

# **Evaluación de la escorrentía y calidad de aguas en áreas de ribera de fuentes hídricas con diferentes usos en Andisoles de la zona media del río Chinchiná**

**Melissa Valencia Ocampo**

Universidad de Caldas  
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento Producción Agropecuaria, Grupo de  
Investigación de Proyección y Producción Agropecuaria (GIPPA)

Manizales, Colombia

2023

# **Evaluación de la escorrentía y calidad de aguas en áreas de ribera de fuentes hídricas con diferentes usos en Andisoles de la zona media del río Chinchiná**

**Melissa Valencia Ocampo**

Trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniera Agrónoma**

Director:

Doctor en suelos, Juan Carlos Montoya Salazar

Grupo de Investigación de Proyección y Producción Agropecuaria (GIPPA)  
Física de suelos

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento Producción Agropecuaria

Manizales, Colombia

2023

## Resumen

Los diferentes usos de suelo afectan la calidad del agua de escorrentía debido a los contaminantes generados en estas áreas; los pesticidas y fertilizantes destinados para la agricultura si no son usados adecuadamente constituyen una amenaza latente de contaminación para las fuentes hídricas cercanas. El objetivo fue evaluar la calidad de agua por medio de la implementación de parcelas de escorrentía en 4 sistemas de uso de suelo con 4 tipos de cobertura (bosque, silvopastoril, pastos y revegetalización natural) en la finca Santuario ubicada en la vereda Enea del municipio de Villamaría, departamento de Caldas en la cuenca media del Río Chinchiná. Se instalaron 8 montajes (2 por cobertura) compuesto por parcelas de escorrentía; el levantamiento de datos se efectuó cada 15 días durante 8 meses, y a las aguas obtenidas de cada parcela se le evaluaron propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas, en los laboratorios de física de suelos y calidad de aguas de la Universidad de Caldas. Los resultados indican que el sistema de bosques mostró el mejor comportamiento en términos de escorrentía con un resultado acumulado de 393 L/ha; en el sistema silvopastoril se obtuvieron los mayores valores de escorrentía superficial acumulada con 15768 L/ha; en cuanto a la calidad del agua, el sistema silvopastoril obtuvo la respuesta más deficiente al no cumplir con la mayoría de los parámetros establecidos; por el contrario, los sistemas de pastos y revegetalización mostraron los mejores resultados en términos de calidad del agua, cumpliendo con la mayoría de parámetros.

**Palabras clave:** Calidad, Escorrentía, Parcelas, Coberturas, Andisoles.

## Abstract

The different land uses affect runoff water quality due to the pollutants generated in these areas; pesticides and fertilizers intended for agriculture, if not used properly, constitute a latent threat of contamination to nearby water sources. The objective was to evaluate water quality through the implementation of runoff plots in 4 land use systems with 4 types of cover (forest, silvopastoral, pasture and natural revegetation) in the Santuario farm located in the Enea hamlet of the municipality of Villamaría, department of Caldas in the middle basin of the Chinchiná River. Eight assemblies (two per cover) composed of runoff plots were installed; data collection was carried out every 15 days during 8 months, and the water obtained from each plot was evaluated for physical, chemical and physical-chemical properties in the soil physics and water quality laboratories of the University of Caldas. The results indicate that the forest system showed the best performance in terms of runoff with an accumulated result of 393 L/ha; in the silvopastoral system the highest values of accumulated surface runoff were obtained with 15768 L/ha; in terms of water quality, the silvopastoral system obtained the poorest response by not complying with most of the established parameters; on the contrary, the pasture and revegetation systems showed the best results in terms of water quality, complying with most of the parameters.

**Key words:** Quality, Runoff, Plots, Cover, Andisols.

## Contenido

Resumen .....	3
Abstract .....	4
Contenido.....	5
1. Introducción.....	9
2. Justificación.....	12
3. Planteamiento del problema .....	13
4. Objetivos .....	14
5. Hipótesis .....	15
6. Marco teórico .....	16
6.2 Cobertura vegetal.....	19
6.3 Calidad de agua .....	21
7. Aspectos metodológicos.....	27
7.1 Ubicación .....	27
7.2 Mapa.....	27
7.3 Sistemas de uso de suelo evaluados .....	27
7.4 Variables evaluadas .....	28
7.5 Descripción de las parcelas de escurrentía.....	29
7.6 Toma y preservación de las muestras.....	30
7.7 Precauciones en la toma de muestras.....	31
7.8 Propiedades químicas.....	31
7.8.1 Determinación de pH.....	31
7.8.1.1 Método .....	32
7.8.1.2 Procedimiento de análisis .....	32
7.8.1.3 Procesamiento de datos .....	32
7.8.1.4 Parámetro de evaluación .....	33
7.8.2 Conductividad eléctrica .....	33
7.8.2.1 Método .....	33
7.8.2.2 Procedimiento de análisis .....	33
7.8.2.3 Parámetro de evaluación .....	34
7.8.3 Determinación de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).....	34
7.8.3.1 Método .....	34
7.8.3.3 Procedimiento de análisis .....	35
7.8.3.3 Parámetro de evaluación .....	35

