5 X 10m. Los colores muestran los posibles lugares al alzar de muestreo cada mes.....	42
Figura 14. Rangos de precipitación Puracé. Periodo septiembre de 2008 a febrero de 2009.....	47
Figura 15. Comportamiento de las variables suelo erodado, infiltración y escorrentía superficial durante los seis meses de muestreo para el agroecosistema de papa.....	48
Figura 16. Comportamiento de las variables suelo erodado, infiltración y escorrentía superficial durante los seis meses de muestreo para el agroecosistema de pastura.....	48
Figura 17. Comparación de las medias de suelo erodado para los dos agroecosistemas.....	50
Figura 18. Efecto de erosión para las eras en sentido de la pendiente dentro de un agroecosistema de papa.....	51
Figura 19. Estimación de suelo erodado en toneladas/hectárea/mes.....	51
Figura 20. Comparación de las medias de escorrentía superficial e Infiltración para las dos pendientes.....	52
Figura 21. Comparación de suelo erodado para las dos pendientes en los dos agroecosistemas.....	53
Figura 22. Comparación de suelo erodado para las dos pendientes según las medidas internacionales.....	54
Figura 23. Comportamiento de las variables dependientes durante los seis meses de muestreo.....	55
Figura 24. Triangulo para texturas de acuerdo a USDA.....	56
Figura 25. Composición del suelo respecto a los dos agroecosistemas.....	57
Figura 26. Promedios de densidad real respecto a los dos agroecosistemas.....	58
Figura 27. Promedios de porosidad respecto a los dos agroecosistemas.....	59
Figura 28. Promedios de humedad respecto a los dos agroecosistemas.....	60
Figura 29. Promedios de humedad respecto a los dos agroecosistemas.....	60
Figura 30. Comportamiento de la Conductividad (mS/cm) durante los seis meses de muestreo.....	64

Figura 31. Comportamiento del pH en los dos agroecosistemas durante los seis meses de muestreo.	65
Figura 32. Comportamiento de pH respecto a los usos.	66
Figura 33. Comportamiento de P-PO ₄ ³⁻ (mg/L) respecto a los meses.	67
Figura 34. Agroecosistema de papa sobre las zonas de muestreo.	68
Figura 35. Comportamiento de P-PO ₄ ³⁻ respecto a los usos.	68
Figura 36. Comportamiento de P-PO ₄ ³⁻ (mg/L) respecto a las pendientes.	69
Figura 37. Comportamiento de N-NO ₃ ⁻ (mg/L) respecto a los usos.	70
Figura 38. Comportamiento de N-NO ₃ ⁻ (mg/L) respecto a las pendientes.	70
Figura 39. Ganadería presente en la zona	72
Figura 40. Alteración de ecosistemas paramunos.	73
Figura 41. Tala y quema presente en la zona.	75
Figura 42. Matriz de FEARO para Agroecosistema de pastura.	76
Figura 43. Agroecosistema de papa.	77
Figura 44. Abono utilizado en la zona de estudio para iniciar una siembra	77
Figura 45. Algunas problemas presentes en el agroecosistemas de papa.	79
Figura 46. Expansión de la frontera agrícola.	80
Figura 47. Matriz de FEARO para el Agroecosistema de papa	81
Figura 48. Mapa de pendientes.	83
Figura 49. Mapa de susceptibilidad a la erosión.	84
Figura 50. Mapa de susceptibilidad a la erosión con las áreas más vulnerables demarcadas.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de K (Contante de Equilibrio).....	24
Tabla 2. Erosión en Colombia.....	30
Tabla 3. ANOVA de un factor.	49
Tabla 4. Estadísticos de contraste (Variable de agrupación: Uso del suelo). ...	50
Tabla 5. Estadísticos de contraste (Variable de agrupación: Pendiente).....	52
Tabla 6. Estadísticos de contraste (Variable de agrupación: Meses)	54
Tabla 7. Propiedades físicas del suelo aplicando la prueba U de Mann-Whitney	56
Tabla 8. Propiedades químicas del suelo aplicando la prueba U de Mann-Whitney	61
Tabla 9. Pruebas de los efectos inter-sujetos. Variables dependientes: Conductividad (mS/cm) y pH	64
Tabla 10. Pruebas de los efectos inter-sujetos. Variables dependientes: P-PO ₄ ³ y N-NO ₃ (mg/L)	66
Tabla 11. Cambios de cobertura por uso del suelo.....	82

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad agrícola es una preocupación mundial, junto con la producción de alimentos para generaciones futuras, para lo cual es de gran importancia el uso racional del suelo, además de prestar mayor atención en áreas sin vocación para los sistemas agropecuarios como los páramos.

Los páramos colombianos tienen gran importancia gracias a su capacidad de controlar los flujos hídricos donde nacen ríos de importancia económica. Según Podwojewski y Poulernard (2000) el factor antrópico es el principal causal de degradación del páramo, generando alteraciones sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos. Hofstede (2003) encuentra que además de la tala, la quema y la ganadería, las prácticas agrícolas tiene el mayor impacto negativo sobre el páramo, ya que en la preparación de los terrenos se elimina la cubierta vegetal y se vuelca el suelo, al secarse se liberan parte de los nutrientes inmovilizados, que pueden ser aprovechados durante poco tiempo o lavarse, deteriorando así los sistemas de páramo donde la capacidad de resiliencia es baja y lenta.

Los suelos de Colombia son, en general, recursos de bajo nivel de fertilidad (Jaramillo, 2004). Sin embargo el cuidado para su mantenimiento ha sido mínimo, su vulnerabilidad a la degradación ha sido tenida en cuenta inadecuadamente por los agricultores, en especial para las zonas de ladera, donde la erosión se acelera, generando daños irremediables al suelo y una baja importante en la productividad de las plantas. La vegetación en el suelo reduce la fuerza erosiva cumpliendo diferentes funciones de protección: absorbe la energía de las gotas de lluvia interceptándolas al caer, reduce la velocidad del agua sobre la superficie y restringe físicamente el movimiento del suelo. Un suelo desnudo no cuenta con vegetación por lo tanto se hacen muy susceptible al arrastre de sus partículas y además la erosión es mayor también si algunos factores como el clima, la topografía y manejo no son los adecuados para los sistemas de producción.

Esta investigación fue llevada a cabo en el municipio de Puracé (Cauca), corregimiento de Pilimbalá, se evaluó el arrastre de nutrientes (Nitratos NO_3^- y Fosfatos PO_4^{3-}) por escorrentía superficial, mediante simulación de lluvias a una intensidad de 100 mm h^{-1} , en dos tipos de pendientes (25 y 50%) y dos agroecosistemas (papa y pastizal). Además se realizaron análisis físicos y químicos de estos suelos (textura, humedad, densidad aparente y real, porosidad total, permeabilidad, pH y materia orgánica entre otros) para obtener información que lleve a proponer medidas de conservación y de esta forma contribuir a la mitigación de los efectos erosivos y el arrastre de nutrientes para el suelo.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Cauca cuenta con una topografía heterogénea ya que lo atraviesan las Cordilleras Central y Occidental, originando diferentes características de relieve como los volcanes de Pan de Azúcar (4632 msnm) y Puracé (4576 msnm), en el municipio de Puracé; de gran importancia para el país gracias a su biodiversidad y fuentes de agua.

Pilimbalá, corregimiento de Puracé, es una zona de tradicional asentamiento indígena, su economía se basa en la minería de azufre, ganadería de doble propósito (leche y carne) y agricultura; la zona presenta pendientes pronunciadas entre 25 y 75% y precipitaciones promedio anual de 1.626.3 mm (EOT, 2000); estas características favorecen la creación de la lámina de escorrentía superficial arrastrando suelo y nutrientes (fosfatos y nitratos) esenciales para el desarrollo de los ecosistemas. Los sistemas productivos de la zona (agroecosistemas de papa y pastura) producen impactos negativos sobre los componentes bióticos y abióticos de este ecosistema, en los agroecosistemas de papa el suelo pierde su estructura, se compacta y acelera la erosión, el rendimiento de los cultivos se reduce severamente y la aplicación de fertilizantes se vuelve menos eficaz (Mielniczuk y Schneider, 1984) generando a futuro inestabilidad del sistema agrícola. En los agroecosistemas de pastura el suelo se compacta por el pisoteo del ganado generando un suelo con baja porosidad e impermeabilidad al recurso hídrico.

Para obtener un suelo donde las plantas puedan crecer, desarrollarse, producir cosechas abundantes y de mejor calidad, los dueños de los predios recurren a ampliar las fronteras agrícolas talando los bosques de páramo y drenando las turberas para hacer sus cultivos y rotarlos con ganadería. En ocasiones también hace necesario la quema para el resurgimiento de nuevos brotes aumentando a corto plazo el nivel proteico para la producción de leche, pero debido a la fragilidad del ecosistema paramuno la cosechas nuevamente disminuirán su producción lo que hace necesario recurrir a nuevo parches de bosque paramuno.

Por tal razón se planteó esta investigación para determinar el desplazamiento de suelo y nutrientes (Nitratos NO_3^- , Fosfatos PO_4^{3-}) por acción de las lluvias que generan escorrentía superficial en dos tipos de agroecosistemas, cuyos suelos se han visto alterados por acciones antrópicas trastornando la composición y el desarrollo del sistema.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL:

- Determinar la concentración de nutrientes y cantidad de suelo desplazado producto de la escorrentía superficial, en dos agroecosistemas paramunos dentro del área de amortiguación del Parque Nacional Natural Puracé, con el fin de demostrar la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica..

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Evaluar la concentración de nutrientes (NO_3^- y PO_4^{3-}) y cuantificar el suelo desplazado por la escorrentía superficial.
- Analizar algunas propiedades físicas y químicas de suelo.
- Generar mapas temáticos donde se muestre la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica, teniendo en cuenta características geomorfológicas, hidrológicas, edáficas y de cobertura vegetal.
- Proponer alternativas de conservación que lleven a mitigar los efectos de la erosión y el arrastre de los nutrientes.

3 JUSTIFICACIÓN

Los páramos como principales reguladores del sistema hídrico para Colombia presentan gran importancia a nivel biológico y económico, en especial el páramo de Puracé donde nacen ríos de gran importancia para el país como el río Cauca entre otros. Lamentablemente no se le da un uso adecuado, según Hofstede (2001) la presencia humana y sus actividades (quema, agricultura y ganadería) son inevitables y muchas veces no son sustentables, en el bosque la línea está bajando continuamente afectando el funcionamiento ecológico e hidrológico del páramo. Henderson *et al.* (1991) ha estimado que el 90-95% de los bosques andinos, incluyendo los que están en el páramo, han desaparecido, el sistema paramuno está catalogado como un ecosistema frágil, debido a su gran altitud, sus bajas temperaturas, alta humedad, bajos niveles de productividad primaria, crecimiento y sucesión natural, haciendo que los suelos humíferos sean muy suaves y fáciles de perturbar.

Según Hofstede (2003) los cultivos tienen el mayor impacto sobre los suelos del páramo perdiendo funciones de retenedor de materia orgánica, agua y nutrientes transformándose en repelente hídrico; si se suman otros factores como pendiente y precipitación, esta última favorecerá una disgregación de los suelos por el impacto directo de las gotas de lluvia y por efecto de la escorrentía superficial habrá arrastre de suelo y nutrientes, restringiendo notablemente el desarrollo de la vegetación. Este es un problema no solo para el Departamento del Cauca, sino también para muchas zonas productivas de Colombia que cuenta con pocos estudios técnicos para hacer una caracterización de los suelos en los agroecosistemas paramunos y se pueda establecer cuantitativamente el arrastre de suelo y nutrientes por escorrentía superficial.

Es necesario proponer alternativas de gestión para los suelos productivos que se encuentren alterados por procesos de antropización, además de dar pie a futuros estudios, se espera que esta investigación sea de suma importancia para realizar acciones preventivas o de mitigación contra la degradación del suelo y arrastre de nutrientes, además de crear conciencia que la erosión en la actualidad es un problema ambiental de gran importancia, alterando gravemente los agroecosistemas y con ellos sus ciclos biogeoquímicos.

4 HIPÓTESIS

La intervención antrópica de los agricultores indígenas de Pilimbalá (Puracé) por medio de los agroecosistemas de papa y pastizal, con sus cambios de uso del suelo; influyen negativamente e incrementan la degradación de los suelos de esta zona paramuna por la erosión (g/m^2), producto de la escorrentía superficial y de las intensas precipitaciones de la zona, que al desplazar el suelo arrastra partículas finas como arcillas, materia orgánica y nutrientes (NO_3^- y PO_4^{3-}) en la escorrentía superficial, perjudicando las propiedades físicas (textura, humedad, densidad aparente y real, y porosidad) y químicas (pH, materia orgánica y contenido de nutrientes) en el suelo, influyendo directamente en la fertilidad del mismo.

5 MARCO TEÓRICO

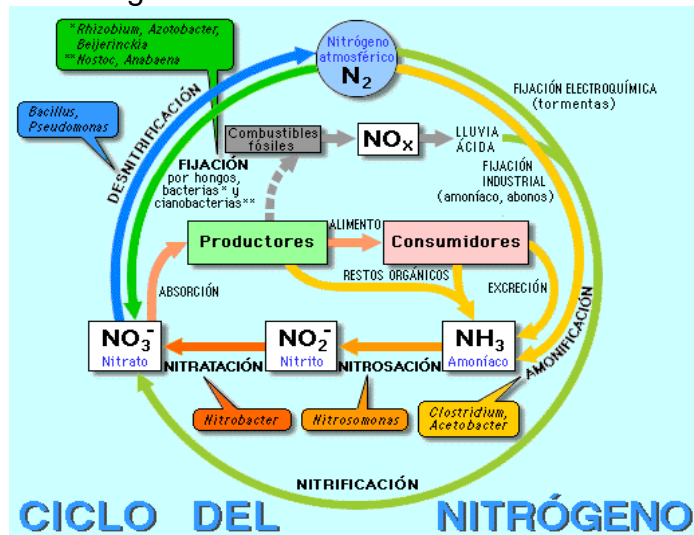
5.1 NUTRIENTES:

Los nutrientes son elementos químicos esenciales para el desarrollo y nutrición de todos los organismos, además ningún otro tipo de elemento químico puede sustituir su importante función. En esta investigación se analizaron dos tipos de nutrientes en solución de escorrentía, el nitrógeno y el fósforo localizados en los macronutrientes primarios, los que se suelen añadir al suelo en forma de abono, generalmente porque las plantas los toman en cantidades importantes y no hay abundancia en la solución del suelo.

5.1.1 Nitrógeno:

El nitrógeno (N) presente en el suelo depende de una serie de transformaciones para poder ser incluido dentro los procesos vitales de los seres vivos (ver figura 1), además es constituyente de la estructura de todas las proteínas, es componente de los ácidos nucleicos básicos para la síntesis proteica, también es constituyente de la clorofila y enzima indispensables para la fotosíntesis y la respiración, contribuyendo a muchas funciones que incluyen apoyo estructural, movimiento y defensa contra agentes extraños (Navarro y Navarro, 2003)

Figura 1. Ciclo del nitrógeno.



Fuente www.lenntech.com

En cuanto a la fijación del nitrógeno se puede presentar acción química de alta energía (relámpagos, radiación cósmica entre otros) combinándose el nitrógeno, el oxígeno y el agua resultando amoníaco y nitratos los cuales son llevados por medio de la lluvia a la tierra; la otra fijación se da en forma biológica gracias a unas bacterias fijadoras las cuales viven en asociación con algunas plantas en su mayoría leguminosas, esta fijación se da cuando el

nitrógeno molecular (N_2) por acción bacteriana es dividido en dos átomos N libres para ser combinados con hidrogeno formando amoniaco (NH_3).

Existe otro proceso de transformación llamado amonificación donde el nitrógeno del suelo proviene de la descomposición de la materia orgánica, esto ocurre cuando las bacterias rompen los aminoácidos con el fin de obtener amoniaco y amonio, de tal forma que estos puedan ser incorporados en procesos celulares de plantas y microorganismos del suelo. La nitrificación es un proceso de transformación de amoniaco a nitritos y posteriormente a nitratos producto de acciones microbianas (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*), los nitratos al presentarse como la forma más disponible para las plantas hacen que este proceso sea de vital importancia agrícola favoreciendo el desarrollo de las plantas. Los nitratos pueden nuevamente transformarse en nitrógeno (N_2) gaseoso y volver a la atmosfera gracias a la desnitrificación un proceso donde intervienen bacterias (*Pseudomonas* y el *Thiobacillus denitrificans*) que emplean nitrato en vez de oxígeno en su respiración. (Manahan, 2007)

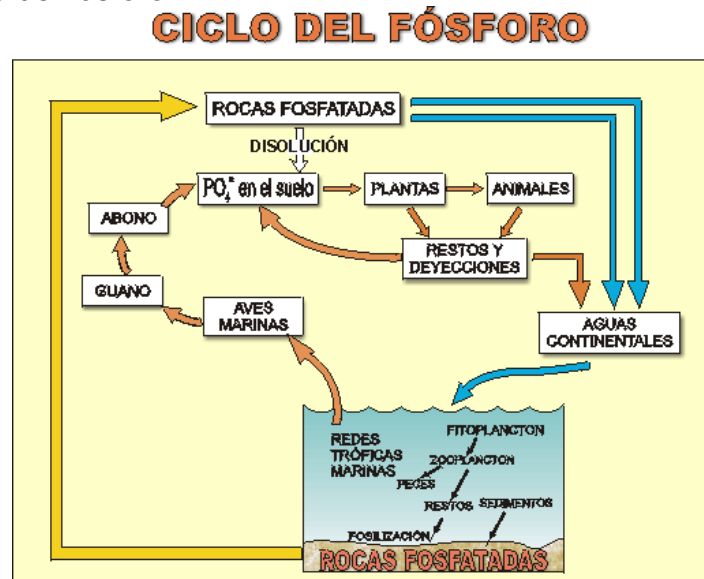
Los nitratos generalmente solubles en agua se emplean como fertilizantes, que proporcionan nitrógeno fácilmente asimilable para las plantas. El aporte de grandes cantidades de nitratos a suelos y aguas tiene muchas consecuencias nocivas para el medio ambiente. La lixiviación de nitratos que son muy solubles, pueden contaminar severamente tanto suelos como aguas superficiales de las zonas donde se abone intensamente, es un asunto que viene perturbando las regiones agrícolas desde hace más de treinta años (Smil, 1997).

5.1.2 Fósforo:

El fósforo (P) presenta un papel muy importante en todos los organismos ya que forma parte de los ácidos nucleídos, de igual forma proporciona la base para la formación de los enlaces de alto contenido de energía del ATP, interviniendo en procesos vitales para las plantas como la fotosíntesis y la respiración celular. Lastimosamente el fósforo es catalogado como un elemento crítico debido a las bajas concentraciones en la que se encuentra en el suelo, por lo tanto se convierte en un limitante del rendimiento de los cultivos. La mayor reserva del fósforo está en la materia orgánica y también se presenta varios minerales de las rocas formando fosfatos.

El ciclo del fósforo empieza con la meteorización de las rocas, liberando fosfato y otros iones (ver figura 2), posteriormente las plantas los absorben del suelo en solución acuosa para luego enlazarlos en compuestos orgánicos que al avanzar por las cadenas alimentarias se transfiere al resto del ecosistema. Otra parte del fósforo es con facilidad arrastrado hacia el lecho marino donde formara rocas y esperara miles de años para volver a emerger y continuar con el ciclo, también el fósforo es consumido por el plancton terminando en algunos peces que al ser consumidos por la aves terminara en el suelo en forma de heces.

Figura 2. Ciclo del fósforo.



Fuente www.lenntech.com

En países como el nuestro los agrosistemas son fundamentales para la economía, se hace indispensable el uso de fertilizantes que integren fosfatos al sistema, Por lo tanto en agroecosistemas sin fertilización, la disponibilidad de "P" se va reduciendo en forma progresiva. En los últimos años la preocupación por efectos medioambientales de fosfato se ha incrementado, estos se encuentran en los detergentes domésticos y el exceso en aguas las contaminaría creando un desequilibrio ecológico ya que los fosfatos actúan como medio nutritivo para el desarrollo de las algas, por lo tanto dificultaría la vida en los ecosistemas acuáticos por falta de oxígeno.

5.2 SUELOS DE PARAMO:

Un páramo es un ecosistema acumulador y regulador de flujos hídricos, toda su estructura ha desarrollado mecanismos para el almacenamiento de agua, esta condición se manifiesta en el complejo órgano-mineral del subsistema suelo (cenizas volcánicas), el cual actúa a favor de la retención del líquido. Debido al clima la actividad microbiana se reduce presentándose gran acumulación de materia orgánica parcialmente en descomposición, resultando suelos con horizontes de color negro, que pueden alcanzar hasta dos o más metros de espesor. No obstante, el alto volumen de agua circulante en el medio edáfico remueve del perfil las bases solubles originando suelos ácidos; por esta razón los suelos de páramo se caracterizan por ser muy frágiles y el uso inadecuado del medio edáfico paramuno genera procesos erosivos de diversa naturaleza e intensidad que acarrearán fenómenos de remoción en masa como derrumbes, deslizamientos, soliflucción y reptación del suelo. Además, se impone la necesidad de restaurar permanentemente su fertilidad a través de prácticas de manejo de la materia orgánica. (León, 2008)

Según el PROYECTO DE LEY 032 DE 2003, por medio del cual se crean las zonas de paramos para Colombia, existen unos factores de afectación que vienen generando procesos de transformación y degradación para el sistema:

El primer factor se da cuando el hombre trata de establecer sistemas agrícolas en el interior del páramo pensando que es un medio rico en materia orgánica, sin saber que la mayor parte no es aprovechable por las plantas, así empieza la expansión incontrolada de la frontera agrícola bajo sistemas de latifundio y minifundio, en especial para estas zonas el monocultivo de papa el cual requiere de la tumba y quema de la vegetación con rotación de potreros para ganadería extensiva y el uso de los productos químicos (fertilizantes y plaguicidas). (Ministerio del medio ambiente, 2003)

Otro factor presente es la ganadería extensiva generando un proceso de deterioro de los recursos biofísicos de páramo como: recarga de acuíferos, captura de CO₂, desmonte de especies vegetales y deforestación de la vegetación nativa. Además de otros usos inadecuados como: la explotación comercial de las turbas y desecación de las turberas, la minería artesanal e industrial de oro, carbón, gravas y calizas, los cultivos de uso ilícito, la extracción de materiales como los musgos, el desarrollo de programas de reforestación inapropiados (pinos y eucalipto, que no retienen agua y acidifican el suelo) y el turismo mal dirigido. (Ministerio del medio ambiente, 2003)

5.3 PROCESO DE LA EROSIÓN:

La erosión es el conjunto de procesos físicos de desalojo, transporte y depósito de materiales ejercidos por diversos agentes: agua, viento y organismos vivos (el hombre y los animales), sobre la superficie terrestre; con un grado de intensidad variable. (Barco, 1998). Es importante notar que la erosión que se analizó en esta investigación fue producto de la precipitación simulada y su impacto directo de las gotas de lluvia, que traslado el suelo en escorrentía superficial en el momento que sobrepasa la infiltración. Para esta investigación se tuvo en cuenta:

- La escorrentía superficial como vehículo de transporte hídrico que se da sobre la superficie del suelo y se origina en el momento en que se supera la capacidad de infiltración.
- La infiltración se define como cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones.
- Suelo erodado definido como la cantidad de suelo que es desplazado gracias a la escorrentía superficial.

5.3.1 Factores que condicionan la erosión hídrica:

Según Hudson (1975) los factores que afectan la cantidad de erosión por efectos de la lluvia en el suelo se determinan por:

- **Erosividad:** se define como la capacidad potencial de la lluvia de causar erosión. Esta como resultado de la precipitación es un factor que no se puede manejar por el hombre al ser proveniente de un fenómeno natural. La erosividad hace parte de los factores climáticos que afectan la erosión junto con la temperatura, el viento y la radiación solar. Aunque estos últimos no muestran efectos notables son importantes ya que el viento cambia las direcciones y el ángulo del agua mientras cae precipitada, generando diferentes impactos sobre el suelo.
- **Erodabilidad:** Es una propiedad definida como la vulnerabilidad del suelo para ser transformado a partículas más pequeñas de fácil dispersión por el agua generando la erosión.
- **Manejo:** este término se refiere a todos los factores bajo el mando del hombre como la opción del uso de la tierra y método de cosecha los cuales alteran la vegetación y el suelo. Las funciones principales que realiza la vegetación para reducir la fuerza erosiva son: 1) absorber la energía de las gotas de lluvia interceptándolas al caer, reduciendo de esta manera el escurrimiento; 2) retardar la erosión al reducir la velocidad del agua sobre la superficie; 3) restringir físicamente el movimiento del suelo; 4) mejorar la cohesión y la porosidad del suelo mediante raíces y residuos de las plantas; 5) aumentar la actividad biológica del suelo y 6) obtener un aumento en la capacidad de almacenamiento (Campo, 2004).
- **Forma del suelo:** incluye la longitud y grado de pendiente de las cuestas, su forma (concavidad o convexidad) y uniformidad. El aumento en la pendiente tiene un gran efecto en la pérdida de suelo, puesto que ayuda a la generación de corrientes superficiales, las cuales arrastran los agregados separados por el impacto de las gotas de lluvia. Si la velocidad de la corriente es alta, esta puede pasar de un factor de transporte a desprendimiento y transporte convirtiéndose en un problema mas grave. (Campo, 2004). Normalmente para las áreas de tierra de uso agrícola los cultivos tienden a estar en cuestas moderadas y de longitud finita, pero esto siempre no es verdad, particularmente en las áreas anteriormente arboladas (Hudson, 1975).