7.8.4	Determinación de amonios ( $\text{NH}_4^+$ ) .....	36
7.8.4.1	Método .....	36
7.8.4.2	Procedimiento de análisis .....	36
7.8.4.3	Parámetro de evaluación .....	37
7.8.5	Determinación de fosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) .....	37
7.8.5.1	Método .....	38
7.8.5.2	Procedimiento de análisis .....	38
7.8.5.3	Parámetro de evaluación .....	39
7.9	Propiedades físicas .....	39
7.9.1	Turbidez del agua .....	39
7.9.1.1	Método .....	39
7.9.1.2	Procedimiento de análisis .....	39
7.9.1.3	Parámetro de evaluación .....	40
7.9.2	Sólidos Suspendidos .....	40
7.9.2.1	Método .....	40
7.9.2.2	Procedimiento de análisis .....	41
7.9.2.3	Parámetro de evaluación .....	41
7.10	Propiedades fisicoquímicas del agua .....	41
7.10.1	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) .....	41
7.10.1.1	Método .....	42
7.10.1.2	Procedimiento de análisis .....	42
7.10.1.3	Parámetro de evaluación .....	42
7.10.2	Demanda química de oxígeno (DQO) .....	43
7.10.2.1	Método .....	43
7.10.2.2	Procedimiento de análisis .....	43
7.10.2.3	Parámetro de evaluación .....	44
8.	Resultados y discusión .....	45
8.1	Escorrentía y pendiente .....	45
8.2	pH del agua. ....	51
8.3	Conductividad eléctrica (CE) .....	53
8.4	Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), Amonios ( $\text{NH}_4^+$ ). ....	55
8.4.1	Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). ....	56
8.4.2	Amonios ( $\text{NH}_4^+$ ) .....	59
8.4.3	Fosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) .....	61
8.4.4	Turbidez .....	64

8.5 Sólidos suspendidos .....	67
8.6 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y Demanda química de oxígeno (DQO). 70	
8.7 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5).....	72
8.8 Demanda química de oxígeno (DQO).....	75
9. Análisis de resultados .....	78
9.1 Análisis de parámetros establecidos para calidad de aguas de escorrentía.....	78
10. Conclusiones .....	80
Referencias bibliográficas .....	83

## Índice de gráficas

<b>Gráfica 1.</b> Cantidad promedio de escorrentía debido al porcentaje de pendiente en los diferentes usos de suelo. ....	46
<b>Gráfica 2.</b> Valores promedio de pH de las aguas de escorrentía en cada uso de suelo. .	51
<b>Gráfica 3.</b> Valores promedio de la conductividad eléctrica de las aguas de escorrentía en los diferentes usos de suelo. ....	54
<b>Gráfica 4.</b> Contenidos promedio de Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), Amonios ( $\text{NH}_4^+$ ) en el proceso de escorrentía por uso de suelo. ....	56
<b>Gráfica 5.</b> Contenidos promedio de Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) en el proceso de escorrentía por uso de suelo. ....	62
<b>Gráfica 6.</b> Cantidad promedio de Turbidez del proceso de escorrentía por cada uso de suelo. ....	65
<b>Gráfica 7.</b> Cantidad promedio de sólidos suspendidos del proceso de escorrentía por cada uso de suelo. ....	68
<b>Gráfica 8.</b> Valores promedio de la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y Demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas de escorrentía en cada uso de suelo. ....	71

## Índice de ilustraciones

<b>Ilustración 1.</b> Mapa de las parcelas de escorrentía en la Finca Santuario. ....	27
<b>Ilustración 2.</b> Modelo parcela de escorrentía CIAT. ....	29

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de las aguas .....	23
<b>Tabla 2.</b> Clasificación del nivel de riesgo por muestra y mensual. ....	26
<b>Tabla 3.</b> <i>Determinación de variables químicas, físicas y fisicoquímicas para calidad de agua.</i> ....	28
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de aguas respecto a DBO5 elaboración propia con información de (Ibanez 2017). ....	75
<b>Tabla 5.</b> Análisis de variables para calidad de aguas de escorrentía. ....	78
<b>Tabla 6.</b> Análisis de la calidad de agua para riego según criterio FAO 1985. ....	79

# 1. Introducción

En el occidente de la Cordillera Central, en la zona Centro-Sur del departamento de Caldas, se encuentra la cuenca del Río Chinchiná que hace presencia en los municipios de Manizales, Villamaría, Palestina, Neira y Chinchiná; formando parte de la Zona Hidrográfica Magdalena Cauca, que limita al sur y al este con los departamentos de Tolima y Risaralda, al oeste con el municipio de Anserma y al norte con el municipio de Neira (Apolo, n.d.).