5.4 EROSIÓN Y PÉRDIDA DE NUTRIENTES

Según Baker y Laflen citados por Wildner (1993); existen unos factores que determinan la concentración de un nutriente en el sedimento (escorrentía superficial), como:

- **Cantidad:** influencia directamente a la concentración de los nutrientes en el sedimento y en el agua. Dado el caso de una aplicación de determinado nutriente, su cantidad es la suma de la cantidad presente de forma natural más cantidad aplicada en otras ocasiones más la que se esta aplicando.

- **Persistencia:** Las transformaciones químicas, físicas y la extracción de plantas reducen la concentración actual, reduciendo también la posible pérdida por sedimento o agua.
- **Localización:** Si los nutrientes están en las superficies las pérdidas serán mayores que cuando no hubo abonamiento.
- **Adsorción del suelo:** Es otro factor importante de la determinación de la concentración de nutrientes en solución y sedimento, debido a que existe un equilibrio entre la concentración de nutrientes en el suelo y en solución. 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 (ver tabla 1). 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:

Tabla 1. Valores de K (Contante de Equilibrio).

Clase 1	K > 100 (alto K): los nutrientes se pierden con el sedimento.
Clase 2	K < 0,1 (K con valores extremadamente bajos): los nutrientes se pierden por drenaje sub-superficial.
Clase 3	K intermedio entre las otras dos clases: los nutrientes se pierden en solución de agua de escorrentía superficial.

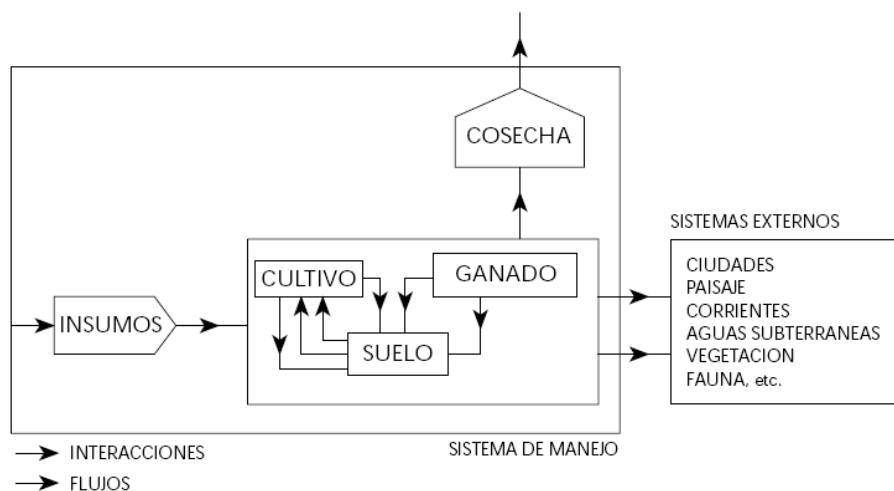
Fuente: Prado (1992).

5.5 AGROECOSISTEMAS

El término de agroecosistema generalmente es utilizado para describir las actividades agrícolas, estos agroecosistemas se caracterizan por ser sistemas abiertos donde reciben insumos del exterior y genera productos que ingresan en sistemas externos. Los agroecosistemas contienen compuestos bióticos y abióticos que son interdependientes e interactivos por medio de los cuales se procesan los nutrientes y flujos de energía. (Altieri, 1999).

Los flujos de energía se fijan primeramente por parte de la fotosíntesis y luego se genera una transferencia a lo largo de la cadena trófica y su dispersión final por la respiración, es de anotar que los flujos de energía en el sistema se modifican mediante el manejo del nivel de insumos. En cuanto al ciclaje biológico de los nutrientes, estos van de una forma inorgánica a orgánica y viceversa. (Altieri, 1999). (Ver figura 3)

Figura 3. Estructura general de un sistema agrícola y su relación con los sistemas externos, según Briggs *et al.* citados por Altieri (1999).



Entonces es claro que los agroecosistemas son sistemas sometidos por el hombre a modificaciones de sus componentes bióticos y abióticos, con el fin de obtener un producto del sistema, en el caso de agroecosistema de papa en el sistema el hombre cambia totalmente la cobertura vegetal original para evitar la competencia de nutrientes, agua y energía solar en el cultivo. Debido a estos cambios en la cobertura vegetal el suelo pierde protección volviéndose susceptible a la erosión. En cuanto a los agroecosistemas de pastizales son dominados principalmente por gramíneas (hierbas y pastos) utilizados en el consumo directo del ganado. En cuanto a la cobertura vegetal, cubre en su totalidad el suelo y lo protege e impide la erodabilidad, facilita la infiltración y regula algunos ciclos biogeoquímicos propios de estos sistemas

5.6 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELOS

5.6.1 Textura

La textura se refiere al tamaño de las partículas que tiene un suelo, y esta resulta de integrar los porcentajes de las fracciones arena, limo y arcilla. Según se presente predominio de una u otra fracción, el suelo presentará características diferentes que influirán en su aireación, permeabilidad, retención de humedad, volumen explorado por las raíces, etc. (Montenegro y Malagon, 1990)

5.6.2 Densidad

Se determina bajo las formas de densidad real y aparente. La diferencia radica en que se incluya o no en la determinación del volumen total de espacios porosos (densidad aparente), o el ocupado exclusivamente por las fracciones minerales y de organismos, excluyendo espacios de poro (densidad real). (Montenegro y Malagon, 1990).

5.6.3 Permeabilidad

La permeabilidad se refiere a la velocidad con que el agua pasa a través de la masa del suelo bajo la acción de la gravedad (filtración) y depende de las características del suelo (porosidad) y del fluido (la viscosidad y densidad). (Montenegro y Malagon, 1990)

5.6.4 Materia orgánica

Las sustancias orgánicas del suelo puede ser sistematizada en dos grupos fundamentales: las materias orgánicas de naturaleza individual y las sustancias húmicas propiamente dichas. En suma los compuestos orgánicos de naturaleza individual constituyen en los suelos minerales aproximadamente el 10-15% de la reserva total de materia orgánica. El segundo grupo constituye la porción principal de la parte orgánica del suelo, es decir hasta el 85-95 % de la reserva total de humus. (Malagon *et al*, 1995)

5.6.5 Aluminio intercambiable

Investigadores han demostrado que las arcillas ácidas contienen muy poco o nada de hidrógeno intercambiable y que el Al intercambiable es el catión dominante asociado con la acidez del suelo. Actualmente el concepto de la acidez de un suelo ácido implica la acción de los iones H⁺ y Al⁺⁺⁺, aluminio hidratado y diversos polímeros de aluminio.

5.6.6 pH

El pH regula y dispone la actividad física, química y biológica del suelo, la desaturación va acompañada de una peptización de los coloides, este fenómeno disminuye la permeabilidad que es una propiedad física del suelo. El movimiento hacia arriba y hacia abajo los componentes del suelo depende del pH. El pH regula la actividad biológica del suelo es decir la fertilidad de este y por ello el desarrollo de un organismo. (Bravo y Giraldo, 1998)

5.6.7 Porosidad

La distribución de los poros por tamaño en el perfil del suelo, es de primordial importancia ya que de ella depende la permeabilidad, retención de humedad y aireación. La macro porosidad es responsable de esta última propiedad y debe ser mayor del 10% para que no restrinja la proliferación de raíces. La micro porosidad determina la capacidad de retención de agua del suelo. (Flecher y Lombana, 1982)

5.6.8 Humedad

El agua del suelo está íntimamente relacionada con un sinnúmero de propiedades, entre las que cabe mencionar: presencia, cantidad y tipo de coloides; cantidad y distribución del espacio poroso, en especial el microporoso; permeabilidad; escorrentía; nivel freático; drenaje natural y presencia de capas endurecidas todas relacionadas con la pedogenesis y el manejo de los suelos. (Malagon *et al*, 1995).

5.7 SIMULADORES DE LLUVIA

Los simuladores de lluvia se han convertido en un elemento esencial para los estudios de erosión, infiltración y escorrentía superficial a nivel mundial, gracias a las semejanzas que tienen con las principales características de la lluvia natural, además de ser unos prototipos de bajo costo y de fácil manejo ya que pueden ser ubicados en cualquier sitio deseado, donde la simulación se puede realizar de una forma rápida, eficiente y controlada (Meyer, 1988).

Según Cobo (1998) los simuladores de lluvia se dividen en dos grandes grupos donde están aquellos que utilizan el método de goteo para la producción de lluvia, donde la velocidad inicial de las gotas es cero y aquellos que utilizan el método de boquillas pulverizadoras donde el agua sale a una determinada velocidad por estar sometido a una presión inicial.

Las características principales de la lluvia natural que debe conseguir los simuladores de lluvia son las siguientes (Bubenzer, 1979).

1. Distribución del tamaño de gotas de lluvia similar a las de la lluvia natural.
2. Velocidad de impacto similar a la velocidad Terminal de las gotas de lluvia.
3. Intensidad de lluvia correspondiente a las condiciones naturales.
4. Tamaño del área de investigación representativo.
5. Energía cinética similar a las de la lluvia natural.
6. Lluvia uniforme y distribución aleatoria de las gotas.

6 ANTECEDENTES

6.1 PROCESO DE LA EROSIÓN

En Colombia los estudios de arrastre de nutrientes y suelo en zonas de ladera para los ecosistemas de páramo son muy escasos; a continuación se presenta una breve descripción de las investigaciones más importantes a nivel internacional relacionadas con objetivo de esta investigación.

Los primeros experimentos cuantitativos de erosión fueron realizados por el Forest Service en Utah en 1915, seguidos por Miller en 1917, lo que generó en 1923 en las primeras publicaciones sobre experimentos en parcelas, desencadenando una serie de investigaciones sobre la destrucción del recurso edáfico por parte de la erosión.

Investigadores como Baver, Borst, Woodburn y Musgrave en los años treinta encauzan a Zingg en 1940 a proponer el primer modelo de erosión mediante una ecuación que estaba en función del grado de pendiente y su longitud, pero es Law en 1940 con sus estudios sobre las lluvias naturales quien guía a Ellison en 1944 a descubrir la función de las gotas de lluvia sobre los procesos de erosión y demostrando los efectos protectores de la cobertura vegetal al privar la gota de lluvia de su energía cinética, en Hudson (1982). De esta forma surge la primera definición científica de erosión, Ellison (1944) señala que es un proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos donde la lluvia tiene un efecto a través del impacto directo de las gotas sobre la superficie del suelo y por su propio humedecimiento, provoca también transporte de partículas en aspersion proporcionando energía al agua de la escorrentía superficial. Más adelante (Musgrave, 1948) se añadió a la ecuación de Zingg el clima como un factor, basado en la precipitación máxima en 30 minutos con un periodo de retorno de dos años, para luego aumentarle el factor cultivo Smith en 1958 la considero la cobertura vegetal como protección al suelo para evitar la erosión del mismo.

Más adelante Wischmeier y Smith (1958), dan lugar a uno de los mejores modelos de erosión, la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), la cual sirve para predecir la erosión en un lugar determinado en ton ha^{-1} . Ver ecuación 1:

Ecuación 1. Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE)

$$A = R \cdot K \cdot C \cdot L \cdot S \cdot P$$

Donde:

A: Valor promedio anual de pérdidas de suelo (t/ha. Año). **R:** Erosividad de la lluvia o índice de erosión pluvial. **K:** Erodabilidad del suelo. **L:** Longitud de

declive. **S**: Factor pendiente del declive. **C**: Factor clase de cultivo o cobertura vegetal. **P**: factor practicas de conservación de suelos, tomando como referencia la situación de un suelo, terreno arado y sembrado en dirección a la pendiente (Montenegro y Malagon, 1990).

6.2 EROSIÓN, NUTRIENTES Y LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

En 1953 Stoltenberg y White comentaban que la erosión había movido más nutrientes que los extraídos por los cultivos, creando posibles hipótesis sobre la pérdida y el agotamiento a futuro de nutrientes afectando los diferentes cultivos. Stallings (1957) señala que en América el gran aumento de la productividad con la mejora de semillas y aumento de fertilizantes se ven neutralizados por una disminución en la fertilidad del suelo a causa de la erosión.

En los años sesenta Shrader et al. en 1963, demostraron como resultado de una investigación que el rendimiento de un cultivo, en un suelo severamente erosionado jamás será igualado a un suelo no erosionado por más insumos externos que le sean aplicados. Eden en 1964 sugiere que a pesar de la resistencia a la erosión de los suelos subtropicales y tropicales, estos son particularmente vulnerables a la reducción de fertilidad y consiguiente degradación y erosión. Desde finales de la década de los setenta se han ido desarrollando tecnologías de manejo de nutrientes en la protección ambiental.

Según Stocking (1984). La erosión del suelo es un proceso que actúa de manera selectiva, arrastrando las partículas más finas y más reactivas del suelo (arcilla y materia orgánica), dejando las partículas mas gruesas, pesadas y menos reactivas.

En cuanto a los suelos andinos Pérez y López (2000), estudiaron la erosión en los Andes Venezolanos bajo uso agrícola demostrando que presentan una alta erosionabilidad y baja estabilidad estructural, asociada posiblemente al manejo y uso intensivo de la tierra, incrementando el riesgo o erosión potencial, resultante de la combinación de la erosividad de la lluvia, la erosionabilidad del suelo y de las condiciones topográficas. También las pérdidas de materia orgánica y nutriente por arrastre en los sedimentos, provenientes del suelo desnudo, resultan bastante altas.

En Colombia organizaciones como INDERENA, IGAC y el IDEAM han adelantado estudios sobre erosión durante tres décadas en los que se reporta que un alto porcentaje del territorio esta afectado por erosión. (Ver tabla 2).

Tabla 2. Erosión en Colombia

Evaluación de la erosión	INDERENA 1977 (%)	IGAC 1987	IDEAM 1998	IGAC 1998	IDEAM 2000
Sin erosión	24.8	48.5	0	14.7	52
No apreciable				44.9	4.6
Ligera	36.4	28.0	45.5	19.5	9.5
Moderada	12.8	12.9	11.1	11.3	8.9
Severa	0.6	7.8	7.8	3.3	10.8
Muy severa	1.6	0.7		0.5	14.2
Otros	23.8	2.1	35.6	5.8	
TOTALES	100	100	100	100	100

Fuente: IDEAM (2009).

6.2.1 ARRASTRE DE SUELO Y NUTRIENTES EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA

Torres (2000) utilizó un minisimulador de lluvia a dos intensidades (80 y 120 mm/h⁻¹) en suelos con diferentes sistemas de manejo establecidos, evaluó infiltración, escorrentía y cantidad de suelo perdido y algunas características físicas y químicas, en los municipios de Santander de Quilichao y Mondomo. Donde encontró:

- Los aumentos de la intensidad de lluvia aumentan las láminas de escorrentía y el suelo perdido.
- La infiltración del suelo regula la escorrentía y por ende la pérdida de suelo.
- El laboreo y las prácticas agrícolas disminuyen el contenido de materia orgánica en el suelo.

Campo (2004) evaluó la susceptibilidad a la erosión hídrica, del contenido de materia orgánica y de las propiedades físicas, en un *oxic dystrustept* bajo seis historias de uso, en Pescador, Cauca, mediante el uso de un minisimulador de lluvia, encontrando:

- Que el minisimulador es una herramienta sensible para evaluar la susceptibilidad a la erosión.
- El suelo desnudo presentó las condiciones más desfavorables respecto a: contenido de materia orgánica, infiltración escorrentía, densidad aparente, distribución y estabilidad de agregados, contrario a los sistemas o tratamientos de pastura y barbechos mejorados.
- La intensidad de la lluvia simulada afectó significativamente las variables infiltración, escorrentía y suelo erodado.

Muñoz (2007) mediante un minisimulador de lluvia evaluó la pérdida de suelo por escorrentía superficial generado por las lluvias a una intensidad de 100 mm/h⁻¹ cuando se ha cambiado el uso del suelo con actividades antrópicas

como la ganadería y el cultivo de papa, modificando las propiedades físicas, químicas y biológicas de este tipo de suelos necesarias para el desarrollo de ecosistemas alto andinos, en el municipio de Totoró en el corregimiento de Gabriel López. Encontrando lo siguiente:

- Las investigaciones con simuladores de lluvia en diferentes agroecosistemas demuestran que la mayor cantidad de suelo erodado se presenta en el suelo desnudo y que la cobertura vegetal es un agente protector.
- Se puede comprobar cómo el proceso erosivo está influenciado por la capacidad de infiltración del suelo, que regula la escorrentía y por ende el suelo erodado que está directamente relacionada; es decir: que a mayor infiltración menor suelo desplazado
- Las actividades agrícolas en suelos andicos generan fuertes roturaciones sometido a cambios de humedad, condiciones de alta fluidez y la formación de capas compactadas que dañan su estructura haciéndolo susceptible a la erosión, especialmente cuando las condiciones climáticas presentan una gran probabilidad de concentración de lluvias intensas y de larga duración.

Urresti y zemanate (2009) realizaron una evaluación de desplazamiento de nutrientes y arrastre de suelo por acción de la escorrentía superficial en parcelas permanentes, en la vereda de la Rejoya al norte de la ciudad de Popayán, departamento del Cauca, obteniendo los siguientes resultados:

- El tratamiento con suelo desnudo presentó la mayor cantidad de suelo arrastrado con respecto al tratamiento de suelo con cobertura vegetal, debido a que las plantas a medida que crecían protegían el suelo, reduciendo así la erosión superficial.
- El volumen de agua de escorrentía fue menor en el tratamiento de suelo con cobertura vegetal en comparación con en el tratamiento con suelo desnudo, debido a la mayor porosidad, menor densidad aparente, absorción y retención de agua por parte de las plantas en el suelo con cobertura vegetal. También demostró que existe una relación directamente proporcional entre el agua de escorrentía y el suelo arrastrado

6.3 SIMULADORES DE LLUVIA

Desde el año 1930, diversos investigadores han diseñado y hecho uso de los simuladores de lluvia variando los equipos de acuerdo a los objetivos que se querían alcanzar, arrojando resultados importantes para el avance del conocimiento científico en dicha materia (Rodríguez *et al*, 1987). Pero es en la década de los 50's, que dicha técnica es utilizada como una herramienta importante de investigación, Hudson en 1982 demostró que la erosividad esta relacionada con la energía cinética y por ello el simulador ideal debería reproducir esta característica. En las últimas cinco décadas gran parte de la

investigación en ciencias de la erosión de suelos se ha llevado a cabo con simuladores de lluvia, dada la demanda de respuestas rápidas a los problemas de erosión hídrica a nivel global (Montoya y Obando, 2002).

Pla y Col (1978) desarrollaron y utilizaron tres tipos de simuladores de lluvia denominados de “laboratorio”, “invernadero” y “campo”. Las principales características del simulador de campo eran el sistema formador de gotas, tres bandejas de latón rectangular, intensidad de precipitación de 70 – 100 mm/h. Fines para los que se utiliza: determinación de infiltración, escorrentía y erosión del agua de lluvia.

Rodriguez y colaboradores (1987), Diseñaron y construyeron un simulador de lluvia “tipo boquilla” para laboratorio y campo permitiendo tener mayor uniformidad de lluvia y bajo costo de construcción. Este equipo se caracteriza por trabajar con un amplio rango de intensidades de lluvia (30 – 150 mm/h), siendo la energía cinética unitaria similar a la de las lluvias naturales en el rango (50 – 70 mm/h). Generando múltiples aplicaciones para el análisis y control de la erosión en los suelos.

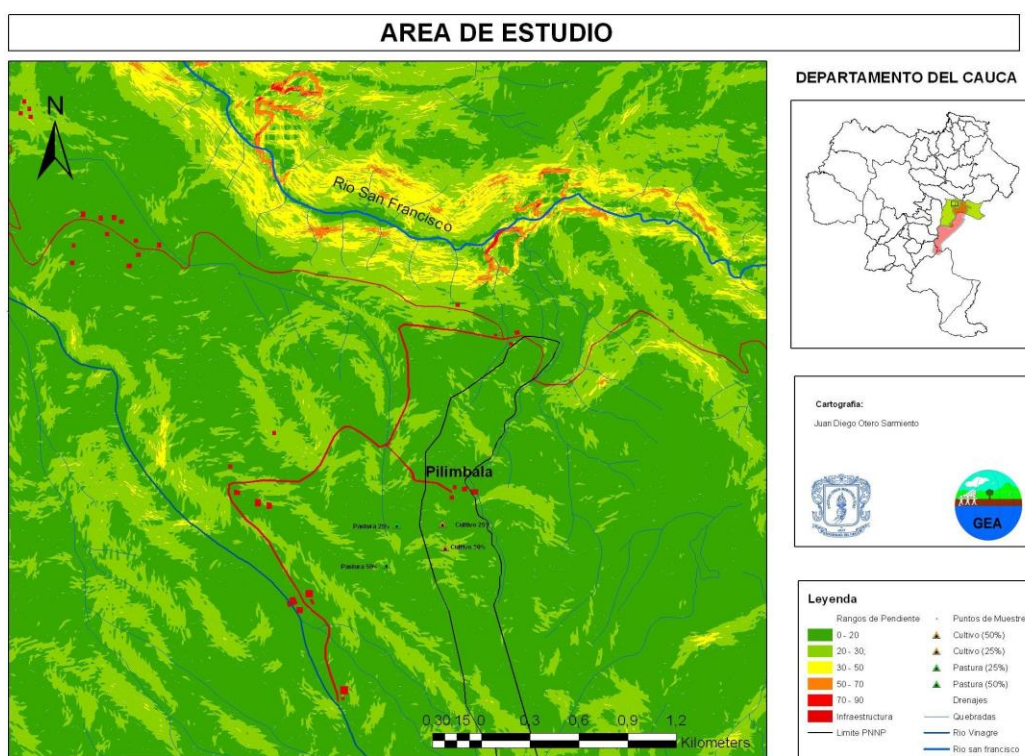
Cobo (1998) describe el diseño, construcción y evaluación de un minisimulador portátil de lluvia para zonas de ladera que permita determinar “in situ” la susceptibilidad de los suelos a la erosión. El minisimulador funciona con un sistema formador de gotas que opera con el principio de Vaso de Mariotte. Los parámetros de evaluación en el minisimulador fueron: tamaño de gota con rangos entre 2.5 a 4.0 mm, intensidad entre 40 y 120 mm/h, velocidad terminal, momento de ímpetu y energía cinética.

Montoya y Obando (2002) evalúan la capacidad de protección al suelo con especies forrajeras gramíneas y leguminosas de uso común en la cuenca del Río Coxacoaco en el estado de México. Utilizando un simulador de lluvia tipo Morin a intensidades de 50, 70, 120 mm/h. Determinando infiltración, el escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo. Los resultados indican que son necesarias lluvias mayores a 50 mm/h en suelos de cobertura vegetal para producir escurrimiento.

7 UBICACIÓN DE LA ZONA EXPERIMENTAL

La investigación se realizó en el Departamento del Cauca, municipio de Puracé, corregimiento de Pilimbalá, área de resguardo indígena, este sector de amortiguación se encuentra al pie del volcán Puracé, localizado en la parte alta de la Cordillera Central, de allí su relieve montañoso. La zona experimental se encuentra situada a $2^{\circ}21'47''$ de latitud Norte y $76^{\circ}24'28''$ de longitud Oeste (ver figura 4). Con una zona de vida según Holdridge (1979) de páramo pluvial Subandino (pp-SA). En la región la actividad económica gira en torno a la agricultura, la ganadería y otras actividades en menor tamaño como aves de corral y piscicultura (Trucha Arcoíris). También se dedican a la minería (Azufre) y explotación de otros materiales de roca.

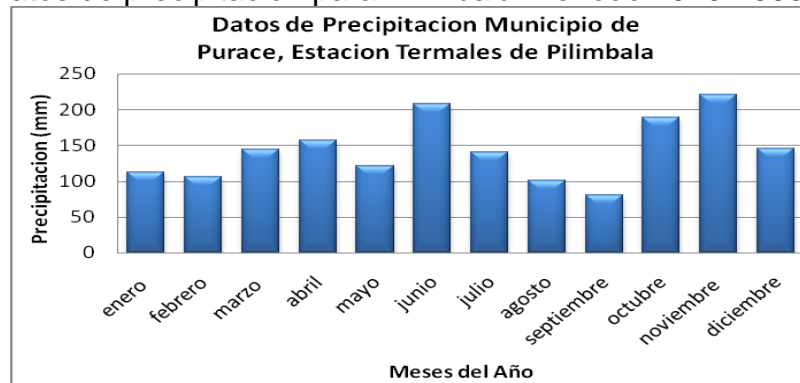
Figura 4. Mapa de área de estudio.



7.1 ASPECTOS BIOFÍSICOS:

Precipitación: de acuerdo con los registros pluviométricos (exceden de 20 años) de la Estación Pilimbalá (Ver figura 5); la precipitación promedio anual es de 1.626.3 mm. Distribuida en periodos alternos (bi-modal) de máxima y mínima precipitación, en todos los meses se presentan aguaceros y lloviznas continuas. (EOT, 2000).

Figura 5. Datos de precipitación para Pilimbalá. Periodo 1970-1993



Las temperaturas más bajas presentan una media de 16 y 17°C y las mayores 19°C (Julio y Agosto), con una temperatura anual de 16°C (EOT, 2000). En cuanto la humedad relativa oscila entre 88% (Junio, Julio y Agosto) y 86% (febrero y noviembre), para un promedio anual de 87 %. (EOT, 2000). La evaporación menor (42.0 mm.) se presenta en Julio y la mayor con valores entre 73.5 y 76.8 mm (diciembre y enero), con una evaporación anual de 4.6 mm (EOT, 2000). Los vientos presentan un recorrido anual de 23003 Km/hora.

Geomorfología: Puracé, esta zona volcánica se superpone e intercala una dinámica glacial y una dinámica de vertientes, presentando gran variedad paisajística: cadena volcánica, conos, crateras, lagos, coladas de lava, fauna y flora, de allí que la zona sea un gran punto de interés para la investigación científica. El subsuelo está constituido por rocas metamórficas (edad Paleozoica), rocas ígneas (edad Triásico-Jurásico), rocas sedimentarias (edad Cretácea) y en mayor cantidad por rocas volcánicas Terciarias-Cuaternarias. (EOT, 2000).

Suelos (Tepic Dystrandept): desarrollados a partir de cenizas y lodos volcánicos, con suelos bien drenados; en sectores se presenta erosión de tipo laminar y reptación (Pata de vaca); horizontes de colores negros y pardo grisáceo muy oscuro; texturas francas en las superficie y arcillosa en la profundidad, con acidez de fuerte a mediana, con altos contenidos de carbón orgánico (6.22%) y alta capacidad de intercambio catiónico. (EOT, 2000).

Cobertura vegetal natural: en el área de estudio la ganadería presenta en su cobertura vegetal dominante pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y falso Poa (*Holcus lanatus*.) en menor proporción.

8 METODOLOGÍA

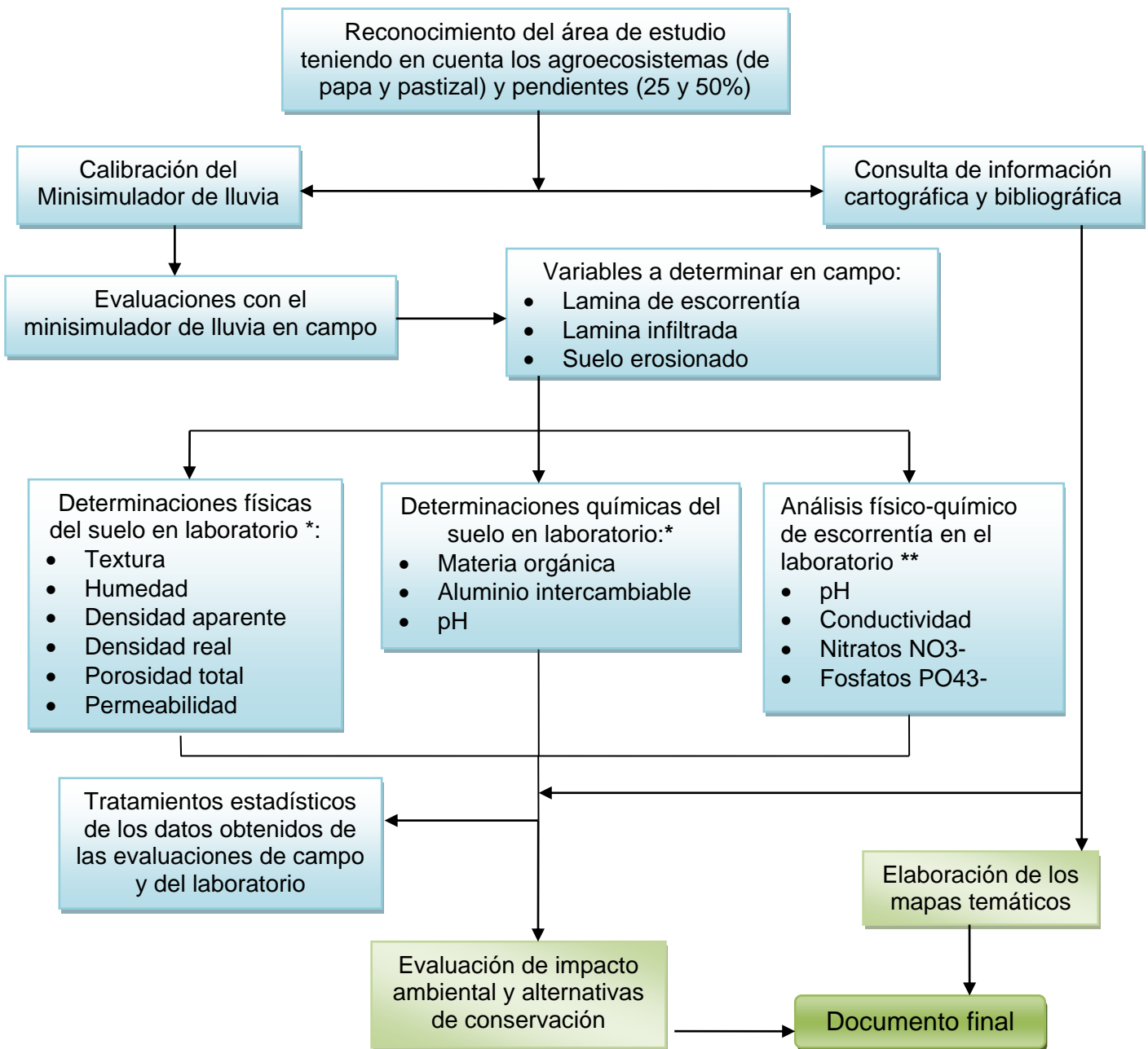
La gran variabilidad en la distribución de las lluvias naturales, especialmente en nuestra zona trópica ecuatorial, los costos y el difícil manejo de crear instalaciones en campo de forma permanente, hace necesario recurrir a trabajos de investigación donde las condiciones sea controladas y lleve a realizar un análisis de los diferentes factores de forma individual. Además de imponerle variables relacionadas como coberturas, tratamientos, pendiente y otras de gran utilidad para realizar mejores y más completos estudios del suelo, con mínimos costos y presencia de personal, es por eso la decisión de trabajar con el minisimulador de lluvia el cual tiene las características apropiadas para poder cumplir con los objetivos de este estudio.

Esta metodología se realizó teniendo como precedente la metodología utilizada por Torres (2000) y Muñoz (2007), quienes investigaron sobre la erosión del suelo con simuladores de lluvia en el departamento del Cauca.

Se plantearon siete fases en el estudio (ver figura 6):

1. Reconocimiento del área de estudio, levantamiento de información y base cartográfica
2. Características y Calibración del minisimulador de lluvia.
3. Evaluaciones con el minisimulador en campo.
4. Evaluación de las características físicas y químicas del suelo y la escorrentía en laboratorio.
5. Análisis estadístico de los datos obtenidos de las evaluaciones de campo y del laboratorio
6. Generación mapas temáticos donde se muestre la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica, teniendo en cuenta características geomorfológicas, hidrológicas, edáficas y de cobertura vegetal.
7. Evaluación de impacto ambiental de la susceptibilidad a la erosión en la zona de estudio y generación de alternativas de conservación para la mitigación de los efectos de erosión y el arrastre de los nutrientes.

Figura 6 Diagrama metodología general de la investigación.



Fuente: Autor.

*.Las determinaciones físicas y químicas del suelo en el laboratorio se realizaron al final de la investigación es decir en el mes de febrero.

** El análisis físico y químico de la escorrentía se realizó durante el transcurso de la investigación, es decir desde septiembre hasta enero.

8.1 RECONOCIMIENTO DEL ÁREA DE ESTUDIO

El reconocimiento del corregimiento de Pilimbalá, en el municipio de Puracé, se llevó a cabo por medio de recorridos a pie con el acompañamiento de guías de la zona. Se tuvieron en cuenta características especiales necesarias para esta investigación como uso del suelo y morfología (pendiente), también se utilizaron fotografías aéreas para la identificación de los agroecosistemas más representativos de la zona los cuales se georeferenciaron. Lo anterior con el fin de realizar un análisis a pequeña escala de la susceptibilidad de los agroecosistemas a la erosión.

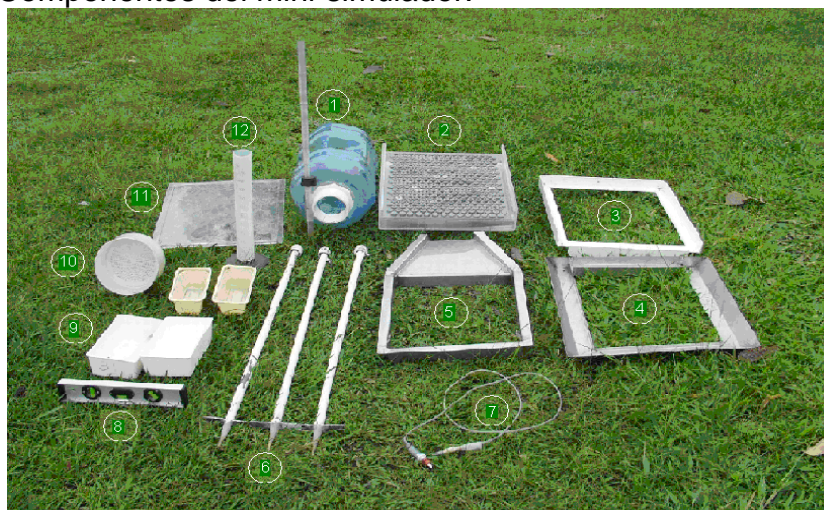
8.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MINISIMULADOR DE LLUVIA

8.2.1 Características generales:

Se utilizó como instrumento básico un simulador de lluvia basado en el principio de Vaso de Mariotte, diseñado por Cobo (1998). Con el que se determinara “in situ” el arrastre de suelo y nutrientes, la escorrentía e infiltración, semejando características importantes de la lluvia como: intensidad, velocidad de impacto, distribución y tamaño de las gotas de lluvia.

El minisimulador de lluvia para montaje en el campo cuenta con las siguientes partes (ver figura 7):

Figura 7. Componentes del mini-simulador.



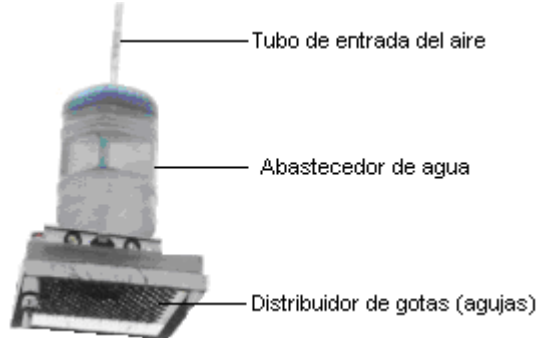
Fuente: Muñoz, 2007.

1. Abastecedor de agua; 2. Distribuidor de gotas; 3. Soporte de panel de agujas; 4. Bandeja de salpicado; 5. Bandeja de escorrentía; 6. Trípode; 7. Controlador de presión; 8. Nivel; 9. Colectores; 10. Embudo; 11. Protector de agujas; 12. Probeta.

8.2.1.1 Sistema formador de gotas:

Consta de un tubo controlador de presión, un abastecedor de agua y el distribuidor de gotas. El tubo regulador de la presión basado en el principio de Mariotte, el cual controla la presión sobre las agujas permitiendo calibrar las diferentes intensidades a las que se desea realizar los estudios. El tarro abastecedor de agua se encuentra calibrado y tiene una capacidad de almacenamiento de Cinco galones (18.9 L). El panel de agujas tiene la capacidad para 373 agujas, el diámetro de la aguja da como resultado el tamaño de la gota, para esta investigación se utilizaran agujas numero 24 (ver figura 8).

Figura 8. Sistema Formador de Gotas del Mini-simulador de Lluvia.



Fuente: Autor.

8.2.1.2 Soporte tipo trípode con altura graduable:

Consta de tres patas terminales los cuales terminan en punta para entrar y sujetarse en la tierra más fácilmente, esta base tiene dos patas extensibles que permiten nivelar el soporte en cualquier tipo de pendiente (ver figura 9).

Figura 9. Trípode Graduable.

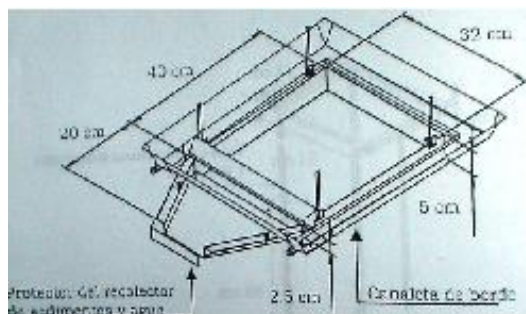


Fuente: Autor.

8.2.1.3 Bandeja de escorrentía recolectora:

Consta de dos partes: la bandeja de escorrentía y la bandeja de salpicado. La bandeja de escorrentía es un marco que delimita una área de 40cm por 33cm, tiene también una sección (5cm) que se entierra en el suelo y su fin es el de generar una infiltración vertical, así evitando flujos horizontales. La bandeja de salpicado se sitúa encima de la bandeja de escorrentía, para recoger el agua que no cayó en el área de delimitada (ver figura 10).

Figura 10. Bandeja de Escorrentía.



Fuente: Autor y cobo (1998).

8.2.2 Características de la simulación de lluvia:

Según Bubenzer citado por Cobo (1998) las características físicas principales de la lluvia natural que deben conseguir los simuladores de lluvia son las siguientes:

- Diámetro de las gotas de lluvia.
- Velocidad del impacto.
- Intensidad.
- Energía cinética.
- Lluvia uniforme y distribución aleatoria de las gotas. Todas las anteriores con características similares a las de la lluvia natural.

8.2.2.1 Diámetro de las gotas de lluvia:

Según Cobo (1998), para que las gotas de lluvia sean erosivas deben tener un diámetro entre 1 y 4 mm, de tal forma que tengan mayor impacto sobre el suelo, para poder determinar estos diámetros se utilizó el método de las bolitas de harina, propuesto por Bently (1904). Con agujas N° 24 que producen un diámetro aproximado de 2.75 mm, con una masa promedio de la bolita de harina de 0.00992 g.

8.2.2.2 Velocidad Terminal de las gotas de lluvia:

La máxima velocidad de una gota al caer a través de una columna de aire en unas condiciones dadas. Teniendo en cuenta el diámetro de las gotas de lluvia, Cobo (1998) reporta que la velocidad terminal es de 4.04 m/s, valor que es semejante a los reportados por Laws 1941 (Citado por Cobo, 1998).

8.2.2.3 Intensidad de las lluvias:

Determinada por la cantidad de lluvia en un periodo dado (mm/h ò mm/min) y se toma la medida por medio de un pluviómetro o un pluviógrafo, este datos se obtiene gracias a la información climatológica del IDEAM para el lugar de muestreo. Con estos datos se obtiene la temporalidad de la lluvia en un año y la intensidad presente. La intensidad se define mediante la ecuación 2:

Ecuación 2. Intensidad de las lluvias.

$$I = (V/A) / T$$

Donde: **I**: Intensidad. **V**: Volumen recolectado. **A**: Área del simulador. **T**: Tiempo de recolecta de la lluvia

8.2.2.4 Energía Cinética:

Es la energía que poseen las gotas de lluvia debido a su movimiento, esta depende de la masa de las gotas y la velocidad, Cobo (1998) calculo la energía cinética generada por el minisimulador de lluvia mediante la ecuación 3:

Ecuación 3. Energía cinética.

$$E = (1/2) mv^2$$

Donde: **E** es la energía cinética en julios, **m** es la masa de las gotas y **v²** la velocidad terminal de las gotas elevada al cuadrado. Esta ecuación arrojó una **E** de 17.563 J/mm*m² para la intensidad de 100 mm/h, con unas gotas de 2.75 mm de diametro.

8.3 CALIBRACIÓN DEL SIMULADOR

Se verifica que todas las agujas estén funcionando perfectamente es decir que la lluvia sea homogénea, para esto se utilizan 16 colectores numerados que abarcan toda la zona de influencia del simulador, luego se pone el simulador a funcionar y cada 5 minutos durante media hora se mide el volumen de cada colector (ver figura 11).

Figura 11. Verificación de la homogeneidad de la lluvia



Fuente: Autor.

Para medir la intensidad con la que se desea trabajar, se utilizara un embudo plástico recolector y una probeta. El embudo abarca toda la zona de influencia la cual es de 1524 cm². (Ver figura 12).

Figura 12. Calibración del Simulador.



Fuente: Autor.

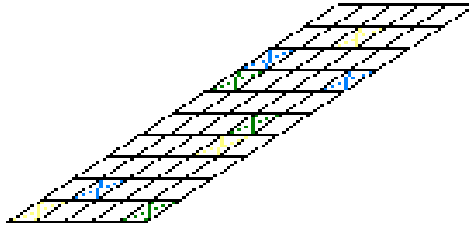
Luego de ponerse a correr el simulador durante un minuto se obtuvo la intensidad de la lluvia con la ecuación de la intensidad arriba mencionada.

8.4 EVALUACIONES CON EL MINISIMULADOR EN CAMPO

Para las pruebas experimentales en campo con el minisimulador de lluvia se seleccionaron los agroecosistemas de papa (*Solanum tuberosum*) y pastura, se realizó una evaluación a una intensidad de 100mm/h, durante media hora produciendo una lamina de 60mm, de acuerdo a Morgan (1986) la mayor erosión se presenta en las lluvias naturales con láminas entre 30 y 60mm.

Con las variables a desarrollar se estableció un diseño experimental aleatorio teniendo en cuenta los dos tipos de pendiente (25 y 50%), el uso y manejo del suelo (agroecosistema de papa y pastizal), la intensidad de la lluvia (100 mm h⁻¹) y un diámetro de gota de lluvia de (2.75 mm) más el tiempo requerido para cada simulación, media hora (30 minutos) con toma de muestra cada cinco minutos. Como resultado de dos tratamientos y 3 repeticiones para cada punto de muestreo, se estableció un total de 12 muestreos por mes durante una temporalidad de 6 meses en cuatro parcelas de 5 x 10 metros. Para un total final de 72 muestreos. Es de anotar que el lugar de simulación en cada parcela fue seleccionado al azar y no se pudo repetir en los siguientes meses (ver figura 13).

Figura 13. Parcela de 5 X 10m. Los colores muestran los posibles lugares al azar de muestreo cada mes.



Fuente: Autor.

Para proceder al muestreo se realiza el siguiente procedimiento:

- Limpiar muy bien el área de estudio de materiales que puedan interferir la caída de la lluvia o su escorrentía
- Instalar y nivelar el trípode.
- Ubicar el abastecedor de agua sobre el trípode, de tal forma que no queden burbujas dentro del panel,
- Instalar la bandeja colectora enterrándola en el suelo justo debajo del área de influencia del simulador.
- Ubicar los tarros colectores de sedimentos y la bandeja de salpicado.
- Por último se calibra la intensidad.
- También se tendrán en cuenta las condiciones ambientales al momento de la simulación como: estado del tiempo, vegetación asociada, temperatura del agua y del aire. Dado el caso que el viento influya sobre las pruebas de simulación, se utilizara un tipo de cortina plástica rodeando el simulador.

8.4.1 Variables a determinar

Con los datos obtenidos a partir de la simulación de lluvia en campo y teniendo en cuenta la pendiente se analizó: lamina de escorrentía superficial, lamina infiltrada total y suelo erosionado

8.4.1.1 Lamina de escorrentía superficial (mm)

Se determinó tomando el volumen final de agua y suelo arrastrado para cada simulación, en intervalos de cinco minutos durante media hora.

8.4.1.2 Infiltración

Definida como la cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones. Su medición se obtuvo sumando los volúmenes de escorrentía y el de salpicado para cada simulación, deduciendo de tal forma que el volumen de agua faltante es el absorbido por el suelo, correspondiente a la infiltración.

8.4.1.3 Suelo erodado

Las muestras de escorrentía para cada simulación se recolectaron en unos recipientes plásticos debidamente sellados y rotulados (código, fecha, hora y observaciones) con cinta de enmascarar. Posteriormente se llevaron al laboratorio para eliminar el exceso de agua que se encuentran por la

escorrentía superficial secándolos en un horno a 105°C, durante 24 horas, con el fin de tomar su peso en seco (g).

8.5 DETERMINACIONES FÍSICAS DEL SUELO EN EL LABORATORIO

Para esta fase se tuvo en cuenta muestras de suelo disturbadas y sin disturbar de cada lugar de simulación, teniendo en cuenta que las cualidades de los agregados se puedan medir u observar sin que cambie la composición o identidad de la sustancia.

- **Muestras disturbadas:** se utilizó una pala, para poder retirar las muestras del suelo, el hueco que se cava debe estar en forma de “V” y con una profundidad de aprox. 20 cm. Según Malagon, *et al* (1995).
- **Muestras sin disturbar:** las muestras se realizaron a una profundidad de 20 cm por medio de unos cilindros metálicos de volumen conocido (5 cm de alto por 2,5 cm de radio). Montenegro y Malangón (1990).

8.5.1 Textura

Se determino por el método hidrométrico o de Bouyoucos que determina después de 40 segundos, todas las partículas mayores de 50 micras se sedimentan, de tal manera que no tendrán ninguna influencia sobre el hidrómetro. Este método consiste en determinar la cantidad de sólidos en suspensión por medio del hidrómetro (Bravo y Giraldo, 2003).

8.5.2 Humedad

Se tomo a partir de una muestra (en campo) de suelo húmedo 10 g de suelo en una cápsula para ser introducida destapada en la estufa y mantenerla a 105 °C durante 24 horas. Posteriormente se deja enfriar la muestra en el desecador y se pesa en una balanza analítica. (Bravo y Giraldo, 2003).

8.5.3 Densidad aparente (D_a)

El método del cilindro consiste en tomar una muestra de suelo sin disturbar en un cilindro de un volumen conocido, los cilindros metálicos que se utilizaran para la prueba miden 5 cm de alto por 2.5 cm de radio. (Montenegro y Malagon, 1990). Los cálculos se realizaron a partir de las ecuaciones 4 y 5:

Ecuación 4. Densidad Aparente.

$$D_a = M_{ss} / V_c$$

Ecuación 5. Volumen de un cilindro.

$$V_c = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Donde:

D_b : Densidad aparente (g/cm^3). **M_{ss} :** Masa del suelo seco a 105 °C (g).

V_c : Volumen del cilindro donde se toma la muestra de suelo (cm^3).

8.5.4 Densidad real (D_R)

El método del picnómetro 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. (Montenegro y Malagon, 1990). Se determinara este parámetro por medio de la ecuación 6:

Ecuación 6. Densidad Real

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

8.5.5 Porosidad Total

Mediante la diferencia del valor de la densidad real y la densidad aparente puede obtenerse la porosidad total; esto equivale a la suma de la porosidad no capilar más la porosidad capilar. (Montenegro y Malagon, 1990).

8.5.6 Permeabilidad.

Se utilizaron cilindros metálicos de 5 cm. de alto x 4.16 cm. de diámetro tomando en campo las muestras con las precauciones adecuadas para no alterar el suelo. En la parte superior del los cilindros, se pone un pedazo de malla o liencillo, se ajusta con una banda de goma, se retira la tapa superior del cilindro y se colocan a saturación por capilaridad en una bandeja con agua que cubra la mitad del cilindro hasta que se observe espejo de agua en la superficie del suelo contenido en el cilindro y se instalan en el permeámetro y se miden las muestras colectadas cada 10 minutos hasta que 3 medidas consecutivas registren el mismo volumen dando así por terminada la determinación (ver ecuación 7).

Ecuación 7. Permeabilidad del suelo.

$$K = V / A \Delta t ([H+L] / L)$$

Donde:

H: carga de agua que se mantiene constante por encima del nivel superior del cilindro de suelo (cm.). **N:** Altura del cilindro de suelo (cm.). **Δt :** Tiempo transcurrido para recoger el agua que percola (h). **V:** Volumen de agua recogida en la probeta (cm³). **A:** Área de la sección circular del cilindro (cm²). **K:** Conductividad hidráulica (cm / hora)

8.6 DETERMINACIONES QUÍMICAS DEL SUELO EN EL LABORATORIO

8.6.1 Determinación de materia orgánica en el suelo

Se determino mediante el método de Walckley - Black. El cual consiste en oxidar el carbono presente en el suelo con un oxidante en medio ácido, utilizando como oxidante $K_2Cr_2O_7$ 1N y como medio, ácido sulfúrico concentrado. Como queda materia orgánica que no se oxida y $K_2Cr_2O_7$ que sobra después de la reacción entonces se valora volumétricamente lo que queda de $K_2Cr_2O_7$ con una solución de sulfato ferroso amónico, utilizando un blanco que conste de $K_2Cr_2O_7$ 1N con H_2SO_4 . (Bravo y Giraldo, 2003). Para el análisis en laboratorio se toman muestras de 0.1 g. (ver ecuación 8)

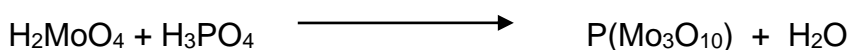
Ecuación 8. Materia orgánica mediante el método de Walckley – Black
% C orgánico = (B - M) x N x 0.003 x (100 + Pw) / Pm

8.6.2 Aluminio intercambiable

Las muestras se toman de la superficie del suelo hasta una profundidad de 20 cm, secada al aire y pasada por un tamiz de 2 mm. Posteriormente mezcladas y homogeneizadas. Consiste en agitar una muestra de suelo con una solución neutra de KCl de una concentración tal que produzca un desplazamiento de todos los iones presentes en el suelo, liberando así los iones H⁺ y Al⁺³, los cuales se titulan con soda en presencia de fenolftaleína. Una vez titulados estos iones quedan Al (OH)₂⁺² se valora el Al ⁺³ presente en forma hidratada.