Los ríos Guacaica, Chinchiná y Claro conforman las tres subcuencas de esta, con una extensión de 1050 km<sup>2</sup>, o el 14% de la superficie total del departamento de Caldas. La cuenca tiene topografía abrupta debido a la presencia de rocas metamórficas, lo que le da al Río Chinchiná características de corrientes de montaña como fuertes pendientes y lecho rocoso. Una región montañosa y la zona intertropical tienen impacto en el clima de la cuenca, que es de tipo intertropical, su precipitación anual varía de 1000 a 4000 mm, y su temperatura de 12 a 18 °C. En la cuenca resaltan diversas áreas protegidas, incluido un parque nacional natural, cinco reservas forestales protectoras regionales, una reserva forestal protectora nacional, un distrito de conservación de suelos y dos reservas administradas por la sociedad civil. También es importante señalar que la cuenca contiene cantidades considerables de bosques u otras coberturas naturales que están protegidas por instrumentos de uso de la tierra.

La población de la zona de influencia de la cuenca es de alrededor de 525000 habitantes, la mayoría con residencia en el municipio de Manizales (72,23%), solo el 10% de la población es de Chinchiná, el 8,8% es de Villamaría, el 5,3% de Neira y el 3,4% de Palestina. En la cuenca se encuentran actividades productivas como la ganadería, para la que están destinadas 68000 ha frente a 31000 ha en cultivos (anuales, temporales y permanentes), por último, encontramos la minería, que ocupa aproximadamente 1550 ha, pero en menor medida (Apolo, n.d.).

Para (Meza et al., 2012) el uso de suelo en parcelas de escorrentía tiene interacción con la calidad del agua en la cuenca media del Río Chinchiná; es así como los cambios que se presentan en la cobertura del suelo pueden actuar sobre la capacidad de la cuenca para la regulación hídrica, aspecto determinante en la calidad del agua. A su vez (Álvarez et al., 2021) aseguran que la composición de macro invertebrados y la calidad del agua en las zonas fluviales también pueden afectarse por la presencia de vegetación ribereña nativa y exótica.

Las parcelas experimentales son, esencialmente instrumentos de campo que permiten medir la escorrentía y la producción de sedimentos en superficies de terreno delimitadas cuyas características edáficas, topográficas y morfológicas son bien conocidas, así como las correlaciones con el estado de la vegetación, la cobertura del suelo, las prácticas de labranza, el manejo, la historia del uso del suelo, etc. Las parcelas experimentales y la base para diferentes tipos de operaciones de parcela, tienen diferentes detalles técnicos y procedimientos de campo aplicables a ellas (De Alba et al., 2002).

Estas parcelas permiten el registro dinámico de la escorrentía y de la producción de sedimentos asociada a la precipitación sobre una superficie, al mismo tiempo, se pueden calcular los coeficientes de infiltración y escorrentía para la recogida de parcelas a partir del área de drenaje y volumen de escorrentía registrado por el pluviómetro (De Alba et al., 2002).

El agua de escorrentía puede contener contaminantes como: aceite, polvo, residuos de desechos animales, productos químicos y fertilizantes. Estos contaminantes ingresan a arroyos, ríos y lagos de manera directa, afectando gravemente la calidad del agua por lo que, para proteger la calidad del agua de las aguas superficiales y subterráneas (acuíferos), se deben tomar medidas para minimizar el transporte de estos contaminantes por escorrentía (Botero, 2020).

Teniendo en cuenta que (Botero, 2020) expone en su investigación como el sector rural colombiano presenta grandes limitantes para el acceso al recurso hídrico en términos de calidad y cantidad; si de agua potable o segura para el consumo hablamos, se encuentran cifras que no llegan ni al 40% en términos de cobertura; es por esto que se debe considerar la importancia que tiene el darle un buen manejo a este recurso que si bien tiene una oferta amplia en el país, es finito por lo que, es meritorio que se incrementen los esfuerzos para que, el agua disponible no se siga contaminando y se hagan las remediaciones correspondientes en los casos que aplique.

## 2. Justificación

El suelo y el agua son cruciales para el desarrollo de las operaciones agrícolas y forestales, pero estos recursos son muy frágiles y se contaminan fácilmente por factores externos o ambientales.