8.6.3 Fosfatos, Método de Bray II

El ion fluoruro precipita el calcio soluble extrayendo las formas P-Ca más solubles. Una vez extraído el fósforo se determinó colorimétricamente, formando un complejo del fósforo con Acido molibdico. El método cloro molibdico utilizó una solución de HCl-(NH₄)₆Mo₇O₂₄ 4 H₂O produciendo H₂MoO₄



8.6.4 Nitrógeno total, Método kjeldhal

El suelo se trato con ácido sulfúrico y catalizadores oxidando la materia orgánica y convirtiendo el nitrógeno en sulfato ácido de amonio. El sulfato ácido de amonio se descompuso por un exceso de álcali para liberar el amoniaco, recogido por destilación sobre ácido bórico. El borato de amonio se valoró con HCl o H₂SO₄ usando como indicadores una mezcla de rojo de metilo y azul de metileno

8.7 ANÁLISIS DE LA ESCORRENTÍA EN EL LABORATORIO

8.7.1 Determinación del pH

El pH se determino por medio de un potenciómetro teniendo en cuenta las precauciones de laboratorio para su análisis.

8.7.2 Conductividad de la Escorrentía

El análisis de conductividad se realizo por medio de la sonda multiparametrica tipo YSI incorporated.

8.7.3 Método de determinación de Nitratos NO₃⁻

El análisis de Nitratos se realizo por medio de la sonda multiparametrica tipo YSI incorporated. Cuando el electrodo se sumerge en agua (escorrentía), se establece un potencial a través de la membrana que depende de las cantidades relativas de nitrato en la muestra.

8.7.4 Método de determinación de Fosfatos PO_4^{3-}

La identificación de este nutriente se realizó mediante la técnica del test selectivo en cubetas para fosfatos en Spectroquant con el método colorimétrico No 14848 (APHA, AWWA, WPCF). Para la determinación colorimétrica de la absorbancia se utiliza como equipo un Spectroquant, NOVA 60. Para llevar a cabo la media de fosfatos se realiza en una cubeta de 20 mm adaptada para los intervalos de medidas de 0.03 – 15.3 mg/L de PO_4^{3-} .

8.8 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

Los valores obtenidos de nutrientes (nitratos y fosfatos) escorrentía, infiltración y suelo erodado se procesaron con el Programa de Análisis Estadístico SPSS 11.5 para Windows. Con este paquete se calculo los estadísticos descriptivos, las Pruebas de los efectos Inter.-Sujetos, estadísticos de contraste con la Prueba de Mann-Whitney^(a) para uso de suelo y Análisis de Varianza Multifactorial (ANOVA) de una vía. Para un diseño completamente al azar, buscando diferencias entre tratamientos

8.9 INTERPOLACIÓN DE LOS RESULTADOS POR MEDIO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Para tal fin se utilizaron sensores remotos, fotografías aéreas y cartografía para lograr hacer una espacialización de los datos obtenidos de pérdida de suelo, escorrentía e infiltración. Incorporando algunas características presentes de la zona de estudio (clima, suelo, uso del suelo, pendientes). Logrando con todo esto mapas temáticos donde se muestra la vulnerabilidad del suelo a la erosión.

8.10 EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO

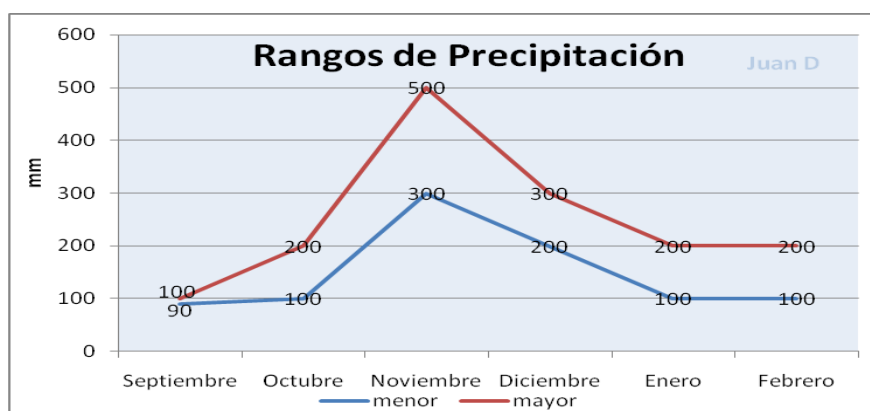
Se utilizo el método de matriz de FEARO evaluando las actividades antrópicas como la ganadería, cultivos (papa), quemas y demás factores con el fin de tener un mejor entendimiento del funcionamiento de los agroecosistemas de papa y pastizal como están siendo afectados por el proceso erosivo y el arrastre de nutrientes.

9 RESULTADOS Y DISCUSIONES

9.1 COMPORTAMIENTO DE SUELO ERODADO, INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.

Es importante empezar por mostrar los registros de precipitación para los meses en donde se realizaron los muestreos (figura 14), ya que este factor influye de una manera directa sobre las tres variables dependientes a analizar. Los mayores registros de precipitación se encuentran entre los meses de noviembre y diciembre con rangos de 300 a 500 y 200 a 300mm respectivamente, y los registros más bajos se presenta para el mes septiembre (50 a 100mm).

Figura 14. Rangos de precipitación Puracé. Periodo septiembre de 2008 a febrero de 2009.

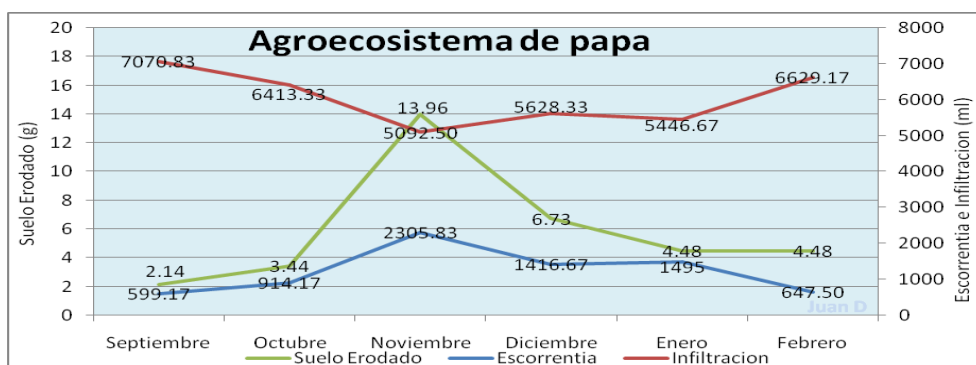


Fuente: IDEAM (2009).

En el agroecosistema de papa en el mes de noviembre se presentó la cantidad más alta de suelo erodado con 13,96g y también corresponde al mes donde se encontró el volumen más alto de escorrentía superficial con 2305,83 ml (ver figura 15). Además noviembre cuenta con la menor cantidad de infiltración de los seis meses (5092,5ml), la humedad alcanzó un valor del 83.35% ya que las precipitaciones para este mes tuvieron un rango de 300 a 500mm (figura 14).

El valor más bajo de suelo erodado se presentó para el mes de septiembre con 2,14g, mes donde se presentó la mayor cantidad de infiltración (7070,83ml), con una disminución considerable de escorrentía superficial 599ml y una humedad de 77.75%,. Estos resultados corresponden a los bajos valores de precipitación en este mes y es importante notar que el valor de humedad es alto, ya que durante todo el año se presentan lluvias y neblinas típicas de estos ecosistemas altoandinos.

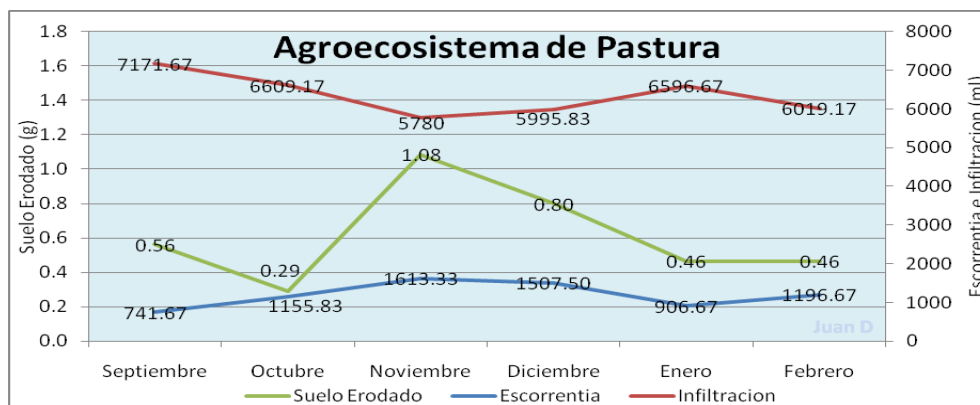
Figura 15. Comportamiento de las variables suelo erodado, infiltración y escorrentía superficial durante los seis meses de muestreo para el agroecosistema de papa.



Fuente: Autor.

El agroecosistema de pastura presentó más suelo erodado (1,08g) en Noviembre, siendo también el mes de mayor volumen de escorrentía superficial (1613,33ml) y menor cantidad de infiltración (5780ml), con una humedad de 83.18% (ver figura 16). El valor más bajo de suelo erodado (0,29g) y la mayor cantidad de infiltración (6609,17ml) se obtuvieron en el mes de octubre, manteniéndose estables los volúmenes de escorrentía superficial, con una humedad de 75.95%.

Figura 16. Comportamiento de las variables suelo erodado, infiltración y escorrentía superficial durante los seis meses de muestreo para el agroecosistema de pastura.



Fuente: Autor.

9.2 COMPORTAMIENTO DE LAS TRES VARIABLES DEPENDIENTES (suelo erodado, infiltración y escorrentía superficial), RESPECTO A LAS VARIABLES INDEPENDIENTES (uso, pendiente y meses)

Tabla 3. ANOVA de un factor.

Descripción del comportamiento de suelo erodado, infiltración y escorrentía superficial para cada variable independiente.

Variable Dependiente	Variable Independiente	Media	Desviación Típica	Coeficiente de Variación	Intervalo de confianza para la media al 95%		
					Límite inferior	Límite Superior	
Escorrentía superficial (ml)	USO						
	Cultivo	1229.72	768.64	62.5%	9,696,504	14,897,941	
	Pastura	1186.94	643.98	54.3%	9,690,533	14,048,356	
Infiltración (ml)	Diferencia	42.78					
	Cultivo	6046.81	1021.74	16.9%	57,010,991	63,925,120	
	Pastura	6362.08	883.13	13.9%	60,632,756	66,608,911	
Suelo erodado (g)	Diferencia	-315,27					
	Cultivo	5.87	6.56	111.7%	36,533	80,911	
	Pastura	0.61	0.46	75.4%	,4546	,7659	
	Diferencia	5.26					
	PENDIENTE (%)						
Escorrentía superficial (ml)	50	1389.86	722.60	52.0%	11,453,695	16,343,528	
	25	1026.81	645.39	62.9%	8,084,365	12,451,746	
	Diferencia	363.05					
Infiltración (ml)	50	5951.94	1013.75	17.0%	56,089,394	62,949,495	
	25	6456.94	846.25	13.1%	61,706,161	67,432,728	
	Diferencia	-505					
Suelo erodado (g)	50	4.13	7.00	169.6%	17,588	64,967	
	25	2.35	2.61	110.9%	14,710	32,384	
	Diferencia	1.78					
	MESES						
Escorrentía Superficial (ml)	(-) Septiembre	670.42	454.87	67.8%	3,814,061	9,594,272	
	Octubre	1035.00	553.53	53.5%	6,833,012	13,866,988	
	(+) Noviembre	1959.58	836.25	42.7%	14,282,531	24,909,136	
	Diciembre	1462.08	531.28	36.3%	11,245,225	17,996,442	
	Enero	1200.83	480.67	40.0%	8,954,295	15,062,372	
	Febrero	922.08	593.84	64.4%	5,447,770	12,993,897	
	(+) Septiembre	7121.25	492.71	6.9%	68,081,963	74,343,037	
	Octubre	6511.25	941.13	14.5%	59,132,869	71,092,131	
	(-) Noviembre	5436.25	755.00	13.9%	49,565,466	59,159,534	
	Diciembre	5812.08	768.54	13.2%	53,237,751	63,003,916	
Infiltración (ml)	Enero	6021.67	956.59	15.9%	54,138,766	66,294,567	
	Febrero	6324.17	937.13	14.8%	57,287,457	69,195,877	
	(-) Septiembre	1.35	1.70	126.1%	,2686	24,347	
	Octubre	1.87	3.44	184.2%	-,3184	40,515	
	(+) Noviembre	7.52	10.54	140.1%	,8276	142,177	
	Diciembre	3.76	4.37	116.2%	,9837	65,410	
	Enero	2.47	2.28	92.2%	10,236	39,205	
	Febrero	2.47	2.28	92.2%	10,236	39,205	
	Suelo erodado (g)						

(+) y (-) muestran los meses donde se presentó mayor y menor cantidad de las variables dependientes.

Fuente: Autor.

9.2.1 Comportamiento de las tres variables dependientes respecto al uso.

La variable independiente “uso” posee dos niveles (pastura y cultivo). La tabla 4 muestra diferencias significativas para suelo erodado respecto a los dos agroecosistemas, de igual forma se observan que los resultados de infiltración y escorrentía superficial no presentan diferencia significativa.

Tabla 4. Estadísticos de contraste (Variable de agrupación: Uso del suelo).

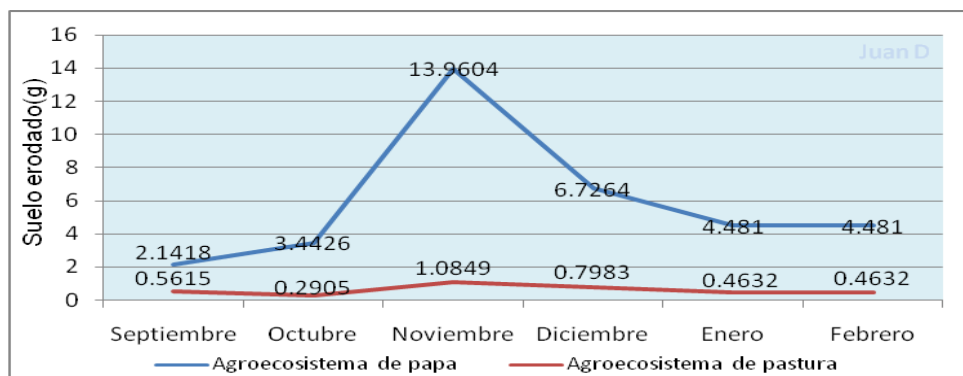
	Escorrentía (ml)	Infiltración (ml)	Suelo erodado (g)
U de Mann-Whitney	642,000	543,000	116,000
W de Wilcoxon	1308,000	1209,000	782,000
Z	-,068	-1,183	-5,992
Sig. asintót. (bilateral)	,946	,237	,000

Fuente: Autor.

Al aplicar la prueba de distribución normal de Shapiro-Wilk no se acomodaron a la distribución normal, esto era esperado ya que las variables asociadas a las ciencias naturales generalmente son asimétricas, por lo tanto se realizó la prueba no paramétrica de U Mann-Whitney, asumiéndose influyente las variables dependientes que toman valores inferiores a 0.05 de significancia, encontrándose que la variable “suelo erodado” fue significativa ($p: 0,000$). Se presentó una diferencia de 5,26g (ver tabla 4), entre agroecosistemas confirmando que existen diferencias en el comportamiento de suelo erodado.

9.2.1.1 Variable significativa “suelo erodado”.

Figura 17. Comparación de las medias de suelo erodado para los dos agroecosistemas.



Fuente: Autor.

En la figura 17 el agroecosistema de papa y el de pastura reaccionan de forma diferente a la erosión, evidenciando como la cobertura vegetal en el agroecosistema de pastura tiene un efecto protector, sujetando el suelo y amortiguando el impacto directo de las gotas de lluvia manteniendo unos

niveles bajos de suelo erodado. Además las raíces mejoran la porosidad e infiltración limitando la creación de la lámina de escorrentía sobre el suelo.

Un factor que produjo estas diferencias entre agroecosistemas fue el manejo del suelo, en el agroecosistema de papa, al dejar el suelo descubierto favorece la disgregación y su consecuente arrastre por efecto de la escorrentía superficial, además la pérdida de la estructura genera cambios como el sellamiento o la rápida saturación de los poros expresado por la baja permeabilidad (tabla 7). Además los agricultores al querer evitar la inundación o los excesos de humedad de sus cultivos durante la lluvias, preparan las eras en sentido de la pendiente, donde la longitud en algunos casos mayor de 15m favorece la velocidad de la escorrentía superficial, pasando de un factor de transporte a uno de desprendimiento provocando una erosión más severa.

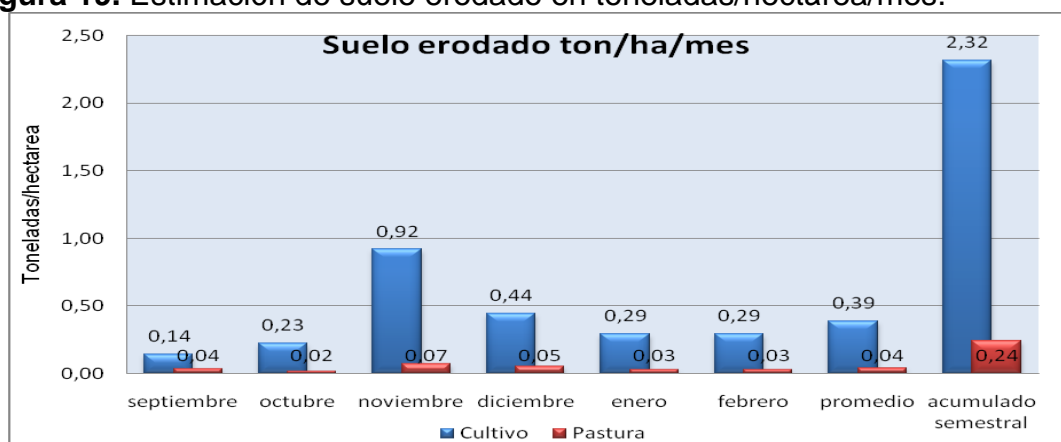
Figura 18. Efecto de erosión para las eras en sentido de la pendiente dentro de un agroecosistema de papa.



Fuente: Autor.

De acuerdo a las unidades de medida utilizadas internacionalmente para suelo erodado (toneladas/hectárea/mes) y para una intensidad de lluvia de 100mmh^{-1} se logro extrapolar los datos de la investigación dando como resultado la figura 19.

Figura 19. Estimación de suelo erodado en toneladas/hectárea/mes.



Fuente: Autor.

Según Bennett (1993) tomado de Muñoz (2007) las estimaciones más acertadas por los edafólogos indican que bajo condiciones no alteradas son necesarios del orden de 300 años para producir 25mm de suelo, lo cual puede ser comparado también con los valores según la FAO (1996) de formación de suelo la cual se acerca a una tonelada $ha^{-1}año^{-1}$. La grafica 19 indica que para el agroecosistema de papa durante seis meses y con un precipitación $100mmh^{-1}$ se está arrastrando 2.32 ton/ha, además si a esto le agregamos que los suelos de paramo tiene procesos de formación muy lentos debido a las características ambientales a las que están expuestos, por lo tanto es posible afirmar que la tasa de erosión sobrepasa la tasa de formación del suelo demostrando que este agroecosistema no es autosustentable.

9.2.2 Comportamiento de las tres variables respecto a las pendientes.

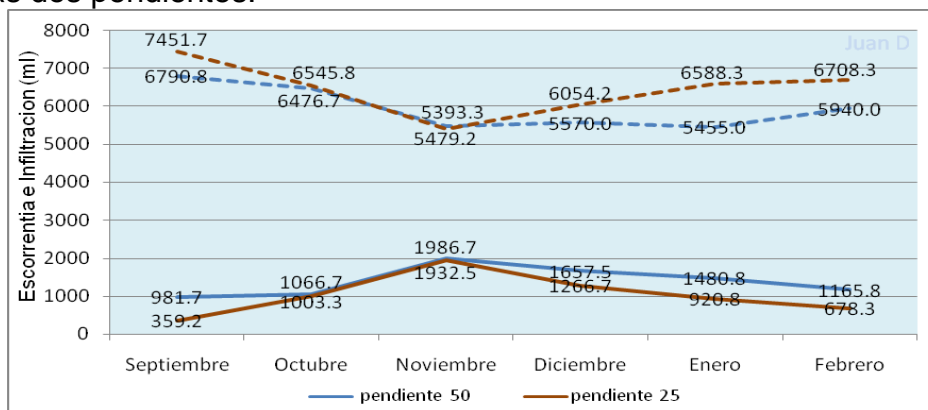
Tabla 5. Estadísticos de contraste (Variable de agrupación: Pendiente).

	Escorrentía (ml)	Infiltración (ml)	Suelo erodado (g)
U de Mann-Whitney	450,000	464,000	644,000
W de Wilcoxon	1116,000	1130,000	1310,000
Z	-2,230	-2,072	-,045
Sig. asintót. (bilateral)	,026	,038	,964

Fuente: Autor.

9.2.2.1 Variables significativas Infiltración y Escorrentía superficial.

Figura 20. Comparación de las medias de escorrentía superficial e Infiltración para las dos pendientes.



Fuente: Autor.

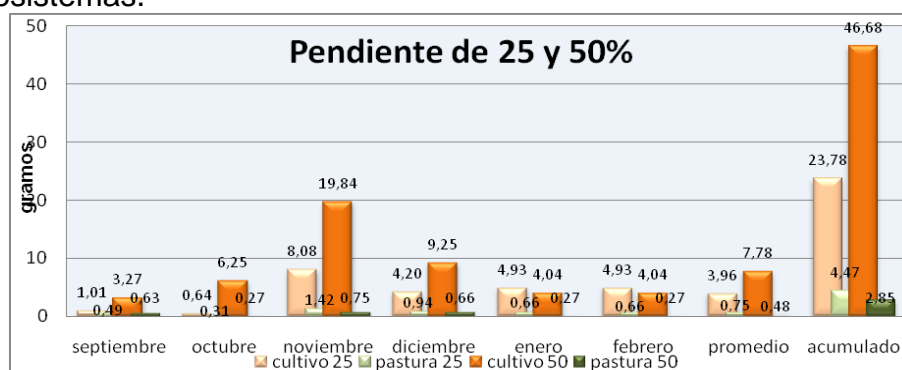
En la figura 20 se muestra un aumento de escorrentía superficial a medida que la infiltración disminuye, este comportamiento se presentó para los tipos de pendientes, aun cuando en la pendiente de 50% la escorrentía se mantuvo más alta hasta febrero. Es importante resaltar que en la figura 14 se muestra que el mes de mayor precipitación para el sector es noviembre dando como resultado una alta concentración de humedad en las pendientes de 50 y 25% con valores de 79.67 y 86.86% respectivamente. La variable infiltración se ve expresada durante todo el transcurso de la investigación inversamente proporcional a la escorrentía superficial.

Para esta investigación se esperaba que la infiltración y la escorrentía superficial no tuvieran un efecto significativo en las pendientes debido al área muestreada (1524 cm²), pero las altas concentraciones de humedad y lluvia en lo alto de la montaña afectaron las condiciones del suelo, llevando a que la escorrentía superficial en la pendiente de 50% alcanzara mayor velocidad y energía cinética, favoreciendo el arrastre de los agregados separados por el impacto de las gotas de lluvia, aún cuando el suelo erodado no presentó diferencia significativa (ver tabla 5).

9.2.2.2 Comparación de suelo erodado para las dos pendientes.

Según la tabla 5 el comportamiento de suelo erodado no alcanzó a ser influenciado por las dos pendientes, este resultado se puede dar por los altos coeficientes de variación (169,6% para la pendiente de 50% y 110,9%) para la de 25%), producto de la alta variabilidad expresada por los datos de suelo erodado en campo (ver tabla 3). Sin embargo durante el transcurso de la investigación se identificaron ciertos comportamientos que muestra la influencia de la pendiente en el arrastre de suelo, como lo muestra la figura 21.

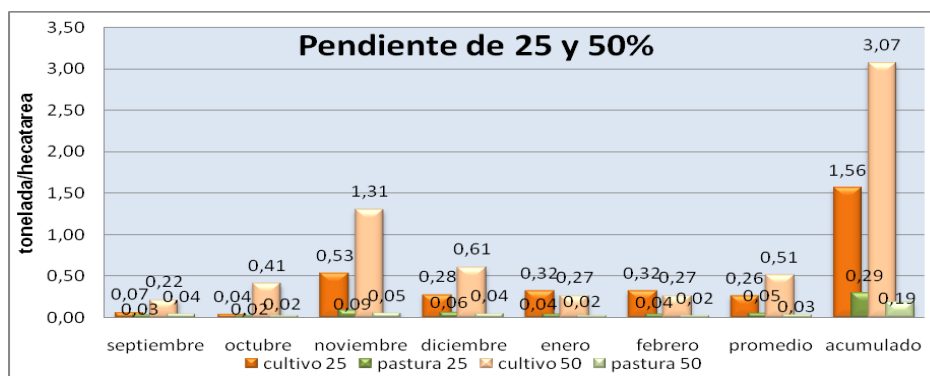
Figura 21. Comparación de suelo erodado para las dos pendientes en los dos agroecosistemas.