La sedimentación de las fuentes hídricas afecta directamente la calidad del agua, y en algunos casos restaurar estas propiedades es muy costoso, por lo que se requieren medidas de protección como la cobertura vegetal para reducir la velocidad y el impacto de las gotas de agua lluvia, además de evitar la sedimentación producto de la escorrentía.

Se buscó evaluar la efectividad de cuatro sistemas de uso de suelo con distintas coberturas vegetales (bosque, silvopastoril, pastos, revegetalización natural) en zona ribereña para determinar mediante análisis químico, físico y físico-químico, ¿Cuál de los sistemas influye de mejor manera en el mejoramiento de la calidad del agua de la cuenca media del Río Chinchiná?

### 3. Planteamiento del Problema

La cuenca del Río Chinchiná es un cuerpo de agua vital para la ciudad de Manizales y poblaciones aledañas, ya que surte el acueducto municipal, y adicionalmente es altamente usada en la agricultura, por lo que existe la necesidad de explorar nuevas prácticas de manejo y conservación que garanticen las óptimas condiciones de este recurso.

La calidad del agua en la cuenca media del Río Chinchiná puede verse afectada por el uso de los suelos y, aunque se han desarrollado estrategias para disminuir su contaminación, aún no se ha realizado una evaluación exhaustiva de cómo los diferentes usos de suelo afectan la calidad del agua de escorrentía en estas áreas (CONDENSAN & IEP, 2010).

En la parte media de la cuenca del Río Chinchiná se han implementado sistemas de uso de suelo que afectan la calidad de agua por fenómenos asociados a la escorrentía es por eso que, el determinar ¿Cómo los diversos usos del suelo en las zonas cercanas a las fuentes hídricas afectan la calidad del agua de escorrentía en la cuenca media del Río Chinchiná? es el problema de investigación que se nos plantea.

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Evaluar la calidad de las aguas de escorrentía en 4 sistemas de uso en Andisoles de la cuenca media del Río Chinchiná.

### **4.2 Objetivos específicos**

- 1) Medir el efecto de 4 coberturas vegetales (bosque, silvopastoril, pastos y revegetalización natural) en la calidad de las aguas.
- 2) Determinar la calidad de las aguas a través del uso de las coberturas vegetales en parcelas de escorrentía.
- 3) Comparar e identificar el mejor sistema para mejorar la calidad de las aguas en la cuenca media del Río Chinchiná.

## **5. Hipótesis**

### **5.1 Hipótesis nula ( $H_0$ )**

La calidad de agua se verá alterada por la ausencia de las coberturas vegetales.

### **5.2 Hipótesis alternativa ( $H_1$ )**

No se verá alterada la calidad del agua por la ausencia de las coberturas vegetales.

## 6. Marco teórico

### 6.1 Suelos Andisoles

Los Andisoles son suelos derivados de cenizas volcánicas, formados a partir de la meteorización de depósitos de materiales provenientes de eyecciones volcánicas; por lo general son de color negro debido a su alto contenido de materia orgánica la cual ayuda a mejorar la fertilidad del suelo y la estructura del mismo. Alrededor del 11,6% de Colombia está cubierta por suelos provenientes de ceniza volcánica, principalmente en las regiones montañosas de los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda, Quindío, Valle del Cauca, Cauca, Huila, Nariño, Tolima, Cundinamarca y otros (Hincapié & Tobón, 2012).

Los Andisoles cubren más de 124 millones de hectáreas, aproximadamente el 0,84% de la superficie terrestre. El sorprendente patrón de distribución de los Andisoles es paralelo al del Cinturón de Fuego del Pacífico, que concentra un cinturón de actividad tectónica y volcánica a lo largo de toda la costa oeste del continente americano, que se extiende a través de las Islas Aleutianas, al sur de Kamchatka, Rusia, a través de Japón, Filipinas e Indonesia, a través de Papua Nueva Guinea, las Islas Salomón y Vanuatu y otras islas del Pacífico llegan a Nueva Zelanda.

Alrededor del 60% de Andisoles se distribuyen en países tropicales y aunque ocupan un área relativamente pequeña de la superficie del mundo, representan un recurso agrícola importante y valioso en relación con la alta densidad de poblaciones que habitan estas regiones.

En Colombia, estos suelos se encuentran en la región andina, que cubre alrededor del 4,5% de la superficie terrestre del país (aproximadamente 5200000 hectáreas), principalmente en la Cordillera Central, en menor medida en el occidente y por último en el oriente. Su distribución cubre paisajes montañosos y está más extendida en tierras altas,

pedemonte, llanuras aluviales y esporádicas áreas fluvial-marinas (Sánchez & Rubiano, 2015).