Fuente: Autor.

En la figura 21 para el mes de noviembre se nota una elevado volumen de arrastre de suelo para el agroecosistema de papa (19.8g) en la pendiente de 50%, contrastando con 0.75g de suelo erodado encontrado para el mismo agroecosistema en la pendiente de 25%. De igual manera se presentan estos contrastes en el agroecosistema de papa para los demás meses. En cuanto al agroecosistema de pastura se alcanza a percibir cierta influencia de la pendiente en el arrastre de suelo, como lo indicado para el mes noviembre (8.08g para 50% y 1.42 para 25%). A pesar de las anteriores diferencias estos resultados no alcanzaron a ser significativos estadísticamente.

Figura 22. Comparación de suelo erodado para las dos pendientes según las medidas internacionales.



Fuente: Autor.

Si se extrapolan los datos de acuerdo a las unidades de medida utilizadas internacionalmente para suelo erodado (toneladas/hectárea/mes), a una intensidad de lluvia de 100mmh^{-1} , en la figura 22 se espera para el mes de noviembre en el agroecosistema de papa un arrastre de 1,31ton/Ha, para la pendiente de 50% y de 0.53ton por hectárea para la pendiente de 25%, lo cual será significativo con una diferencia promedio de 0.25ton de suelo erodado. De igual forma en el agroecosistema de pastura entre sus dos pendientes se presenta una diferencia promedio de 0.02ton.

9.2.3 Comportamiento de las tres variables respecto a los meses.

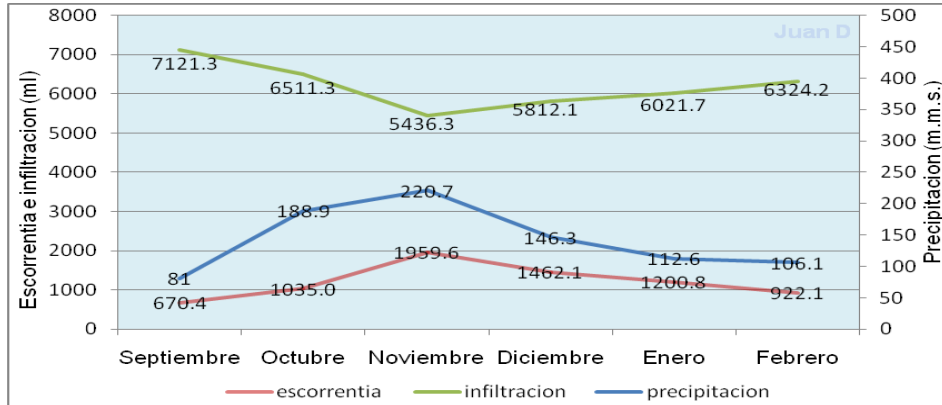
Tabla 6. Estadísticos de contraste (Variable de agrupación: Meses)

	Escorrentía (ml)	Infiltración (ml)	Suelo erodado (g)
Chi-cuadrado	22,988	25,004	10,457
Gl	5	5	5
Sig. asintót.	,000	,000	,063

Según la prueba de distribución normal de Shapiro-Wilk los datos fueron asimétricos por lo tanto se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis, ya que se aproxima mucho a la distribución normal y es para más de dos muestras independientes. Las variables dependientes significativas (p: 0,000) fueron las de Escorrentía superficial e Infiltración indicando diferencias para los seis meses de estudio (ver tabla 6).

9.2.3.1 **Variables significativas Infiltración y Escorrentía superficial:** Los resultados se relacionan en la figura 23

Figura 23. Comportamiento de las variables dependientes durante los seis meses de muestreo.



Fuente: Autor.

La figura 23 evidencia la estrecha relación existente entre la temporalidad climática del sector y los altos valores de escorrentía superficial para el mes de noviembre, concordando con el mes de mayor precipitación, con una humedad de 83.26%. De otra parte el mes de menor precipitación anual según EOT (2000) es septiembre, donde se obtuvo mayor la infiltración, mostrando una humedad del suelo de 73.81% que aún cuando no deja de ser alta, se notó que el comportamiento de escorrentía superficial y suelo erodado disminuyeron significativamente.

En cuanto a la escorrentía superficial cuyo valor más alto se observa en noviembre atribuible a los altos volúmenes de precipitaciones, provocando que el nivel de saturación del suelo se encuentre alto por la humedad, así los macro-poros no pueden acumular más agua generando un taponamiento de los mismos por saturación, impidiendo la infiltración y facilitando la creación de la lamina de escorrentía. Para el mes de septiembre hubo fuertes vientos y bajos niveles de precipitación constatados por los indígenas de la zona, el suelo tuvo menor humedad, por lo tanto se dio una abertura de los macro-poros o rompimiento de los sellos de los mismos aumentando los niveles de infiltración, disminuyendo la escorrentía superficial.

9.3 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS SUELO: Los resultados se presentan en la tabla 7

Tabla 7. Propiedades físicas del suelo aplicando la prueba U de Mann-Whitney

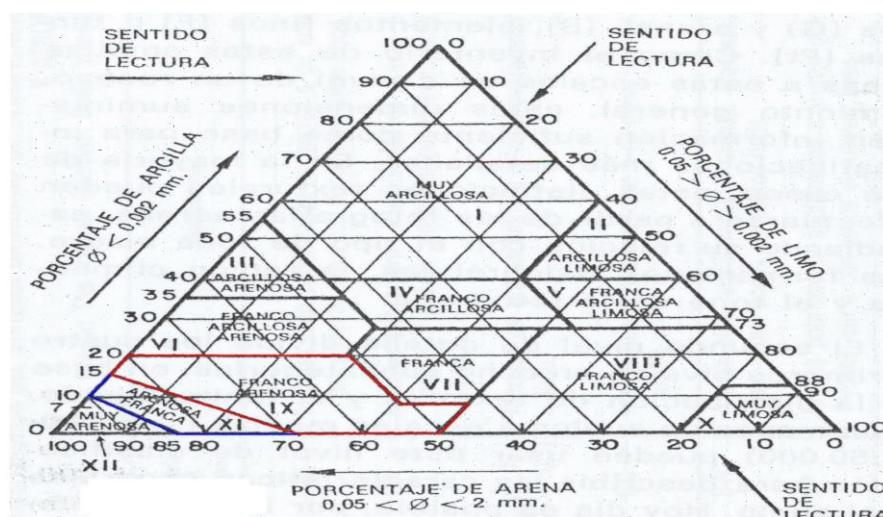
VARIABLE	Agroecosistema de Pastura	Agroecosistema de papa	Sig. Asintónica (bilateral)
%Arena	75,24	81,555	0,333
%Limo	17,28	11,96	0,667
%Arcilla	6,47	6,47	1,0
Textura	Franco-Arenoso	Franco-Arenoso	
Porosidad total %	75,74	65,38	0,015
Densidad Real g/cc	3,39	2,53	0,02
Densidad Aparente g/cc	0,8230	0,8753	0,589
Permeabilidad cm/h	0,81	0,28	0,026
Humedad	92,11	67,73	0,015

Se realizó la prueba de U de Mann-Whitney para verificar si existe influencia entre las propiedades físicas del suelo y la variable independiente “uso”, la cual posee dos niveles (agroecosistema de papa y pastura), encontrándose que las variables “porosidad total, densidad real, permeabilidad y humedad” fueron significativas.

9.3.1 Textura.

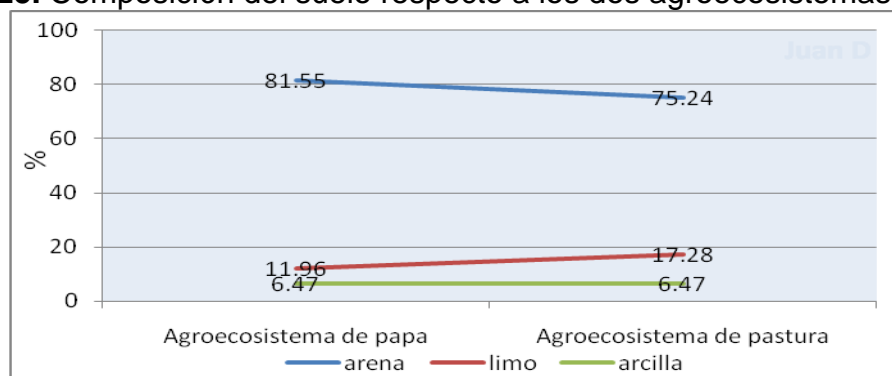
Los resultados obtenidos a partir del método de bouyucos muestran en la tabla 7 altos niveles de arena para los dos usos, siendo superior en el agroecosistema papa. El contenido de limos es superior en el agroecosistema de pastura, también se detectan bajos niveles de arcillas en los dos agroecosistemas. Estos resultados indican el posible grado de erosión, sobre todo en los suelos dedicados al agroecosistema de papa. De acuerdo al sistema de clasificación textural de suelos del U.S. Department of Agriculture (USDA) en su gráfico triangular indica que la textura para los suelos estudiados es Franco Arenoso (ver figura 24).

Figura 24. Triángulo para texturas de acuerdo a USDA



Al comparar los dos agroecosistemas respecto a la textura y teniendo en cuenta que los muestreos se realizaron al final de la investigación, se podría inferir que no hubo una modificación significativa de la textura mediante el manejo del uso, sin embargo, se aprecia como se manifestó anteriormente un cambio apreciable en el contenido de arenas y limos, indicando que el uso sí estaría afectando la estabilidad de las partículas del suelo, conduciendo a una erosión progresiva y continuada. Los resultados de textura concuerdan con las investigaciones sobre erosión en el departamento Cauca de Muñoz (2007) y Urresti y zemanate (2009).

Figura 25. Composición del suelo respecto a los dos agroecosistemas.



Fuente: Autor.

De acuerdo a la figura 25 el agroecosistema de papa presenta mayor concentración de partículas grandes (arena con 81.55%) y menor concentración de partículas pequeñas y livianas como los limos, esto se debe a que no tiene la protección de la vegetación y se ve expuesto a una constante erosión donde la escorrentía superficial arrastra las partículas más finas y reactivas y con ellas los nutrientes (PO_4^{3-} y NO_3^-) necesarios para el desarrollo del agroecosistema, esta textura con predominio de arena confirma la erosión presente para el agroecosistema.

De acuerdo a Montenegro y Malagon (1990) y a Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2000) los valores para la textura mejor balanceada están comprendidos entre 50-65% para arena entre 10- 25% para arcilla y entre 28-50% para limo), de tal manera que las plantas no tienen limitaciones fisiológicas y existe una buena retención de agua y oxígeno, pero la figura 25 indica valores diferentes a los anteriormente descritos, presentando mayor porcentaje de arena incrementando los altos niveles de porosidad (ver tabla 7), favoreciendo la aireación y la circulación del agua, presentando una baja retención de nutrientes y agua, según la Taxonomía de suelos de Soil Survey Staff citada por Claver (1981) es del 20 al 30%. Briggs citado por Claver (1981) estudio la relación entra la textura y la cantidad de agua disponible para las plantas y encontró que para la textura analizada en esta investigación con cultivos con raíces someras y pastos con raíces más profundas el porcentaje de volumen de agua disponible es del 10 al 15 %.

En cuanto a la concentración de elementos finos, la figura 25 indica que son bajos y por lo tanto afectan las características internas del suelo, acarreado problemas en los nutrientes del suelo al ser lavados con facilidad y por percolación, depositándolos en las capas freáticas quedando inalcanzables para las platas, provocando baja fertilidad y suelos ácidos. La baja concentración de elementos finos también impide la formación de agregados dando inestabilidad al suelo, haciendo vulnerable a la erosión, bajando los niveles de fertilidad y aumentando la acides del suelo.

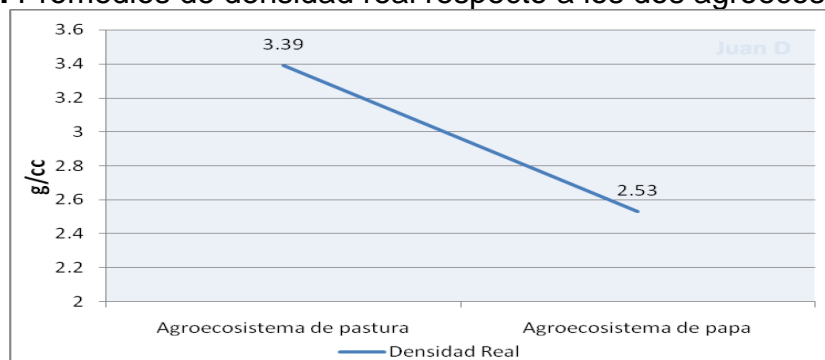
9.3.2 Densidad Aparente.

Los valores promedio de densidad aparente en la tabla 7 indicaron leves diferencias para cada agroecosistema, por lo tanto no fueron significativos.

Se presenta para los dos agroecosistemas densidades aparentes bajas, según la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2000) al tener valores inferiores a 1.1g/cc, debido a que son suelos asociados con materiales orgánicos, alta porosidad y humedad, lo que facilita una buena circulación de agua (infiltración y escorrentía sub-superficial) y aire permitiendo una gran actividad de fauna sub-superficial, típica de suelos derivados de cenizas volcánicas. Otra causa de que la densidad aparente sea baja es debido a las actividades antrópicas como la labranza que se realiza para el agroecosistema de papa.

9.3.3 Densidad Real.

Figura 26. Promedios de densidad real respecto a los dos agroecosistemas.

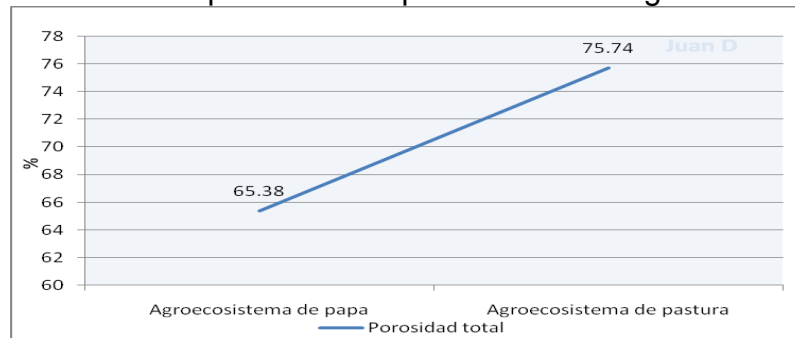


Fuente: Autor.

La figura 26 muestra los valores promedios reportados para la densidad real indicando diferencias significativas para los dos agroecosistemas. La tabla 7 muestra, que el agroecosistema de pastura presenta según la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2000) un valor muy alto de densidad real (3,39g/cc) superior a 2.8g/cc, y el agroecosistema de papa (2,53g/cc) en un rango de bajo a normal comprendido entre 2.3 y 2.5g/cc. Esto porque el agroecosistema de papa esta más expuesto a las actividades antrópicas y al no tener la protección de la vegetación se encuentra en constante cambio por la exposición directa a variables medioambientales afectando el suelo.

9.3.4 Porosidad.

Figura 27. Promedios de porosidad respecto a los dos agroecosistemas.



Fuente: Autor.

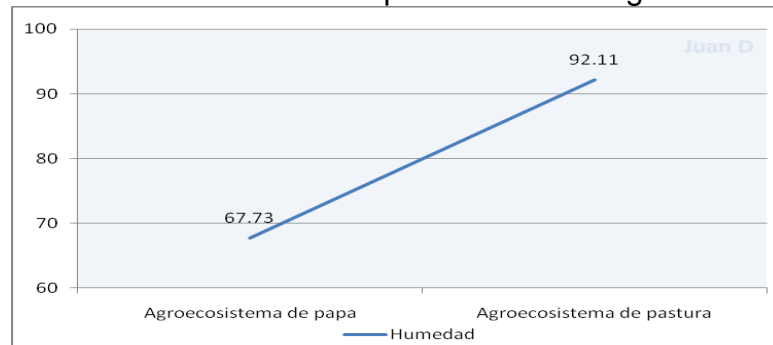
La porosidad (ver figura 27) para los dos agroecosistemas es alta de acuerdo a la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2000), superior al 60%, este resultado era esperado debido a la estrecha relación con la textura franca-arenosa, caracterizada por presentar una elevada porosidad, la tabla 7 indica que la porosidad se encuentra inversamente relacionada con la densidad aparente, a medida que la densidad aparente disminuye, la porosidad se eleva. La tabla 7 muestra que existe diferencias ($p: 0,015$) para los agroecosistemas siendo la pastura (75,74%) significativamente superior al de papa (65,38%).

El agroecosistema de pastura presenta mayor porosidad debido a la cobertura vegetal, sus raíces tienden a aumentar la porosidad formando poros grandes y abiertos, haciendo que el agua y el aire circulen con mayor facilidad, aumentando la infiltración, también para este sistema se encontraron ciertos organismos edáficos que perforan la tierra incrementando la formación de poros. El agroecosistema de papa presenta una porosidad menor debido al cambio de estructura del suelo, esto se da cuando se prepara el terreno para la siembra, con consecuencias como la minimización de la porosidad y la infiltración, generando un aumento en la erosión por sellamiento de los poros y en consecuencia el aumento de los niveles de escorrentía.

Los resultados de porosidad concuerdan con las investigaciones sobre erosión en el departamento Cauca de Muñoz (2007), Campo (2004) y Urresti y Zemanate (2009) quienes reportaron unos porcentajes altos de porosidad entre 71,55 y 79,01% para sistemas de pastura y suelo desnudo; en las investigaciones también la porosidad es más alta para sistema de pastura.

9.3.5 Humedad.

Figura 28. Promedios de humedad respecto a los dos agroecosistemas.



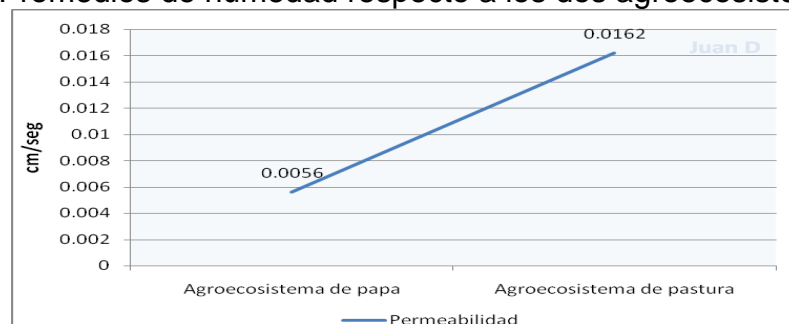
Fuente: Autor.

Al aplicar las pruebas estadísticas de U de Mann-Whitney los datos reportaron significancia para los agroecosistemas ($p: 0,015$). El agroecosistema de pastura muestra los porcentajes más altos de humedad (79,5%), debido a la menor presencia de arena, a su alto contenido de MO y que las raíces forman grandes poros en el suelo concentrando ciertas cantidades de agua, las cuales después actuarán en procesos biológicos como la evapotranspiración. Además la cobertura vegetal controla la evaporación del suelo restringiendo el paso de la humedad hacia el medio exterior, en contraste el suelo desnudo con el porcentaje de humedad de 81.68% hace una evaporación más rápida por la exposición directa a factores medioambientales como el aire, el sol entre otros.

En general los datos de humedad encontrados para los dos agroecosistemas en el suelo fueron altos debido en primer lugar al medio húmedo natural que rodea los agroecosistemas, las constantes precipitaciones, también son suelos derivados de cenizas volcánicas con materiales piroplásticos y abundante materia orgánica, mejorando la retención de humedad.

9.3.6 Permeabilidad Hidráulica.

Figura 29. Promedios de permeabilidad respecto a los dos agroecosistemas.



Fuente: Autor.

El método de cabeza variable mostró niveles de permeabilidad con un rango entre 0,08 y 1,46 cm/h, y al aplicar las pruebas estadísticas de U de Mann-Whitney los datos reportaron grados de significancia de 0,026.

La figura 29 indica niveles bajos de permeabilidad clasificados según el Soil Survey Staff citado por Claver (1981) como muy lenta a moderadamente lenta, a pesar de ser un suelo con textura franco-arenosa y presentar alta porosidad, con estos resultados se muestra que no solo la porosidad es necesaria para poder estimar la permeabilidad, sino también hay otros factores como geometría y la interconexión del sistema poroso, materia orgánica, estructura entre otros; lo cual puede dificultar notablemente la circulación del agua en el suelo. Para estos suelos se nota que la estructura ha sido modificada volviéndose inestable, tanto la composición física del suelo como la granulometría está mal equilibrada, limitando la permeabilidad. Por otra parte los porcentaje de limo (entre 17,28 y 11,96), de materia orgánica (13.72%) y humedad en la textura empiezan a provocar efectos desfavorables generando impermeabilidad, en contraste con las características conductivas que presentan los suelos con esta textura. El U.S. Soil Conservation Service (1972) indica que los suelos expuestos a cambios de uso con cultivos en filas y con mala rotación además de tener un cuarto o menos de la superficie con forrajeras o césped tienen una infiltración mínima.

9.4 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

Tabla 8. Propiedades químicas del suelo aplicando la prueba U de Mann-Whitney

VARIABLE	Agroecosistema de Pastura	Agroecosistema de papa	Sig. Asintónica (bilateral)
Materia Orgánica (%)	13.83	13.64	1.0
Relación C/N	12.53	13.40	
pH	5.05	4.81	0.33
Al+3 Intercambiable(meq/100g)	1,65	1,92	1,0
Nitrógeno Total (%)	0,64	0,59	0,004
Fósforo disponible (ppm)	7,03	6,43	0.002

9.4.1 Materia Orgánica

La tabla 8 muestra que la materia orgánica a la profundidad de 0-5cm presenta valores altos de MO en los dos agroecosistema, según la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2000) están clasificados como suelos orgánicos al presentar mas del 10% de materia orgánica, influyendo en las propiedades físicas, químicas y en la actividad biológica del suelo, por lo cual afecta la fertilidad del mismo. El Soil Survey staff (1951) citado por Claver (1981) de acuerdo al porcentaje de materia orgánica mostrado en la tabla 8, el suelo presenta una calificación de muy húmifero.

Entre los dos usos no se indica variabilidad de allí su significancia p:(1.0), en cuanto a la relación C/N, presenta gran utilidad para la interpretación de calidad de materia orgánica respecto a su fertilidad, según Nicolás (1968) citado por Claver (1981), la calidad de materia orgánica es mediana al estar dentro del

rango de 12 a 15 C/N. En pastura esta relación indica una mineralización normal de su MO, mientras que en papa esta relación indica baja mineralización, sin embargo este parámetro puede estar influenciado por la aplicación de fertilizantes como el caso 10-30-10, el cual suministra N inmediatamente disponible para los microorganismos y de esta manera estos no tienen necesidad de mineralizar la MO

9.4.2 pH.

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos de pH en una relación de 1:1, permitiendo ubicarlos según la clasificación del U.S.DA. citado por Claver (1981) dentro de la categoría de suelos muy fuertemente al estar dentro del rango de 4.5 y 5.0, típico de suelos andicos.

Esta acidez de los suelos es debida a su origen volcánico, los altos contenidos de materia orgánica, la presencia del aluminio que esta en nivel medio, siendo toxico no solamente para las plantas si no también para el suelo. Además la adicción de abonos para el agroecosistema de papa aportan acidez al suelo, lo mismo que las minas de azufre a cielo abiertos cercanas a la zona permiten el ingreso de algunas lluvias acidas.

El agroecosistema de papa se esperaba que tuviera un pH más neutro debido al encalamiento que se hace antes de sembrar, es importante resaltar que las muestras para el análisis físico-químico se tomaron al final de la investigación es decir 6 meses después de haberse hecho el proceso de encalamiento, donde se encontró que parte de la cal había sido arrastrada por escorrentía superficial y el cultivo presentaba en el suelo acidez alta, haciéndolo menos productivo. Lo anterior es un indicativo de erosión es decir su a medida que aumenta la erosión aumenta la acidez del suelo, hasta llegar al punto de generar toxicidades para las plantas, en el agroecosistema de papa también empezaron a aparecer una serie de helechos los cuales se desarrollan en medio ácidos. Montenegro y Malagon (1990) indican que el rango óptimo general para todos los cultivos está entre 5,5 y 6,7 pero el resultado que demostró la investigación fue de 4,81, lo cual influye negativamente en la disponibilidad y absorción de nutrientes por parte de la planta, además inhibe el intercambio catiónico y las interacciones químicas al interior del suelo.

9.4.3 Aluminio Intercambiable.

Los resultados obtenidos en la tabla 8 muestran según Muñoz (1985) un nivel medio de aluminio intercambiable al ubicarse dentro del rango de 1.6 a 3.0 meq./100g suelo, produciendo acidez y un efecto moderadamente toxico sobre las plantas puesto que inhibe el proceso de división celular y afecta el normal desarrollo de la actividad enzimática.

El aluminio intercambiable no indicó diferencia significativa entre los agroecosistemas, aún cuando se esperaba que el encalamiento al inicio del agroecosistema de papa disminuyera los niveles de aluminio, pero durante el transcurso de la investigación el pH de la escorrentía superficial mostró un

constante lavado de la cal adicionada, también la adición de fertilizantes aumentan la acidez extrayendo aluminio de las arcillas.

9.4.4 Nitrógeno en el Suelo

La tabla 8 evidencia los altos niveles de nitrógeno según la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2000) en los dos agroecosistemas atribuible al alto contenido de MO y a la entrada de agentes externos como fertilizantes. Para el agroecosistema de pastura se presento mayor porcentaje de nitrógeno ya que permite diferentes formas de fijación biológica gracias a la presencia de la cobertura vegetal y de microorganismos, además de la alta porosidad y la baja densidad aparente permitiendo la circulación de aire para participar en proceso oxidativos que contribuyen con los procesos de nitrificación.

9.4.5 Fósforo en el suelo

La tabla 8 muestra que los valores de fósforo disponible en ambos agroecosistemas son bajos según la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2000) al estar por debajo de 30ppm, atribuido a la fuerte acidez de estos suelos derivados de cenizas volcánicas, de acuerdo a Pumisacho y sherwood (2002) citado por Ñustez (2006) y colaboradores (2006) el fósforo se enlaza con la superficie reactiva de las alófanas y los complejos de humus-aluminio, afectando el desarrollo y el crecimiento de la plantas.

En el agroecosistema de papa la deficiencia retarda el crecimiento apical, dando lugar a plantas pequeñas y rígidas reduciendo el almidón de los tubérculos manifestando manchas necroticas vistas en campo (ver figura 45). Este nutriente indispensable para la sostenibilidad de ambos agroecosistemas, presenta deficiencias haciendo necesario la aplicación de fertilizantes como fue mencionado anteriormente. Según Ñustez (2006) los requerimiento de fósforo para cultivos de papa varia entre 40 y 100 kg/ha de P_2O_5 , dosis de fertilización fosfórica superiores a 200 kg/ha no presentan respuesta en el rendimiento, lo anterior controvierte las practicas tradicionales de los agricultores ya que por lo general utiliza valores por encima de los 400kg/ha, implicando mayores costos de producción y peligro de contaminación de las diferentes fases ambientales.

9.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESPECTO A LAS TRES VARIABLES INDEPENDIENTES (uso del suelo, pendientes y meses).

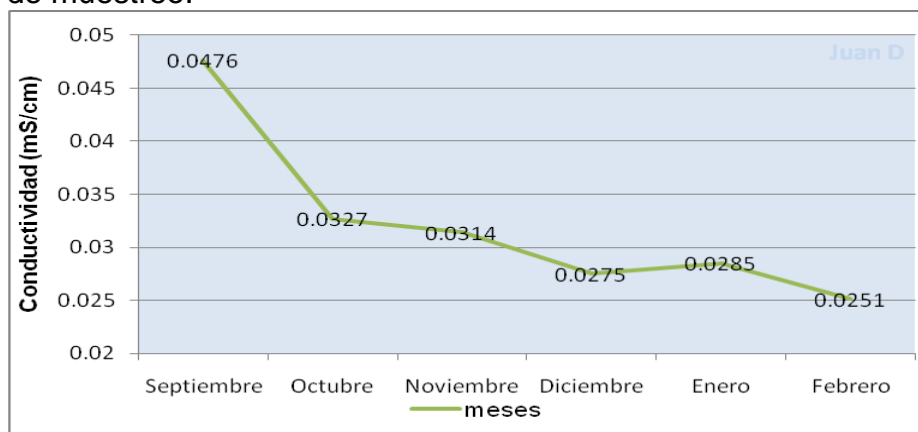
Tabla 9. Pruebas de los efectos inter-sujetos. Variables dependientes: Conductividad (mS/cm) y pH

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	Media cuadrática	F	Sig.
Conductividad				
Pendientes	,000	,000	3,650	,062
Meses	,004	,001	6,396	,000
Usos	,000	,000	1,407	,241
pH				
Pendientes	,006	,006	,169	,683
Meses	2,357	,471	13,184	,000
Usos	1,652	1,652	46,211	,000

9.5.1 Conductividad de la escorrentía superficial.

Según la prueba de Shapiro-Wilk la conductividad se ajustó a la prueba de normalidad, por lo tanto se aplicaron pruebas paramétricas, como es el caso de los efectos inter-sujetos con el fin de determinar si existen diferencias entre las medias. Según la tabla 9 la variable independiente “meses” tiene influencia directa en la conductividad ($p=0,00$).

Figura 30. Comportamiento de la Conductividad (mS/cm) durante los seis meses de muestreo.



Fuente: Autor.

En la figura 30 se muestra la conductividad, con el fin de poder comparar las medias durante el transcurso de la investigación. Septiembre fue el mes donde se inicio la investigación y también donde se inicio la preparación del suelo para el agroecosistema de papa, el hecho de voltear el suelo deja al descubierto partículas activas que serán arrastradas por erosión hídrica; también se le agregaron fertilizantes como el 10-30-10, (ver figura 44) con el fin de tener una buena productividad, estas acciones antrópicas hacen que la escorrentía superficial tenga mayor capacidad conductora de electricidad la

figura 30 indica, el primer de investigación presenta el valor mas alto de conductividad,

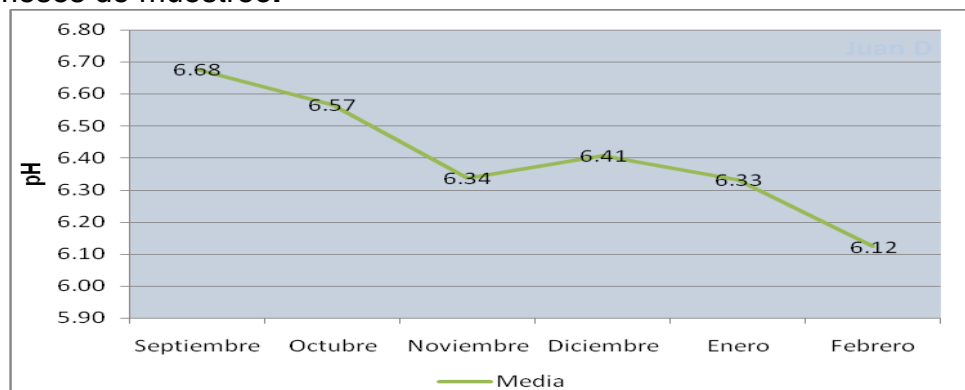
Sin embargo, estos valores a medida que pasa el tiempo fueron disminuyendo notablemente hasta llegar al valor más bajo en febrero, último mes de investigación donde la erosión produjo un fuerte disminución de la conductividad atribuido al lavado constante ejercido por las intensas lluvias en la zona.

9.5.2 pH del agua de escorrentía superficial.

Según la prueba paramétrica de los efectos inter-sujetos (tabla 7) determinó la influencia que tienen los meses y usos sobre el pH de la escorrentía superficial al presentar un valor de significancia de 0,00 evidenciando que el pH de escorrentía varía durante los seis meses de estudio para cada agroecosistema (ver tabla 9).

9.5.2.1 pH de la escorrentía superficial respecto a los meses.

Figura 31. Comportamiento del pH en los dos agroecosistemas durante los seis meses de muestreo.

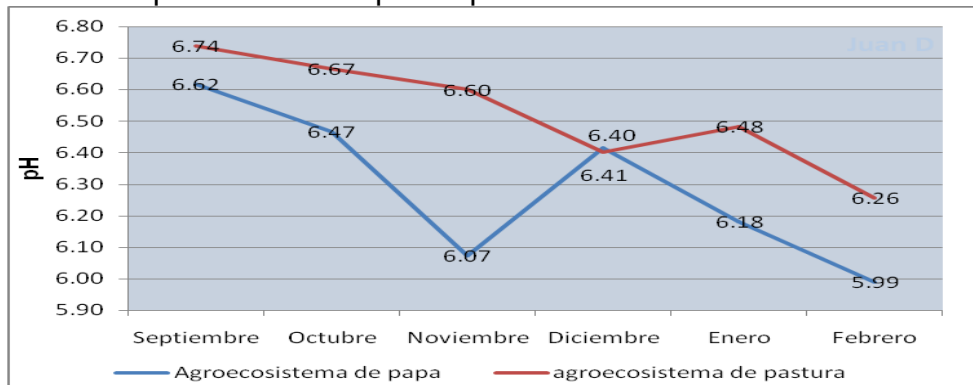


Fuente: Autor.

La figura 31 muestra valores altos de pH en la escorrentía superficial, producto del encalamiento que se hace al inicio del agroecosistema de papa, sin embargo se evidencia que los valores disminuyen a medida que transcurre el tiempo, por el constante lavado de las lluvias, la alta presencia de materia orgánica y la adición de abonos (10-30-10) generando fuerte acidez. También la disminución de pH en ambos agroecosistemas se puede atribuir a la generación continua de aluminio intercambiable provocado por la aplicación de fertilizante, induciendo acidez que no logro quitar completamente el encalamiento.

9.5.2.2 pH de la escorrentía superficial respecto a los usos.

Figura 32. Comportamiento de pH respecto a los usos.



Fuente: Autor.

Respecto al agroecosistema de pastura se puede encontrar que el pH de la escorrentia superficial fue más alto que el agroecistema de papa, además durante el transcurso de la investigación el agroecosistema de pastura mantuvo una mejor estabilidad del pH en agua de escorrentia superficial, demostrando la protección que brinda la cobertura vegetal al suelo contra la erosión, evitando la acidificación del suelo. (Ver figura 32).

En el agroecosistema de papa tuvo un incremento de pH, debido al enclamiento hecho antes de sembrar la papa, pero después de algunas lluvias en el mes, la acidez fue aumentando, ya que la erosión se produce de una forma más severa al no tener protección de la cobertura vegetal, además, cultivar en sentido de la pendiente favorece el arrastre de suelo y nutrientes por escorrentia superficial. Otros factores que influyen en la acidez son los altos porcentajes de materia orgánica, los valores medios de aluminio intercambiable y la aplicación de fertilizantes generando acidez al suelo.

9.6 ANÁLISIS DE NUTRIENTES ARRASTRADOS POR EL AGUA DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESPECTO A LAS TRES VARIABLES INDEPENDIENTES.

Tabla 10. Pruebas de los efectos inter-sujetos. Variables dependientes: P-PO₄³⁻ y N-NO₃⁻ (mg/L)

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	Media cuadrática	Significación
P-PO₄³⁻(mg/L)			
Pendientes	,003	,003	,020
Meses	,051	,010	,000
Usos	,009	,009	,000
N-NO₃⁻ (mg/L)			
Pendientes	3,167	3,167	,021
Meses	6,050	1,210	,073
Usos	2,359	2,359	,045

a R cuadrado = ,628 (R cuadrado corregida = ,449)

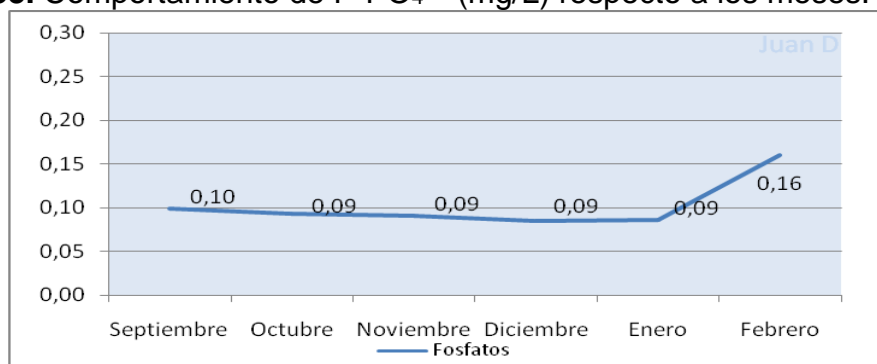
9.6.1 Análisis de fosfatos (P-PO₄³⁻) en escorrentía superficial.

Se aplico la prueba paramétrica de los efectos inter-sujetos para determinar las diferencias existentes entre las medias de P-PO₄³⁻ con respecto a las tres variables independientes. La tabla 10 muestra todas las variables independientes influyendo sobre los fosfatos evidenciando la variación durante los seis meses de estudio, con valores de significancia menores a 0,05, atribuido posiblemente a la extracción del nutriente por parte del cultivo. Lo anterior concuerda con el reporte de Urresti y zemanate (2009) donde su valor de significancia fue de 0.013 demostrando la variabilidad de este nutriente respecto al uso de suelo.

En cuanto al arrastre de este nutriente por parte de la escorrentía superficial se encuentra un leve desplazamiento, pero al menos durante el transcurso de la investigación el arrastre mostrado de fósforo por escorrentía superficial fue bajo, sin embargo a largo tiempo puede significar un incremento en el sistema hídrico. En las graficas 33, 35 y 36 se aprecian cambios pero al indicar la escala se observa que los valores no alcanzan si quiera 1ppm lo cual es muy bajo y no representa un verdadero arrastre de fosfatos por escorrentía superficial.

9.6.1.1 Análisis de P-PO₄³⁻ en escorrentía superficial respecto a los meses.

Figura 33. Comportamiento de P-PO₄³⁻ (mg/L) respecto a los meses.



Fuente: Autor.

El comportamiento de los fosfatos respecto a la variable independiente meses indica según la figura 33 un comportamiento con leves variaciones de septiembre a enero, aún cuando se aplicó una fuente de fósforo en forma de fertilizante, este hecho se puede atribuir a que el cultivo está extrayendo este nutriente, pero el fertilizante aplicado suministra la cantidad suficiente para el cultivo, el resto se puede fijar o adsorber sobre la superficie coloidal del suelo.

Febrero el único mes que se sale abruptamente del anterior grupo, presenta el nivel más alto de fosfatos arrastrado por escorrentía superficial con 0.16mg/L, este incremento se puede atribuir a la preparación del suelo para un

agroecosistemas de papa en la parte superior del lugar de muestreo en una pendiente de 50%, allí se agregaron fertilizantes en este mes; aun cuando septiembre no es lluvioso (IDEAM, 2009), los indígenas de la zona reportaron fuertes precipitaciones para los días siguientes al establecimiento del cultivo, el cual se encuentra a tres metros de la zona de muestreos, indicando que por erosión partículas de suelo fueron arrastradas hacia partes más bajas es decir hasta la zona de muestreo, elevando los valores de fosfatos (ver figura 34).

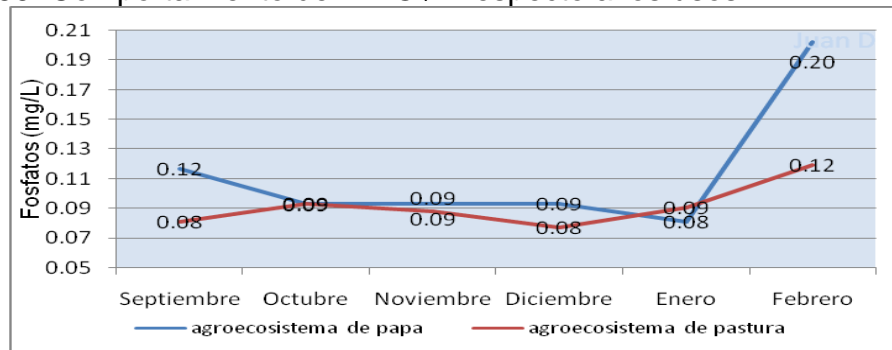
Figura 34. Agroecosistema de papa sobre las zonas de muestreo.



Fuente: Autor.

9.6.1.2 Análisis de P-PO₄³⁻ en el agua de escorrentía superficial respecto al uso.

Figura 35. Comportamiento de P-PO₄³⁻ respecto a los usos.



Fuente: Autor.

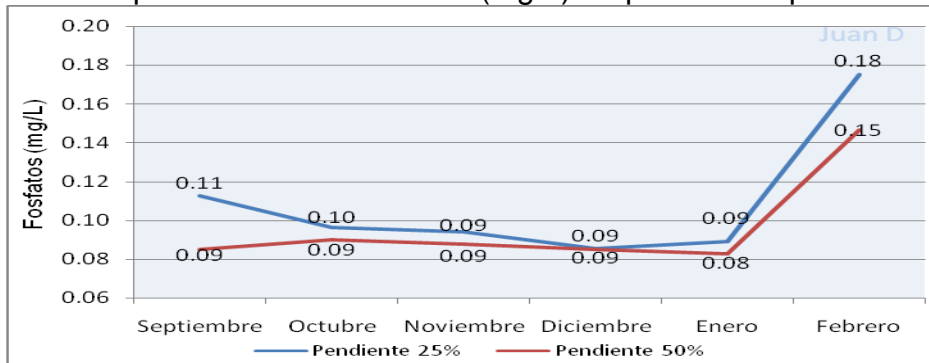
En la figura 35, se observa que en el agroecosistema de pastura el contenido de fosfatos en escorrentía superficial mantuvieron una mejor estabilidad del arrastre y los valores de nutrientes arrastrados fueron más bajos. La cobertura vegetal brindó protección evitando la disgregación del suelo, interceptando las gotas de lluvias, además de funcionar como barrera evitando que la escorrentía superficial tomara mayor velocidad haciendo más severa la erosión.

En cuanto al agroecosistema de papa el arrastre de fosfatos por escorrentía superficial no se mantuvo estable en primera instancia debido a la adición de fertilizantes, también debido a la extracción de nutrientes por parte del cultivo y por el arrastre de suelo con fertilizantes proveniente de un agroecosistema de la parte superior. Este agroecosistema mostró un leve incremento de fosfatos durante todos los seis meses de estudio con un total de 0.1133mg/L, contra los

0.0916mg/L encontrados para el agroecosistema de pastura, aún cuando, se esperaba que la diferencia fuera mayor por la adición de fertilizantes para el agroecosistema de papa, pero es posible que el fósforo se haya fijado al suelo favorecido por los suelos ácidos de la zona.

9.6.1.3 Análisis de P-PO₄³⁻ en escorrentía superficial respecto a las pendientes.

Figura 36. Comportamiento de P-PO₄³⁻ (mg/L) respecto a las pendientes.



Fuente: Autor.

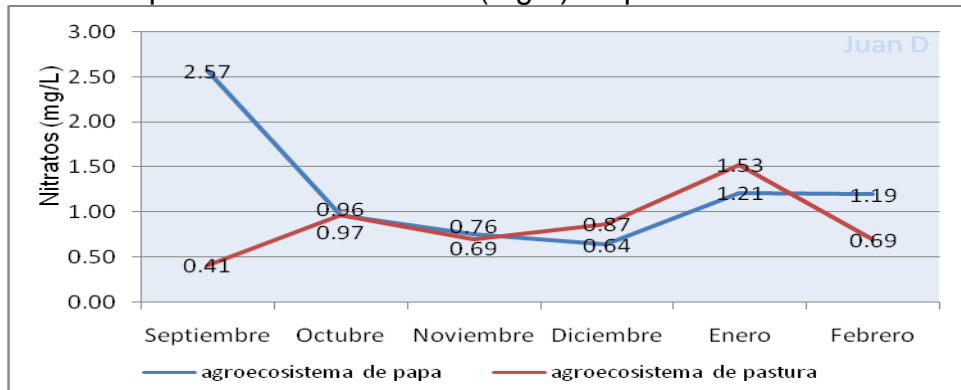
La figura 36 muestra el comportamiento de los fosfatos respecto a las pendientes; se nota para la pendiente de 25% que durante los seis meses de estudio se encontró un arrastre superior de nutrientes en comparación con la pendiente de 50% debido a que la escorrentía superficial producto de las lluvias naturales arrastran los nutrientes de las pendientes más pronunciadas (50%) depositándolos en la zona. Por tal razón al hacer las pruebas con el simulador de lluvia la presencia de fosfatos en la pendiente de 25% fue mayor. Al sumar los promedios arrojo para la pendiente de 25% un total de 0,6523-mg/L de fosfatos y para la pendiente de 50% un total de 0,5773-mg/L de fosfatos demostrando un leve incremento para la pendiente de 25%.

9.6.2 Análisis de nitratos (N-NO₃⁻) en escorrentía superficial.

La tabla 10 muestra la influencia de las variables independientes “pendientes y usos” en los nitratos, demostrando la variación de estos durante los seis meses de estudio obteniendo valores de significancia menores a 0,05. El anterior registro de influencia que tiene los usos en nitratos concuerda con el reporte de Urresti y zemanate (2009) donde su valor de significancia fue de 0.017 demostrando la variabilidad de este nutriente respecto a suelo desnudo y con vegetación.

9.6.2.1 Análisis de $N-NO_3^-$ en escorrentía superficial respecto los usos.

Figura 37. Comportamiento de $N-NO_3^-$ (mg/L) respecto a los usos.

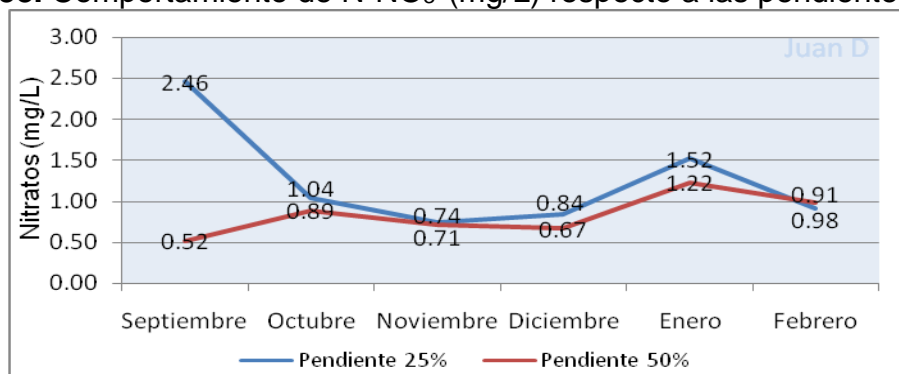


Fuente: Autor.

El agroecosistema de papa reporto mayor cantidad de arrastre de nitratos con un promedio de 1,22mg/L con respecto a los 0,86mg/L que se encontraron para el agroecosistema de pastura. Se esperaba que la diferencia entre agroecosistemas fuera mayor debido a que los nitratos fueron agregados como fertilizante al agroecosistema de papa, pero entre los meses de septiembre y octubre se evidencio una significativa disminución debido posiblemente a la extracción del nutriente por parte del cultivo y al lavado por erosión ya que los nitratos presentan alta solubilidad; llegando algunas veces a tener valores inferiores a los del agroecosistema de pastura como se ve para los meses de diciembre y enero en la figura 37,

9.6.2.2 Análisis de $N-NO_3^-$ en escorrentía superficial respecto a las pendientes.

Figura 38. Comportamiento de $N-NO_3^-$ (mg/L) respecto a las pendientes.



Fuente: Autor.

La pendiente de 25% presento un promedio de 1.25 mg/L siendo superior al 0.83 mg/L encontrado para la pendiente de 50%, demostrando una mayor presencia de nitratos en la pendiente de menor inclinación. La grafica 38 mostró mayor cantidad de nitratos, debido a que la escorrentía superficial en las zonas de mayor inclinación transportan suelo y nitratos hacia zonas

inferiores, además en la pendiente de 50% se presenta una erosión más severa, por lo tanto cuando se realizaron la simulaciones de lluvia, el suelo ya había sufrido una serie de lavados, producto de las constantes lluvias que se presentan en la zona, este transporte de nutrientes en la pendiente de 50% termina depositado en la pendiente menos inclinada dando como resultado una mayor concentración de nutrientes.

10 EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

Una evaluación de impacto ambiental trata de identificar y valorar los posibles impactos ambientales generados en un ecosistema natural y/o transformado por actividades antrópicas, esta evaluación se convierte en una herramienta muy importante para conocer las acciones más impactantes dentro de un ecosistema y como evitarlas o mitigarlas con el fin de conservar la estructura y funcionamiento de dicho ecosistema.

El análisis que se desarrolla a continuación relaciona las actividades antrópicas más impactantes dentro de los dos agroecosistemas con las posibles alteraciones en sus componentes vistas desde el punto de vista del investigador. Para dicho análisis se utilizó el método de matriz de FEARO (Oficina Federal de Revisión y Análisis Ambientales), el cual permite realizar un análisis cualitativo de como los agroecosistemas de papa y pastura esta ejerciendo presión sobre componentes de un ecosistema paramuno.

10.1 Matriz de FEARO para el Agroecosistema de pastura

Figura 39. Ganadería presente en la zona



Fuente: Autor y Muñoz (2007).

Agua

Dentro del área de estudio y sus alrededores se encuentran varias actividades antrópicas que de una manera directa o indirecta están influyendo sobre el recurso hídrico, en primera instancia se nota los cambios de cobertura vegetal nativa (paramuna) a agroecosistemas de pastura que trae consigo la implementación de semillas (pastos foráneos) no propias del sistema y de agroquímicos (figura 39).

Durante el transcurso de la investigación se vio el drenado de cuerpos de agua o desviación de algunas quebradas para su posterior uso con fines de consumo

(acueductos veredales) y/o productivos en agroecosistemas de pastura para ganado básicamente lechero (algunas veces sin rote), generando problemas de erosión por aumentos en la escorrentía superficial.

Además de la interrupción del curso natural de las quebradas, también se transforma las zonas riparias, generando pérdida de nichos y demás comunidades asociadas al recurso hídrico, además de aumentar la implementación de agroecosistemas de pastura dando libre acceso de los animales al recurso, acarreando aumentos en los niveles de sedimentación, contaminación y microorganismos, para este último Ruiz (2009) encontró más de 600 unidades formadoras de colonias (UFC/100ml) de coliformes totales producto de la antropización del ecosistema, también se evidenciaron una mayor presencia de algas en los cuerpos de agua, producto de la alteración de las características físicas, química y biológicas.