Para (Volverás et al., 2020) los suelos Andisoles no intervenidos, en sus características físicas presentan baja densidad aparente, alta porosidad y alta retención de humedad. En cuanto al estado de humedad del suelo, entre otros factores, se explican que, por la clasificación textural, las propiedades del suelo, contenido de materia orgánica, porosidad total y manejo y uso del suelo; los procesos como la conductividad, la permeabilidad y la escorrentía se ven afectadas por la estructura, textura, grietas, agujeros de la macrofauna y canales generados por las raíces de árboles.

Existen varios estudios que se han llevado a cabo sobre parcelas donde se evalúa la escorrentía en suelos Andisoles caracterizados por tener alta capacidad de retención de nutrientes y agua, lo que los hace importantes para la agricultura; sin embargo, también son susceptibles a la erosión y a la lixiviación de nutrientes.

(Ruiz et al., 2005) Evaluaron los flujos de escorrentía en tres coberturas boscosas de la región de Piedras blancas, en Antioquia, Colombia; mediante parcelas cerradas de escorrentía en suelos Andisoles y determinaron que los flujos de escorrentía se comportaron de la misma manera con el comportamiento de la lluvia, es decir, los picos en los flujos de escorrentía se mostraron asociados a la precipitación, así mismo para los eventos de baja magnitud los autores exponen que, el flujo de escorrentía puede verse influenciado por las características inherentes a cada cubierta vegetal, como la profundidad de la capa de hojarasca y la presencia de productos de la descomposición de la materia orgánica en las plantaciones forestales de coníferas, que se caracterizan por una repelencia muy severa al agua. De conformidad con los resultados obtenidos concluyeron que los menores flujos de escorrentía se presentaron en bosques naturales de roble seguidos por bosques plantados de pino pátula y ciprés; para estas dos últimas los flujos de escorrentía se relacionan con las variables de volumen e intensidad de la lluvia, mientras que para la cobertura de roble se relaciona con el volumen de la precipitación. También se menciona que otro de los factores determinantes para los flujos de escorrentía

fueron las características inherentes de cada cobertura vegetal, por lo que, las coberturas que presentaban una mayor profundidad de hojarasca tuvieron menores valores de escorrentía (robre y pátula), mientras que, en la cobertura de ciprés al tener hojarasca delgada se generaron los mayores valores de escorrentía.

Otro estudio realizado por (Garzón, 1993) evaluó el comportamiento de las prácticas agroforestales y de cultivos en la incidencia en la conservación de los suelos, la cuantificación de la escorrentía superficial y el material erosionado mediante parcelas de escorrentía en San Juan Sur Turrialba, Costa Rica en suelos Andisoles, en este estudio los tratamientos incluyeron monocultivos de frijol y maíz, cultivo en callejones de maíz (*Zea mays* variedad Tuxpeño) y frijol (*Phaseolus vulgaris* variedad Negro Huasteco) asociados con *Erythrina fusca* e *Inga edulis* en mulch. Los resultados indican que para el ciclo de maíz los tratamientos con mulch fueron los mejores sistemas para el control de la erosión, este comportamiento también fue similar para los cultivos en callejones; por otra parte, el tratamiento de cultivo con mulch *Inga edulis* fue el mejor para controlar la escorrentía y la erosión, además este también fue el que obtuvo mayores rendimientos en producción de granos de frijol y maíz. Con esto los autores concluyen que, el uso de coberturas naturales con mulch es una forma efectiva para controlar la escorrentía y la erosión.

(Dóniz, 2013) Analizó 16 cárcavas en campos de cultivo en el norte de Tenerife (Las Llanadas) tras un fenómeno de lluvias intensas en noviembre de 2009; además se evaluaron “gullies” en parcelas con diferentes tipos de cultivo: maíz, cereal, papa y sin cultivo, esta investigación tuvo lugar en suelos Andosoles y según el autor son propios de los sectores de laurisilva y el fayal-brezal, con estructura fina y poco desarrollada, débilmente cementada en los horizontes superficiales y más intensiva en los interiores, también presentan valores de materia orgánica muy altos y pH elevado. Los primeros resultados ponen en evidencia que la ubicación y la morfología de las cárcavas varían en función del tipo de cultivo presente cuando ocurren fuertes precipitaciones. La conclusión expuesta por (Dóniz, 2013) es que existe un comportamiento diferente de la erosión por escorrentía en las diferentes parcelas de este estudio en función del tipo de cultivo, además concluyó que, las cárcavas tienen diferencias morfológicas y de tamaño en relación con el tipo de cultivo por lo que las parcelas con maíz son más susceptibles a la erosión, caso

contrario sucede con el cultivo de cereal; sin embargo también expone que, la desaparición de herramientas tradicionales en el campo (zanjas, muros de piedras, etc.) son los mayores responsables de la formación y mayor incidencia de las cárcavas por intensas lluvias.

En general, los estudios sobre parcelas de escorrentía en suelos Andisoles indican que estos pueden ser susceptibles a la erosión y a la lixiviación de nutrientes, lo que podría tener impactos negativos en la calidad del agua. La implementación de prácticas de manejo de suelos adecuada puede ayudar a minimizar estos efectos y mejorar la calidad del agua en estas áreas.

## **6.2 Cobertura Vegetal**

El número de estudios que categorizan y evalúan ¿Cómo la cobertura vegetal afecta la calidad del agua utilizada para la agricultura y el consumo humano en el departamento de Caldas? es prácticamente nulo (Escobar & Duque, 2016), en cuanto a estudios realizados sobre la contribución de las coberturas vegetales en el mejoramiento de la calidad del agua, el gran número de ellos demuestra la importancia de la cobertura vegetal en la mejora de la calidad del agua. Las coberturas vegetales son prácticas importantes en el manejo agronómico de cualquier cultivo, especialmente de hortalizas, ya que suelen ser de menores áreas (Hincapié & Tobón, 2012).

Por otra parte, la protección adecuada de los bosques nativos y la restauración de los ecosistemas forestales dañados puede amortiguar los impactos del cambio climático y la crisis mundial del agua (Rodríguez & Delgado, 2020). Los bosques tienen sistemas de raíces más profundos que pueden capturar y filtrar más agua que otras formas de vegetación, lo que los hace apropiados para mejorar la calidad del agua, y gestionar integralmente los recursos hídricos como aspecto clave para la producción agrícola sostenible (FAO, 2022).

La mayor limitante que presentan los cuerpos de agua en su destinación para consumo y usos agrícolas es la sedimentación por arrastre de partículas, pero sobre el tema en cuestión no existen estudios en el área de influencia del proyecto. Las investigaciones más cercanas al área de influencia se desarrollaron por la Universidad de Medellín que estableció una serie de protocolos e indicadores para medir la calidad de las aguas de la cuenca del río Cauca (Torres et al., 2009), sin embargo en el área de la cuenca del Río Chinchiná y regiones próximas no se encuentran investigaciones relacionadas por tal motivo con el presente estudio se busca aportar una base teórico-práctica sobre el tipo de coberturas y técnicas de cultivo más aptas para contribuir con el mejoramiento de la calidad del agua de la cuenca del Río Chinchiná.

En estudios previos realizados en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín por (Ortega et al., 2014) se evaluó el efecto de cuatro coberturas vegetales (cultivo limpio, pastos, bosque secundario y rastrojo) sobre algunos servicios ecosistémicos en los Andes colombianos monitoreando servicios ecosistémicos, entre ellos la regulación hídrica observando una redistribución del agua de lluvia, lo que favorece un retraso temporal de la respuesta hidrológica al estímulo lluvioso debido a la intercepción del agua de lluvia. Adicionalmente, el estudio demostró que la cobertura más eficiente en términos de regulación hídrica fue el bosque con un control eficiente de la escorrentía superficial y solo el 0,69% de la lluvia convirtiéndose en flujo de escorrentía, contrario a lo que ocurre en las coberturas mono estratificadas como los pastos en los que la capacidad de regulación hidrológica es mínima debido a la escorrentía superficial, que representa cerca del 20,8% del agua ingresada por la precipitación incidente, situación provocada por el constante pisoteo del ganado que aumenta la densidad aparente del suelo y reduce su capacidad de infiltración (Ortega et al., 2014).

Otro estudio realizado en Colombia sobre la interacción entre coberturas vegetales y la calidad de agua de escorrentía fue llevado a cabo también por (Ramos & Armenteras, 2019) en el departamento de Cundinamarca en la Universidad Nacional sede Bogotá; donde se evaluó la cantidad y calidad de agua de intercepción y escorrentía en relación con las diversas cubiertas vegetales que se encuentran presentes en el bosque Altoandino de la reserva forestal protectora El Malmo, arrojando como resultado que el Bosque Denso

Altoandino fue el que mejoró en mayor medida la calidad de agua de escorrentía y presentó los valores más altos de interceptación de precipitaciones debido al efecto esponja de su dosel y al buen estado del suelo; en contraste las coberturas de vegetación y pastos mostraron características intermedias debido a su densidad y sus características edáficas (Ramos & Armenteras, 2019).