En el reconocimiento de la zona se encontraron unas zanjas de más de un metro de profundidad y de alrededor de un metro de ancho que se utilizan según los pobladores como un cerco para el ganado, estas zanjas también drenan las turberas y generan un impacto muy negativo para los ecosistemas paramunos (figura 40).

Figura 40. Alteración de ecosistemas paramunos.



Fuente: Autor.

Suelo

En la zona de estudio los agroecosistemas de pastura se desarrollan a pequeña y algunas veces a mediana escala, sin embargo estas actividades ocasionan grandes alteraciones sobre el recurso suelo, como susceptibilidad a la erosión y disminución en la fertilidad (ver figuras 29 y 32), principalmente por el reemplazo de coberturas nativas a zonas productivas, sin abonos, con poca protección para el suelo, exponiéndolo a factores medio ambientales, con problemas como la erosión hídrica y eólica, generando cambios en las propiedades físicas (ver figura 29), químicas y biológicas disminuyendo la capacidad de producción del suelo para poder sostener un agroecosistema de pastura.

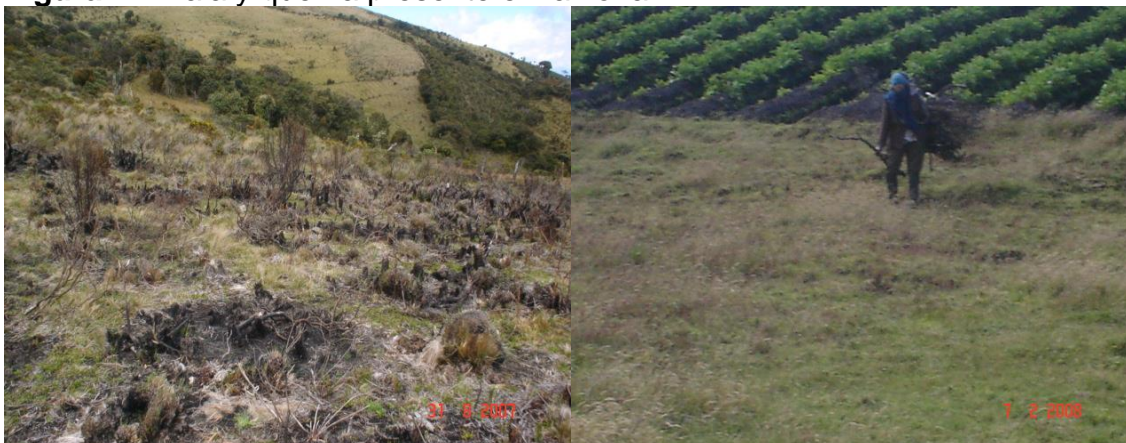
También se encontraron degradaciones químicas como los medios niveles de aluminio intercambiable (1.65 meq/100g), donde según Muñoz (1985) producen un efecto sobre las plantas moderadamente tóxico, la acidificación de los suelos (pH de 5.0) reportada altera significativamente la disponibilidad y solubilidad de los nutrientes (nitratos y fosfatos), por ende sus ciclos (nitrógeno y fósforo) en el paso por el suelo; la escorrentía superficial además se encarga de trasladar los nutrientes hacia los cuerpos de agua más cercanos, en las partes inferiores de las pendientes como lagunas y quebradas, acarreado problemas como eutrofización y colmatación.

En la zona de estudio determinada como zona de amortiguación paramuna se notan sectores con erosión debido al efecto de pata de vaca, por el constante pisoteo del ganado deteriora el primer horizonte del suelo facilitando su arrastre por escorrentía superficial. También se aumenta la compactación y endurecimiento de los suelos, demostrado en los bajos resultados de permeabilidad (0,81 cm/h) y aumento de la escorrentía superficial que a pesar de su textura franco arenosa con un 75% de arena y su alta porosidad (76%) lo que indica un posible problema en la interconexión de sus poros disminuyendo la capacidad de retención de agua típico de los suelos de páramo.

Flora y fauna

La tala, la quema (ver figura 41) y el drenado de cuerpos de agua presentes por efectos de la expansión de la frontera agrícola hacia zonas netamente paramunas con el fin de introducir ganado (ver figura 40), se nota un claro reemplazo y transformación de la cobertura vegetal nativa a especies foráneas y/o oportunistas las cuales modifican la función del ecosistema de alta montaña como lo es la de retención y regulación de agua típica del páramo. También se ve un aumento de la fragmentación de parches de bosque; todo esto ocasiona el traslado y pérdida de hábitats y nichos endémicos disminuyendo de manera significativa la biodiversidad por una parte se afectan las especies vegetales por la interrupción de los procesos sucesionales y por otra el desplazamiento de las especies animales ya que hay especies en vía de extinción como el Oso de anteojos, el Cóndor y la Danta que buscan protección bajo el páramo, ya que es el medio esencial para su supervivencia. Además de otras especies que habitan este ecosistema y se ven afectadas por la alteración de las cadenas tróficas, según Joaquín (2005) para esta zona de estudio en un transcurso de 10 años se han perdido 2144ha de coberturas paramunas.

Figura 41. Tala y quema presente en la zona.



Fuente: Autor.

Aire

Este componente se afecta principalmente por la quema que aumenta en la atmosfera los niveles de CO₂ contribuyendo con los gases de invernadero y el calentamiento global. Otro factor que influye sobre el área de muestreo es la cercanía que tiene a las minas de azufre a cielo abierto lo que permite algunas lluvias acidas para esta zona y por ende la acidificación del medio cercano. En cuanto al ruido se genera principalmente por los medios de transporte (ya que es un sector turístico y una vía obligatoria hacia otros departamentos), maquinarias como tractores empleadas para cultivar y también por las hachas al talar la madera lo que causa un desplazamiento de la fauna generando perdida de nichos y un aumento en la velocidad del viento por ausencia de vegetación.

Población

Se nota una transformación del ecosistema paramuno gracias a la expansión de la frontera agrícola lo que acarrea el establecimiento de comunidades indígenas y campesinas en este territorio, incrementando tanto la contaminación como la demanda de recursos naturales para sus actividades tales como el desarrollo de sistemas productivos, llevando a la población a utilizar lugares protegidos de conservación como espacios de producción alterando la unidades de paisaje y el ecosistema paramuno en general.

Otro punto favorable es que los agroecosistemas de pastura son una fuente de empleo e ingresos para la comunidad gracias a la comercialización productos lácteos a nivel local por lo mercados en la zona y a nivel regional por ser un lugar turístico y obligado hacia otros departamentos.

Figura 42. Matriz de FEARO para Agroecosistema de pastura.

MATRIZ DE FEARO			ACTIVIDAD										
			AGROECOSISTEMA DE PASTURA										
I + *	NO HAY IMPACTO		PROCESOS	Tala	Quemas	Expansión Agro. Past.	Adecuación Agra. Past.	Tráfico, transporte, turis	Abrevaderos	Agroecos. de pastura	Accesibilidad	Incremento act. Económic	
	FALTA INFORMACIÓN												
	EFECTO SIGNIFICATIVO ADVERSO												
	EFECTO ADVERSO												
	EFECTO SIGNIFICATIVO BENÉFICO												
	EFECTO BENÉFICO												
SUBSISTEMAS	FACTORES	POSIBLES IMPACTOS											
INERTE	AIRE	Ruido			I								
		Incremento en la velocidad del viento											
		Emisión de gases (CO2) partículas											
	AGUA	Cambios en escorrentías y nivel freático											
		Incremento en la sedimentación											
		Alteración de las características Físicas, químicas y biológicas											
		Alteración de zonas riparianas											
	SUELO	Alteración de las comunidades acuáticas (Flora y Fauna)											
		Alteración del Horizontes A											
		Compactación del suelo											
		Alteración de las características Físicas, químicas y biológicas											
		Aumento de la escorrentía superficial											
Pérdida de nutrientes (fertilidad)													
BIÓTICO	FLORA	Susceptibilidad a la erosión											
		Fragmentación de bosques											
		Transformación de cobertura vegetal											
		Perdida de hábitats y nichos											
		Variación de humead y evapotranspiración											
	FAUNA	Alteración del proceso sucesional											
		Modificación en la diversidad vegetal											
		Desplazamiento de especies											
		Pérdida de Hábitat y nichos											
		Modificación de relaciones inter-intra específicas											
PERCEPTUAL	PAISAJE	Reemplazo o aparición de especies oportunistas											
		Pérdida de especies nativas y/o endémicas											
POBLACIÓN Y ACTIVIDADES	POBLACIÓN	Alteración del Patrón visual (Parches según usos)											
		Pérdida de la calidad escénica (Cambio en el uso del suelo)											
		Alteración del paisaje											
		Apropiación de los recursos											
	ECONOMÍA	Contaminación											
		Aumento de áreas ocupadas (Transformadas)											
		Mejora de ingresos											
		Empleo											
ECONOMÍA	Mayor producción												
	Potenciamiento de la comercialización												

Fuente: Autor.

10.2 Matriz de FEARO para el agroecosistema de papa

Figura 43. Agroecosistema de papa.



Fuente: Autor.

Agua

Los agroecosistemas de papa (figura 43) son los sistemas más sobresalientes para la zona de estudio y se presentan como uno de los principales contaminantes del recurso hídrico, inicialmente cuando se vuelca el suelo en la preparación del cultivo este queda expuesto a las variables medioambientales como la lluvia, consecuentemente por escorrentía superficial se crea un masivo movimiento de sedimentos y nutrientes incluyendo los abonos que se utilizan (10-30-10, ver figura 44) hacia las partes más bajas en este caso hacia cuerpos de agua cercanos colmatándolas y alterando sus propiedades físicas y químicas, además de crear ambientes eutróficos con influencia directa sobre los componentes biológicos como el aumento de algas, también se notó una alteración de las zonas riparianas principales barreras naturales del recurso hídrico.

Figura 44. Abono utilizado en la zona de estudio para iniciar una siembra

A NOMBRE DE ABONOS COLOMBIANOS S.A.		
COMPOSICIÓN GARANTIZADA		
Nitrógeno Total	(N)	10,0%
Nitrógeno Amoniacal	(N)	6,87%
Nitrógeno Nítrico	(N)	3,13%
Fósforo Asimilable	(P ₂ O ₅)	20,0%
Potasio Soluble en Agua	(K ₂ O)	20,0%
Calcio	(CaO)	1,0%
Humedad Máxima		

"Para la venta y aplicación de este fertilizante, es recomendable la prescripción de un Ingeniero Agrónomo con base en el análisis de suelos o del tejido foliar"

PESO NETO 50 Kg 27-9-2007

Fuente: Autor.

Suelo

La ampliación de las fronteras agrícolas se convierte un factor influyente en la alteración del suelo, empezando por la tala y quema de los bosques endémicos transformándolos en sistemas productivos donde se elimina totalmente la cobertura vegetal exponiendo el suelo a factores medio ambientales.

En la zona de estudio los pobladores practican la agricultura tradicional y en menor escala tecnificada por la utilización de agro-insumos y plaguicidas para el mejoramiento de las producción. Teniendo en cuenta la gran presencia de precipitaciones de la zona (ver figura 14) lo cual puede acarrear inundaciones para sus cultivos en tiempos de intensas lluvias, los agricultores siembran sus eras en sentidos de la pendiente, (ver figura 18) con pendientes entre 25 y 50% ocasionando un aumento de los procesos erosivos, pérdida de materia orgánica, nutrientes y demás elementos involucrados en la fertilidad del suelo. Otro factor que altera los horizontes del suelo es la preparación del mismo para ser cultivado, donde por medio de elementos de labranza o maquinaria el suelo se voltea favoreciendo el taponamiento y las desconexión de sus poros que a pesar de tener una buena porosidad (65%), la compactación baja los niveles de permeabilidad (0.28 cm/h) alterando su composición físico-química por pérdida de elementos necesarios para el mantenimiento de la estabilidad estructural como es demostrado en la presente investigación, aumentado la acidez de los suelos (pH de 4.81) y el aluminio intercambiable (1,9 meq/100g) lo cual disminuye la disponibilidad de los nutrientes facilitando su lavado por escorrentía superficial o su adsorción en la fase coloidal, además de producir toxicidades para los cultivos que en el caso de investigación es moderado (Muñoz, 1985) . Por información de la comunidad los suelos en pendientes pronunciadas (mayores a 25%) son cultivables una vez en 5 años aprox. por lo tanto se hace necesario la expansión de la frontera agrícola hacia zonas netamente paramunas, ya que es una necesidad esencial para la supervivencia de los agricultores de la zona.

Flora y fauna

El reemplazo de la cobertura vegetal nativa por un suelo totalmente desnudo es el principal agravante para la pérdida de diversidad en la zona, ya que los agroecosistemas de papa no permiten ningún tipo de competencia por lo tanto es necesario hacer una limpieza constante, esto ocasiona pérdida de nichos y hábitats, además de aumentar los procesos de fragmentación interrumpiendo las cadenas tróficas y retrasando los procesos sucesionales típicos de estos ecosistemas de alta montaña manteniéndolos en un punto de baja diversidad (monocultivo de papa).

La erosión que acarrea acidez para los suelos demostrado en esta investigación es un limitante para flora incluso de los agroecosistemas de papa por la escases de nutrientes favoreciendo manchas y plagas a las plantas por la falta defensas frente a patógenos del ambiente (ver figura 45), lo cual da pie para que organismos oportunistas y/o foráneos puedan establecerse en esta zona, como ejemplo el gran numero de helechos que empiezan a aparecer

luego de las cosechas típicos de suelos ácidos. Los constantes movimientos de tierra, la adición de cal, de abonos y luego la acides por erosión junto con la compactación también son un serio limitante para la vida de organismos edáficos los cuales se encontraron en mayor numero para los agroecosistemas de pastura. La expansión agrícola obliga a la perdida y traslado de fauna y flora hacia otros sectores del sistema paramuno.

Figura 45. Algunas problemas presentes en el agroecosistemas de papa



Fuente: Autor.

Aire

Este componente se afecta principalmente por la quema aunque es importante notar que fueron muy pocas la que se presentaron durante transcurso de la investigación, la quema altera los procesos de transformación de los nutrientes al volatilizarlos y al no haber cobertura vegetal se da un incremento en la velocidad del viento creando mayor impacto por erosión eólica con el transporte partículas y suelo en el aire. Otro actor que influye son las minas de azufre a cielo abierto permitiendo algunas lluvias acidas en acidificando el medioambiente. En cuanto al ruido y los gases se presentan principalmente por los medios de transporte, algunas maquinarias como tractores empleadas para cultivar y también por las hachas al talar la madera, Pilimbalá es una zona turística y el camino hacia el volcán Puracé pasa por la zona de muestreo generando también ruido y algunos desechos plásticos por parte de los turistas todo la anterior causa un desplazamiento de la fauna generando perdida de nichos.

Población

Se presentan transformaciones del ecosistema paramuno debido a la expansión de la frontera agrícola y pecuaria, con reemplazo de la cobertura vegetal nativa permitiendo el aumento de los espacios de producción agrícola alterando las unidades de paisaje y el ecosistema en general (figura 49). También gracias al nuevo establecimiento de parcelas agrícolas se da un incremento de la demanda de los recursos naturales y también de residuos,

como ejemplo la utilización de agroquímicos y plaguicidas los cuales terminan en los cuerpos de agua alterando su calidad para el consumo humano acarreando enfermedades para los pobladores de la zona por la eutrofización y la presencia de coliformes en el recurso hídrico.

Un punto favorable es que los agroecosistemas de papa son una fuente de ingresos para la comunidad gracias a que el Departamento del Cauca es uno de los mayores productores de papa a nivel nacional lo que genera un gran comercio a nivel local y regional y con ello una oportunidad laboral para sus habitantes. La sobre explotación de los recursos llevan a un deterioro de los mismos algunas veces de forma irreversible haciendo obligatoria la expansión agrícola (figura 46) y con ella problemas como la tala, la quema y el drenado de cuerpos de agua, minimizando las funciones reales del paramo como regulador de agua.

Figura 46. Expansión de la frontera agrícola.



Fuente: Autor.

Figura 47. Matriz de FEARO para el Agroecosistema de papa

MATRIZ DE FEARO			ACTIVIDAD										
			AGROECOSISTEMA DE PAPA										
Efecto	Impacto		PROCESOS	Tala	Quemas	Expansión de Agro. Papa.	Preparación del suelo	Tráfico, transporte, turis.	Exposición de suelos	Agroquímicos	Accesibilidad	Incremento act Económica	
	NO HAY IMPACTO	FALTA INFORMACIÓN											
	EFFECTO SIGNIFICATIVO ADVERSO	EFFECTO ADVERSO											
	EFFECTO SIGNIFICATIVO BENÉFICO	EFFECTO BENÉFICO											
SUBSISTEMAS	FACTORES	POSIBLES IMPACTOS											
INERTE	AIRE	Ruido											
		Emisión de gases y partículas											
		Incremento en la velocidad del viento											
	AGUA	Cambios en escorrentías y nivel freático											
		Incremento en la sedimentación y turbiedad											
		Alteración de las características Físicas, químicas y biológicas											
		Cambios en las zonas riparianas											
		Alteración de las comunidades acuáticas (Flora y Fauna)											
	SUELO	Alteración del Horizontes A											
		Compactación del suelo											
		Aumento de la escorrentía superficial (erosión)											
		Alteración de las características Físicas, químicas y biológicas											
Variación en la productividad													
BIÓTICO	FLORA	Pérdida de suelo y nutrientes (fertilidad)											
		Transformación de cobertura vegetal											
		Fragmentación de bosques											
		Perdida de hábitats y nichos											
		Variación de humeada y evapotranspiración											
	FAUNA	Alteración del proceso sucesional											
		Modificación en la diversidad vegetal											
		Desplazamiento de especies											
		Pérdida de Hábitat y nichos											
		Modificación de relaciones inter-intra específicas											
		Reemplazo o aparición de especies oportunistas											
		Pérdida de especies nativas y/o endémicas											
PERCEPTUAL	PAISAJE	Alteración del Patrón visual (Parches según usos)											
		Pérdida de la calidad escénica (Cambio en el uso del suelo)											
POBLACIÓN Y ACTIVIDADES	POBLACIÓN	Alteración del paisaje											
		Empleo	*		*	*	*				+	+	
		Aumento de áreas ocupadas (Transformadas)										*	
		Mejora de ingresos	*		*	*	*					+	+
		Contaminación											
	ECONOMÍA	Apropiación de los recursos	*	*	*	*	*					+	+
		Mayor producción	*	*	*	*	*		*			+	+
		Potenciamiento de la comercialización									+	+	

Fuente: Autor.

11 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN

Para obtener el mapa de susceptibilidad a la erosión para el área de estudio dentro de la microcuenca del río San Francisco (figura 49) se realizó un modelamiento con las coberturas vegetales de la zona teniendo en cuenta los cambios de uso de suelo, las pendientes, los principales tributarios y la infraestructura del área (ver figura 48). Lo anterior con el fin de comparar cada uno de los dos agroecosistemas (papa y pastura); de tal forma que fue posible interpretar las zonas más susceptibles a los procesos erosivos mediante un polígono (morado) que las identifico (ver figura 50).

Respecto a las pendientes el software ArcView 3.3 indicaba la medición de pendientes en grados ($^{\circ}$), por esta razón fue necesario realizar una conversión a teniendo en cuenta que el 100% es 90° , dando como resultado para la pendiente de 50% equivale a 45° y para 25% es igual a 22.5° , lo anterior hizo posible ubicar las pendientes en rangos de pendiente en quedando la pendiente de 50% en la rango de 30 a 50° (amarillo) y la pendiente de 25% en el rango de 20 a 30° (verde claro).

Ruiz (2009) relaciono dos imágenes Landsat para los años 1989 y 1999, donde se identifico las diferencias (tabla 11) en las coberturas, principalmente dadas por los cambios de uso de suelo, en la microcuenca del río San Francisco.

Tabla 11. Cambios de cobertura por uso del suelo.

Cobertura	1989 Área (Ha)	1999 Área (Ha)	% cambio cobertura	Cambio medio anual (ha/año)
Área Construida	6,27	9,90	57,89	0,36
Bosque	4.820,90	4.038,29	-16,23	-78,26
Cultivos	103,99	1.070,68	929,6	96,67
Páramo	5.973,14	5.576,25	-6,64	-39,69
Pastos	2.401,92	3.281,65	36,63	87,97

En la anterior tabla se identifica una disminución del área perteneciente a las coberturas vegetales naturales (bosque y paramo) y un incremento significativo de las zonas intervenidas (área construida, cultivos y pastos) como es el caso de los cultivos que mostraron un incremento del 929,6% en una temporalidad de diez años evidenciando el gran impacto de la intervención antrópica sobre las coberturas vegetales paramunas; por lo tanto es posible afirmar que existe un cambio y una presión constante del bosque al interior del PNNP por las zonas de producción agropecuaria en la zona de amortiguación o adyacente.

En síntesis las diferentes transformaciones en el uso del suelo están directamente relacionadas con la pérdida de vegetación endémica, generando serios procesos de degradación de los suelos disminuyendo los niveles de productividad.

Figura 48. Mapa de pendientes.

Mapa de Pendientes

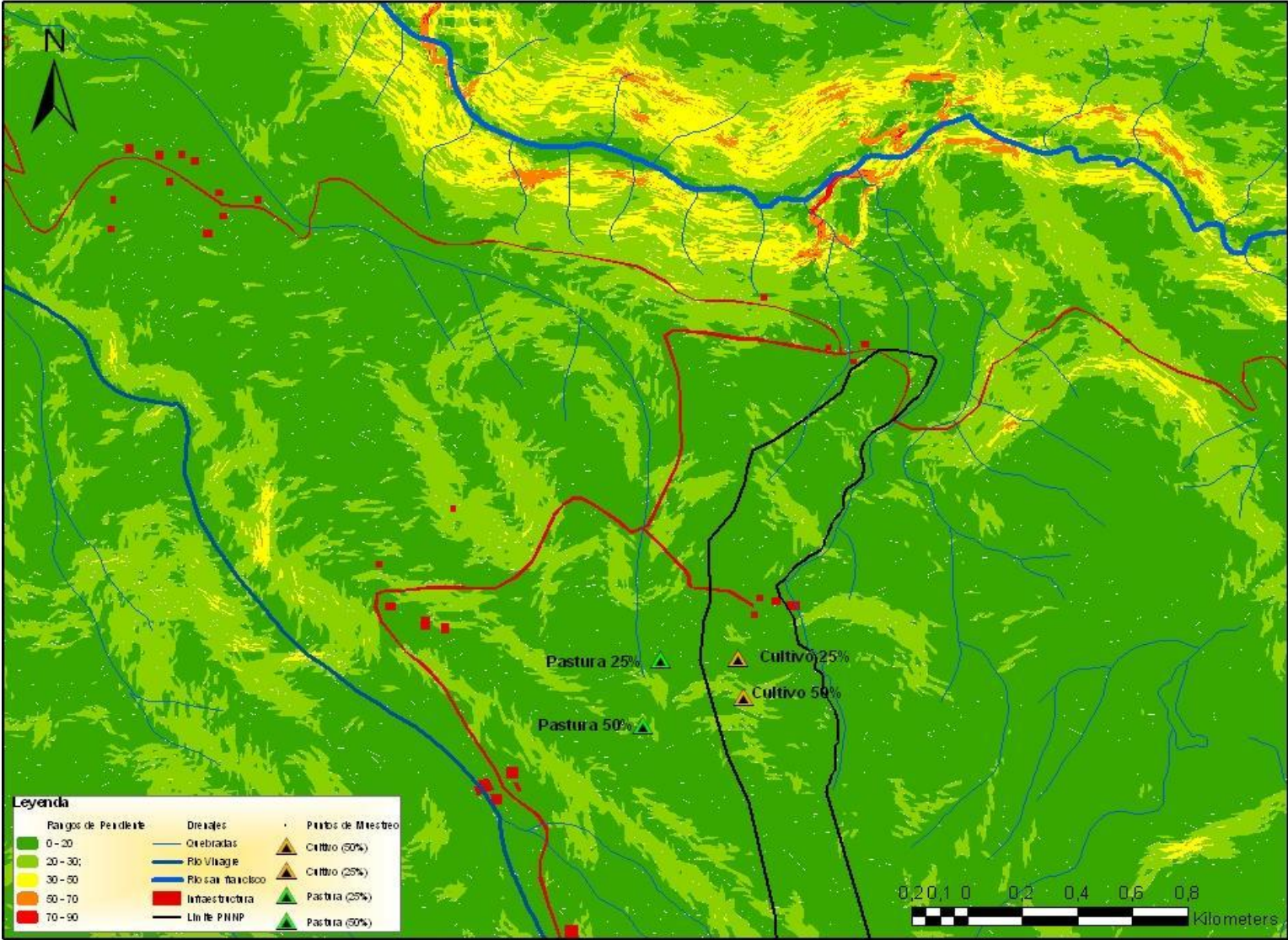


Figura 49. Mapa de susceptibilidad a la erosión.