### **6.3 Calidad De Agua**

Los recursos de agua dulce utilizables de los que dispone la tierra solo representan el 3% del volumen total, una gran parte de este se utiliza para actividades humanas. Los acuíferos almacenan hasta el 98 % del agua dulce disponible y proporcionan el 50 % del agua para consumo humano directo, el 30 % para la industria y el 20 % para la agricultura. (Rodríguez & Moreno, 2015) indican que, en el estudio nacional del agua, el índice de agua per cápita ya no clasifica a Colombia como una de las potencias hídricas del mundo, sino como el que ocupa el puesto 24 de una lista de 182 países. La demanda de agua está aumentando exponencialmente; sin embargo, la oferta y la calidad cada vez son menores, es por ello que, es importante implementar acciones que permitan el abastecimiento sostenible de agua de calidad para toda la población garantizando la protección de las funciones ecosistémicas.

En Colombia, la mala planificación del uso y ocupación del suelo conduce al deterioro de las cuencas hidrográficas, afectando la cantidad y calidad del suministro de agua. Por ello, los acueductos de 140 municipios de 16 poblaciones son vulnerables por la disponibilidad de agua, ya que en muchos casos la fuente actual de abastecimiento corresponde a quebradas, cuyas aguas se han estacionalizado por la degradación de la cuenca (Rodríguez & Moreno, 2015).

Los ríos y mares de Colombia reciben y transportan aguas contaminadas utilizadas en diferentes procesos socioeconómicos que en su mayoría son vertidas sin tratamiento previo, además reciben grandes cantidades de sedimentos producidos por procesos erosivos, tanto de origen natural como antrópico.

Debido al crecimiento de la población y la actividad económica, estos comportamientos se incrementan cada día y requieren de un seguimiento y control continuo, lo que hace meritorio tomar acciones para enfrentar este problema con el fin de reducir su impacto en los procesos naturales y sociales, especialmente en la salud humana.

Las mediciones del IDEAM y la información sobre los sectores económicos que recopilan la calidad del agua respaldan los datos del análisis de la calidad de este recurso que se presentan de manera sistemática con el uso de indicadores de calidad del agua y la definición de amenazas potenciales producto de la contaminación (IDEAM, n.d.).

(CORPONOR, 2021) Define que el Índice de Calidad del Agua (ICA) es un número (entre 0 y 1) que representa el nivel de calidad de un cuerpo de agua en términos de bienestar humano, independientemente del uso que se le dé. Las características físicas, químicas y, en ocasiones, microbiológicas de la masa de agua se combinan para producir este número, que puede indicar problemas de contaminación.

Dentro del estudio del ICA de las aguas se consideran una variedad de factores ambientales a través de variables sencillas que permiten el análisis de las fuentes primarias de contaminación, incluido el oxígeno disponible, materia orgánica, sólidos, mineralización, acidez, entre otros, y propiedades importantes de la columna de agua como la temperatura (IDEAM, 2022).

Según (CORPONOR, 2021) El resultado de la ponderación de los puntajes para cada indicador se relaciona con un grupo de calidades subdividido en cinco categorías (muy mala, mala, regular, aceptable y buena), que a su vez corresponden a un color determinado (rojo, naranja, amarillo, verde y azul). Esta comparación temporal de la calidad del agua y colores simplifican la interpretación e identificación de tendencias (deterioro, estabilización o recuperación).

A continuación, se observa la categorización propuesta por el IDEAM y adoptada por el laboratorio de CORPONOR, que se ilustra en la tabla:

**Tabla 1.** Clasificación de las aguas.

<b>Categorías de valores que puede tomar el indicador</b>	<b>Calificación de la calidad del agua</b>	<b>Señal de alerta</b>
<i>0,00 – 0,25</i>	<i>Muy mala</i>	<b>Rojo</b>
<i>0,26 – 0,50</i>	<i>Mala</i>	<b>Naranja</b>
<i>0,51 – 0,70</i>	<i>Regular</i>	<b>Amarillo</b>
<i>0,71 – 0,90</i>	<i>Aceptable</i>	<b>Verde</b>
<i>0,91 – 1,00</i>	<i>Buena</i>	<b>Azul</b>

Fuente: (CORPONOR, 2021)

Según (SNET, n.d.) En la determinación del “ICA” intervienen 9 parámetros, que son:

- Coliformes Fecales (en NMP/100 mL)
- pH (en unidades de pH)
- Demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO5 en mg/ L)
- Nitratos ( $\text{NO}_3^-$  en mg/L)
- Fosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$  en mg/L)
- Cambio de la temperatura (en °C)
- Turbidez (en FAU)
- Sólidos disueltos totales (en mg/ L)
- Oxígeno disuelto (OD en % saturación)

Las aguas con “ICA” catalogadas como “buenas” son capaces de sostener una alta diversidad de vida acuática. Además, el agua también sería conveniente para todas las formas de contacto directo con ella.