Mapa de susceptibilidad a la erosión

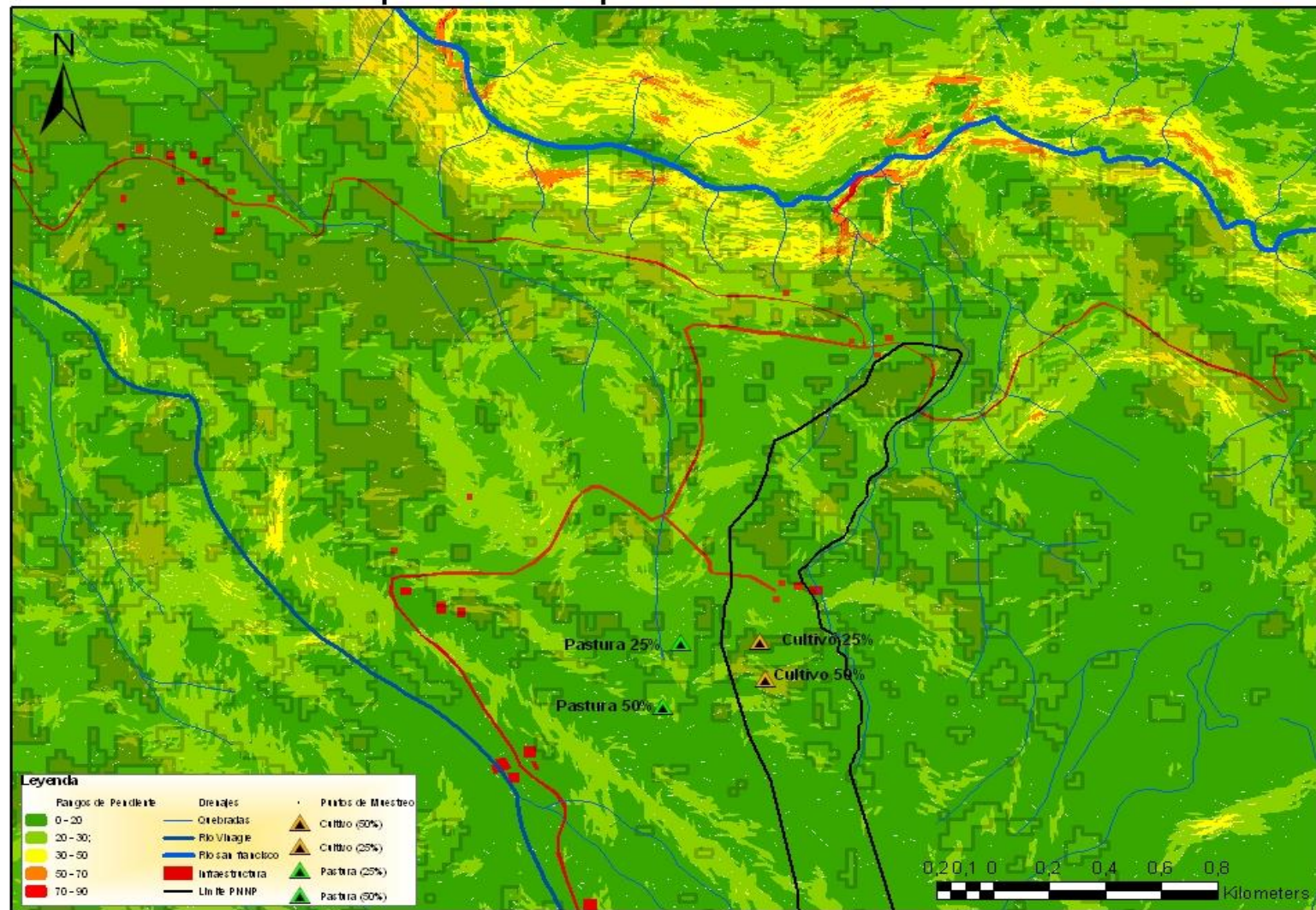
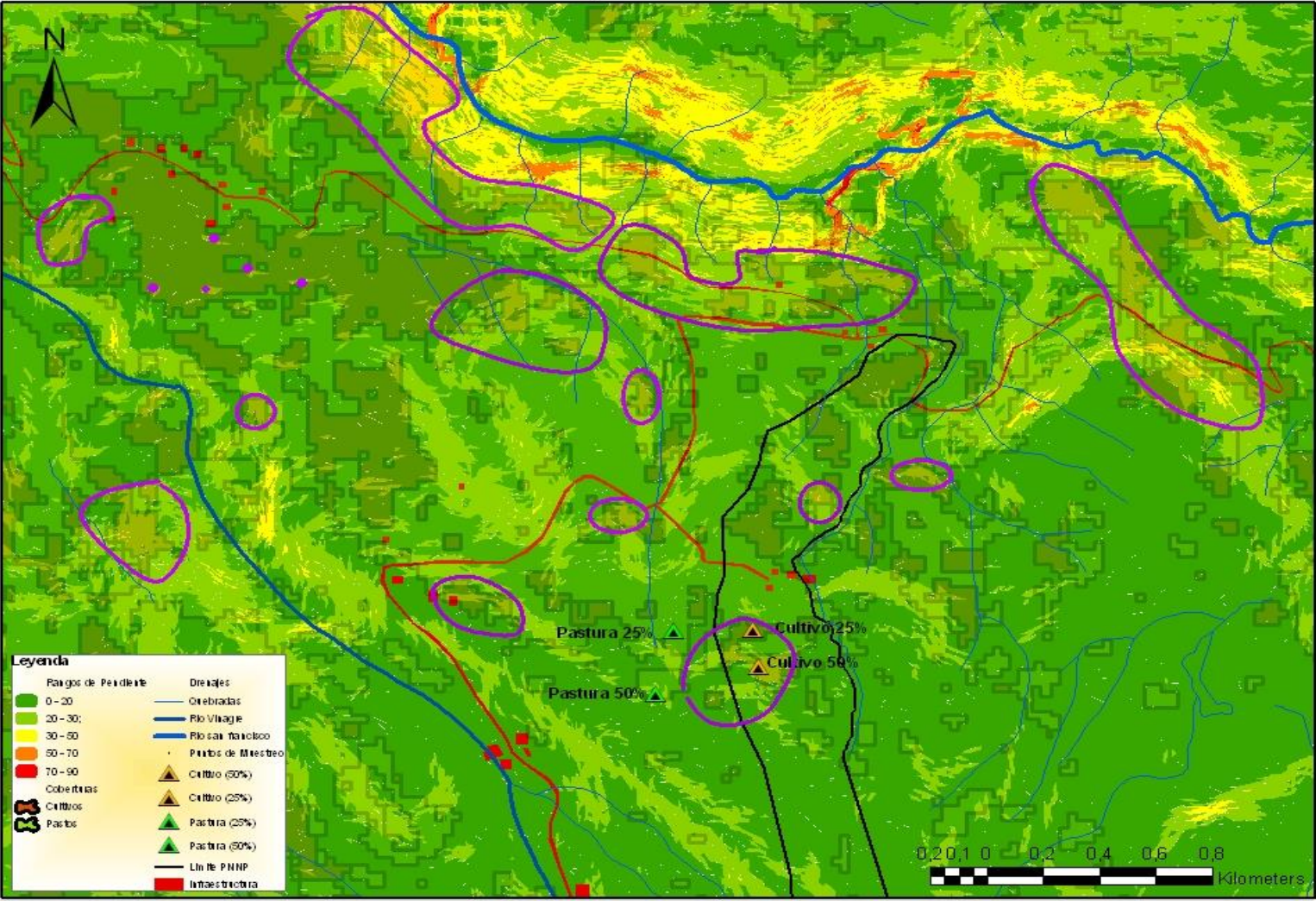


Figura 50. Mapa de susceptibilidad a la erosión con las áreas más vulnerables demarcadas.

Mapa de susceptibilidad a la erosión



Con el anterior mapa se trata de mostrar el riesgo existente a la degradación por erosión en la zona de muestreo y a su alrededor, donde se puede deducir que la zona presenta una extensa superficie con alta susceptibilidad a la erosión (polígonos morados), en especial las zonas cercanas al río San Francisco el cual por hacer parte de un accidente orográfico presenta pendientes bien pronunciadas donde es posible encontrar agroecosistemas de papa los cuales según esta investigación aumentan de una forma considerable la erosión de los suelos altoandinos.

Específicamente para la zona de muestreo se evidencia algunas zonas con altos riesgos a la erosión como la ubicación de los agroecosistemas de papa donde se combina los suelos sin protección de la cobertura vegetal y pendientes mayores a 25%.

12 CONCLUSIONES

- El minisimulador de lluvia se adaptó satisfactoriamente a las condiciones de precipitación presentes en área de investigación permitiendo realizar un estudio de susceptibilidad a la erosión y arrastre de nutrientes.
- Noviembre fue el mes de mayor suelo erodado (7,52g) y escorrentía superficial (1959,58ml) para los dos agroecosistemas, este mes presentó los volúmenes más bajos de infiltración (5436,25ml) y mostró un porcentaje alto de humedad (83%) indicando saturación de los suelos, concordando con el mes de mayores precipitaciones (300 a 500mm) del año. (ver figura 14).
- Septiembre presentó la menor cantidad de precipitación (50 a 100mm), esto concuerda con los valores más bajos de escorrentía superficial (670,41ml) y suelo erodado (1,35g) de la investigación para los dos agroecosistemas y también con los valores más altos de infiltración (7121,25ml).
- El agroecosistema de papa presentó los valores más altos de suelo erodado (13,96g) y escorrentía superficial (2305,83ml), también el valor más bajo de infiltración (5092,5ml) en comparación con el agroecosistema de pastura, esto debido principalmente al manejo del suelo y al impacto directo de las gotas de lluvia. En cuanto a las medidas utilizadas internacionalmente para el arrastre de suelo se estimó un promedio de 0.32 toneladas por hectárea para una lluvia de 100mmh^{-1}
- En cuanto al agroecosistema de pastura se evidenció como la cobertura vegetal tiene un efecto protector en el suelo evitando procesos de erosión severos, aumentando la infiltración (7171,66ml) y reduciendo las laminas de escorrentía superficial además de amortiguar el impacto directo de las gotas de lluvia manteniendo unos niveles bajos de suelo erodado (0,29g). Según las medidas internacionales en una hectárea y con una intensidad de lluvia de 100mmh^{-1} se arrastra un promedio de 0.04 toneladas de suelo.
- Se comprobó que existe una relación directamente proporcional entre la escorrentía superficial y el suelo erodado para una intensidad de lluvia de 100 mm/h, para el agroecosistema de papa se encontró que por cada litro de precipitación se arrastra aproximadamente 3,11g y para el agroecosistema de pastura se arrastra aproximadamente 0.03g.
- El comportamiento de suelo erodado no alcanzó a ser influenciado por las dos pendientes (tabla 5), pero este resultado se pudo dar por los altos coeficientes de variación (pendiente de 50% es 169,6% y la de 25% es 110,9%) producto de la alta variabilidad expresada por los datos de suelo erodado en campo (ver tabla 3). Mostrando para el

agroecosistema de papa una diferencia de 0.53ton por hectárea respecto a sus pendientes y para el agroecosistema de pastura su diferencia fue de 0.05ton.

- La conductividad de la escorrentía superficial fue mayor al inicio porque coincidió con la preparación del suelo para el agroecosistema de papa y la adición de fertilizantes, quedando partículas activas dándole una mayor capacidad conductora a la escorrentía.
- El pH de la escorrentía superficial se mostró básico debido al enclamiento del agroecosistema de papa, después de algunas precipitaciones disminuyó por el lavado de la escorrentía superficial. El agroecosistema de pastura mantuvo una mejor estabilidad gracias a la protección que le brinda la cobertura vegetal.
- Los fosfatos de la escorrentía superficial fueron mayores al inicio (0,098mg/L) por la adición de fertilizantes al agroecosistema de papa y se mantuvieron constantes por fijación y extracción del nutriente por parte del cultivo, el último mes hubo un incremento significativo (0,16mg/L) por la iniciación de un cultivo en la parte superior arrastrando suelo y fosfatos a la zona de muestreo (ver figura 34). El agroecosistema de papa reporto mayor cantidad de fosfatos arrastrados debido a la adición de abonos y a la falta de la protección de la cobertura vegetal.
- Los nitratos en el agroecosistema de papa iniciaron con un valor alto (2,57mg/L) por la adición de fertilizantes, pero tuvo un fuerte decrecimiento (0,96mg/L) por la acidez de los suelos aumentando la solubilidad de este nutriente y facilitando su arrastre por escorrentía superficial. Lo anterior deja en evidencia como la erosión genera una pérdida de nutrientes y fertilidad en los agroecosistemas y más si el manejo no es adecuado.
- Los suelos mostraron altos niveles de arena (75,13 a 85,77%) evidenciando erosión; bajos niveles de arcillas y limos clasificándolos como suelos franco arenosos.
- Los valores promedios de densidad aparente para los dos agroecosistemas fueron bajos (0,82 y 0,87 g/cc) debido a la alta porosidad encontrada (65,38 a 75,74%), materia orgánica (13,82 y 13,63%), humedad (entre 67,73 y 92,11), materiales piroclásticos, y a las actividades antrópicas como la labranza que se realiza para el agroecosistema de papa.
- Los suelos de los agroecosistemas a pesar de mostrar alta porosidad presentaron una baja permeabilidad clasificada como muy lenta a moderadamente lenta debido a la modificación de su estructura, los altos niveles de materia orgánica y humedad generando problemas de geometría e interconexión del sistema poroso,.

- Los suelos presentaron acidez debido a que son suelos de origen volcánico; para el agroecosistema de papa se clasificaron como muy fuertemente ácidos (4,81) donde se noto los efectos del manejo, la adición de fertilizantes, los niveles medios de aluminio y materia orgánica, además de la erosión a pesar del encalamiento que se realiza al inicio del cultivo.
- El alto grado de acidez de los suelos lo confirman los niveles elevados de aluminio intercambiable para los dos agroecosistemas (entre 1,6 y 1,9), el agroecosistema de papa a pesar del encalamiento presento el valor más alto de aluminio intercambiable por acción del lavado de los suelos por las altas precipitaciones de la zona.
- El porcentaje de nitrógeno para el agroecosistema de papa fue de 0,59% este alto nivel se presenta por la entrada de agentes externos como fertilizantes y cal. El agroecosistema de pastura con un 0,67% presento mayor concentración ya que permite diferentes formas de fijación biológica por presencia de la cobertura vegetal y de microorganismos, además forma una barrera que evita que la erosión sea más severa.
- La investigación mostró bajos valores de este nutriente para los dos agroecosistemas, debido a la fuerte acidez de estos suelos permitiendo la fijación de este nutriente en su fase coloidal.
- La matriz de evaluación ambiental de FEARO permitió encontrar para los dos agroecosistemas, que las acciones más impactantes sobre el recurso suelo son: el aumento de la escorrentía superficial (erosión), variación en la productividad por perdida de fertilidad, pérdida de suelo y nutrientes, alteración de las características físicas, químicas y biológicas.
- El cultivar en sentido de la pendiente favorece significativamente el arrastre de los suelos y nutrientes, por esto es necesario cambiar el sentido de la eras, las cuales deben ir en sentido diagonal de la curvas de nivel de tal forma que no se inunden los cultivos y la erosión se vea limitada.
- Es necesario crear propuestas para la zona encaminadas en agricultura de la conservación teniendo en cuenta los tipos de suelos, el clima, las pendientes y la cultura de indígenas, donde se profundice en la susceptibilidad de los suelos a la erosión, con un compromiso de protección al medio ambiente evitando terminar los recursos para las generaciones venideras.

13 RECOMENDACIONES

Es necesario realizar los análisis físicos y químicos del suelo no solo al final de la investigación sino también al inicio y durante el transcurso de la misma, con el fin de obtener resultados más confiables.

Realizar análisis biológicos de suelo (edafofauna y microbiológico) para comparar con los resultados fisicoquímicos y encontrar indicadores de tipo biológicos que muestren los cambios del ecosistema frente a las actividades antrópicas y su importancia en la productividad de los agroecosistemas.

Cuantificar e identificar los nutrientes dentro de las plantas para determinar la ausencia o presencia de estos y sus posibles efectos bien sea positivos o negativos en las plantas y su productividad.

Además de realizar el análisis de arrastre de nutrientes en la escorrentía superficial, también se debe realizar el análisis en los sedimentos de suelo cuantificando el arrastre de nutrientes en el suelo.

Pretender que las investigaciones a través del minisimulador de lluvia continúen como una herramienta confiable para investigar procesos de arrastre de suelo, nutrientes y demás características que involucren la erosión.

Dar a conocer los resultados de este trabajo a la comunidad involucrada mediante talleres, ponencias y demás medios de información, para que tengan un conocimiento de la problemática en la zona de estudio, además tomar esta investigación como una herramienta para la gestión de medidas de conservación de los suelos, garantizando la productividad de los suelos para generaciones futuras.

El problema de la erosión para la zona de estudio no es preocupante, no obstante es aconsejable empezar por identificar por dónde podrían aparecer los problemas de erosión, especialmente cuando se hacen los cambios de uso de suelo, de tal forma que se empiece a utilizar medidas de mitigación como hacer las eras en sentido diagonal a las curvas de nivel.

14 BIBLIOGRAFÍA

ALTIERI, A. M. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. Montevideo: nordan-comunidad. 1999. p. 43-66

APHA, AWWA, y WPCF. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid: Diaz de Santos; 1992.

BARCO, R. D. Manual para el control de la erosión. Manizales: Editar, 1998.

BRAVO, R. I., GIRALDO R. E. *Manual de prácticas de química agrícola: Análisis de suelos*. Popayán: Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación. Departamento de Química; 1998.

BUBENZER, G.D. Rainfall characteristics important for simulation. In proceeding of the rainfall simulator workshop. Tucson, Arizona. Department of agriculture science and education administration agricultural reviews and manuals. 1979.

CAMPO, J.M. *Evaluación de la susceptibilidad a la erosión hídrica, del contenido de materia orgánica y de las propiedades físicas, en un oxic dystrustept bajo seis historias de uso, en Pescador, Cauca, mediante el uso de un minisimulador de lluvia*. Palmira: Centro internacional de agricultura tropical; 2004.

CLAVER, I.F. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología*. Madrid. Centro de estudios de ordenación de territorio y medio ambiente, 1981.

COBO, L. *Diseño, construcción y evaluación de un mini simulador portátil de lluvia para estudios de susceptibilidad a erosión en laderas*. Palmira: Universidad del Valle. Facultad de ingeniería; 1998.

CRC. Corporacion autonoma regional del cauca. *Agenda ambiental para el municipio de Purace, departamento del Cauca*; 2000.

ELLISON, W. D. Rainfall applicator. Madison: Eng; 1944. p. 22.

EOT. *Esquema de ordenamiento territorial. Municipio de Purace: Componente General*. Popayán, Cauca; 2000.

FLECHER G. A., LOMBANA C. A. *Estudio general de suelos de la región nororiental del departamento del Cauca*. Bogota, D.C: Instituto geográfico "Agustín Codazzi"; 1982.

HOFSTEDE R. *El impacto de las actividades humanas sobre el paramo*. Quito; 2003.

—. *El manejo del páramo como ecosistema estratégico. historia, realidades y perspectivas: proyecto páramo*. Quito: Abya Yala; 2001.

—. *The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations. In colombian paramo grasslands. EN: Effects of burning and grazing on a colombian paramo ecosystem*. University of Amsterdam; 1995.

HOLDRIDGE, L. *Ecología basada en zona de vida*. San José: IICA; 1979

HUDSON, N. *Conservacion del suelo*. Barcelona: Reverte; 1982.

—. *The Factors Determinig The Extent of Soil Erosion*. 1975.

IDEAM. Sistema Nacional Ambiental. Adscrito al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. 2001.

ICA. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Manual de asistencia técnica N° 25. 1992. 64p.

ICONTEC. Instituto colombiano de normas técnicas y certificados. Compendio de normas técnicas Colombianas sobre documentación: Presentación y elaboración de tesis de grado y trabajos científicos. Bogotá. 2007.

JARAMILLO, D. F., *El recurso suelo y la competitividad del sector agrario colombiano*. Medellín. Universidad nacional de Colombia. 2004

JOAQUI, S. *Análisis Multitemporal de las coberturas vegetales para Ecotopos Paramunos en el parque nacional natural Puracé utilizando sistemas de información geográfica*. Popayán. Universidad del Cauca. 2005. 104 p.

LEON T. E., *Libro virtual de agricultura sostenible*. Universidad Nacional de Colombia. [Citado 15 nov 2008]. Disponible en Internet: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2007223/lecciones/lect13/lect13_7.html>

MANAHAN, A. E., *introducción a la química ambiental*. Universidad Autonoma de México. México D. F. Reverte ediciones. 2007. 14 p.

MALAGON C. D., PULIDO R. C., LLINAS R. R., CHAMORRO B. C., FERNANDEZ L. J. *Suelos de Colombia origen, evolución, clasificación, distribución y uso*. Santafé de Bogota D. C: Canal Ramírez Antares; 1995.

MARTINEZ J. P. *Estudio Espacio Temporal del Proceso de Fragmentación en la Zona Nor-Oriental del Parque Nacional Natural Puracé, Mediante El Análisis de las Comunidades Vegetales*. Popayán, Cauca: Universidad del Cauca; 2005.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Dirección general de ecosistemas programa para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de la alta montaña colombiana: PARAMOS. 2003.

MENA P., COPPUS R., WOLF J., HOFSTEDE R., LEÓN S. *Una Evaluación Rápida del Estado de Salud de los Páramos en el Ecuador*. Quito; 1999.

MEYER, L.D. Rainfall simulators for soil conservation research, En: LAL, R. Soil erosion research methods. Soil and water conservation. Iowa, U.S.A., 1998.

MONTENEGRO G. H., MALAGON C. D. *Propiedades físicas de los suelos*. Bogota: IGAC, Subdirección de Agricultura; 1990.

MONTOYA M. J., OBANDO F.H. *Adaptación y Calibración de un Simulador de Lluvia Para Estudios de Erosión en Suelos de Ladera*. Volumen 32. Quito: Revista de Suelos Ecuatoriales; 2002.

MORGAN R. P., "Factors influencié erosion" En: *Soil erosion and conservation*, John Wiley & Sons. New York; 1986

MUÑOZ F. A. Evaluación de la susceptibilidad a la erosión en dos tipos de agroecosistemas alto andinos en la cuenca del río Palacé. Popayán: Universidad del Cauca; 2007

MUÑOZ R. *La acidez y el enclamiento de los suelos*. Neiva, Huila. En: memoria del segundo seminario de suelos y fertilización de cultivos. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo y secretaria agropecuaria. 1985.

ÑUSTEZ E. C., SANTOS M., NAVIA L. S., COTES M. J., Evaluación de la fertilización fosfórica foliar y edáfica sobre el rendimiento de la variedad de papa "Diacol Capiro" (*Solanum tuberosum* L.). Bogota, D.C. 2006.

PÉREZ U., LÓPEZ R. Estudio preliminar de la erosión hídrica en un inceptisol de los andes Venezolanos bajo uso agrícola. Mérida: Forest. Venez; (2000)

PODWOJEWSKI P., POULENARD J. La degradación de los suelos de los páramos: *Los Suelos del Páramo*. Serie Páramo 5. Quito; 2000.

PRADO W. L., VEIGA M. Erosión y pérdida de fertilidad del suelo. Deposito de documentos de la FAO. [Citado 20 nov 2008]. Santiago de Chile. 1992. Disponible en Internet: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S06.htm>

RODRIGUEZ O. S., RODRIGUEZ O. E., PAEZ M. L. *Adaptación y aplicación de un simulador de lluvia "Tipo Boquilla" para trabajos de laboratorio y campo en conservación de suelos y agua*. Vol. XVII N° 2. Quito: Revista Suelos Ecuatoriales; 1987.

RUIZ, D. Determinación del impacto ambiental sobre el recurso hídrico para consumo humano generado por el establecimiento de actividades antrópicas en la parte alta de la subcuenca río san francisco, municipio Puracé. Departamento del cauca. Universidad del Cauca; 2009

SMIL, V. *Abonos nitrogenados*. Investigación y Ciencia. Barcelona: Prensa Científica; 1997.

SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y agua para riego. Segunda edición. Bogotá D.C. 2000. p. 119.

STOCKING, M. Erosion and soil productivity: a review. Consultants working Paper N° 1. Roma: FAO; 1984. p.102.

TORRES E. *Evaluación de la susceptibilidad a la erosión y de las características asociadas (infiltración y escorrentía) de dos suelos de ladera en el Dpto. del cauca, mediante un minisimulador de lluvia*. Palmira: Universidad del Valle – Universidad Nacional; 2000.

URRESTI, E., ZEMANATE, A. Evaluación del desplazamiento de nutrientes, arrastre de suelo y efecto sobre los microorganismos por acción de la escorrentía superficial en parcelas permanentes con cobertura en proceso de sucesión natural y suelo desnudo con adición inicial de cal. municipio Popayán, departamento del cauca. Universidad del Cauca; 2009

WILDNER P., Veiga M. *Erosión de suelos en América Latina: Erosión y pérdida de fertilidad del Suelo*. Chile: FAO; 1993.

WISCHMEIER, W. H., (1978). Predicting rainfall erosion losses. *Agriculture Handbook* N° 537. Sci. And Educ. Admin., U. S. Dept. Agr., Washington.

WISCHMEIER, W., D. D. SMITH, and R. E UHLAND., (1958). Evaluation of factors in the soil-loss equation, *Agricultural Engineering*, 39, 8, 458-462, 474.