Las aguas con un “ICA” catalogada como “Regular” tienen menos diversidad de organismos acuáticos y han aumentado el crecimiento de las algas.

Las aguas con un “ICA” categorizadas como “Mala” pueden solo apoyar una diversidad baja de vida acuática y están experimentando problemas con la contaminación.

Las aguas con un “ICA” que están en categoría “Pésima” pueden solo apoyar un número limitado de las formas acuáticas de vida, estas presentan problemas abundantes y no serían consideradas como aceptables para las actividades que implican el contacto directo con ella.

Para determinar el valor del “ICA” es necesario que midan los 9 parámetros previamente mencionados (SNET, n.d.).

(Rodríguez & Moreno, 2015) indican que, el agua requerida para uso personal o doméstico debe ser saludable de manera que, no contenga microorganismos, sustancias químicas o radioactivas que puedan poner en riesgo la salud de las personas; además, el agua debe tener color, olor y sabor aceptables.

Es por ello que, mediante el Decreto N° 1575 de 2007, se estableció un sistema de protección y control de calidad del agua potable para consumo humano con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud causados por su consumo. Esto se aplica a todos los proveedores que suministren o distribuyan agua para consumo humano (cruda o tratada) en todo el país, para diversos usos y usuarios.

En este decreto se entregan herramientas básicas para monitorear la calidad del agua, entre ellas el índice de riesgo para la calidad del agua potable (IRCA), a través del cual se determina el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de características físicas, químicas y microbiológicas establecidas en las normativas para consumo humano.

El Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA) se entiende como un indicador ambiental consistente en la expresión de alguna combinación más o menos compleja de parámetros que sirven como medida de la calidad del agua; este índice se puede mostrar en un número, una descripción, un rango, o un color.

En concordancia con la metodología del ICA, en la implementación del IRCA para la determinación de la calidad del agua en diversos puntos de muestreo a lo largo de la red de distribución, también se da la ponderación del valor numérico enmarcado dentro de una de las cinco categorías.

El índice corresponde a una expresión numérica derivada de la suma de los puntajes de riesgo asignados a las características fisicoquímicas del agua (22 características); representando el riesgo previo al desarrollo de enfermedades, por lo que la representación de cada riesgo está relacionada con su impacto directo o indirecto sobre la salud. En este sentido, la suma de las puntuaciones de riesgo para el total de características analizadas en cada muestra establecida se estima como un porcentaje del valor del IRCA, que puede alcanzar el valor de 100%.

Los valores calculados del indicador se comparan en la Tabla 2, permitiendo clasificar descriptivamente la calidad del agua en cinco categorías (sin riesgo, riesgo bajo, riesgo medio, riesgo alto e inviable) a los que están conectados un color particular (azul, verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente) sistema que ayuda a la interpretación y la toma de decisiones por parte de las distintas autoridades (Rodríguez & Moreno, 2015).

**Tabla 2.** Clasificación del nivel de riesgo por muestra y mensual.

<i>Clasificación IRCA %</i>	<i>Nivel de riesgo</i>	<i>IRCA por muestra</i>	<i>IRCA mensual</i>
<b>80.1 - 100</b>	<b>Inviabile sanitariamente</b>	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, MPS, INS, MADS, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a la competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entes de orden nacional.
<b>35.1 - 80</b>	<b>Alto</b>	Informar a la persona prestadora, al COVD, Alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a la competencia de la persona prestadora, y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
<b>14.1 - 35</b>	<b>Medio</b>	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
<b>5.1 - 14</b>	<b>Bajo</b>	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
<b>0 - 5</b>	<b>Sin riesgo</b>	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano, continuar la vigilancia.

Fuente: (Rodríguez & Moreno, 2015).

## 7. Aspectos metodológicos

### 7.1 Ubicación

El trabajo se realizó en la finca Santuario, localizada en la vereda Enea del municipio de Villamaría, departamento de Caldas. Presenta una extensión de 200 hectáreas y altitud entre 2500- 3200 m.s.n.m.

### 7.2 Mapa

*Ilustración 1. Mapa de las parcelas de escorrentía en la Finca Santuario.*



Fuente: Google Earth, abril 2023.

### 7.3 Sistemas De Uso De Suelo Evaluados

En la finca Santuario se evaluaron los sistemas de bosque, silvopastoril, pastos y revegetalización natural; la determinación de calidad de aguas se realizó con parcelas de escorrentía en concordancia con los diseños metodológicos establecidos por CIAT (Romero et al., 2016) y la toma de muestras para laboratorio se realizó cada 15 días durante 8 meses, después del primer mes de instalación de las parcelas.

## 7.4 Variables evaluadas

**Tabla 3.** Determinación de variables químicas, físicas y fisicoquímicas para calidad de agua.

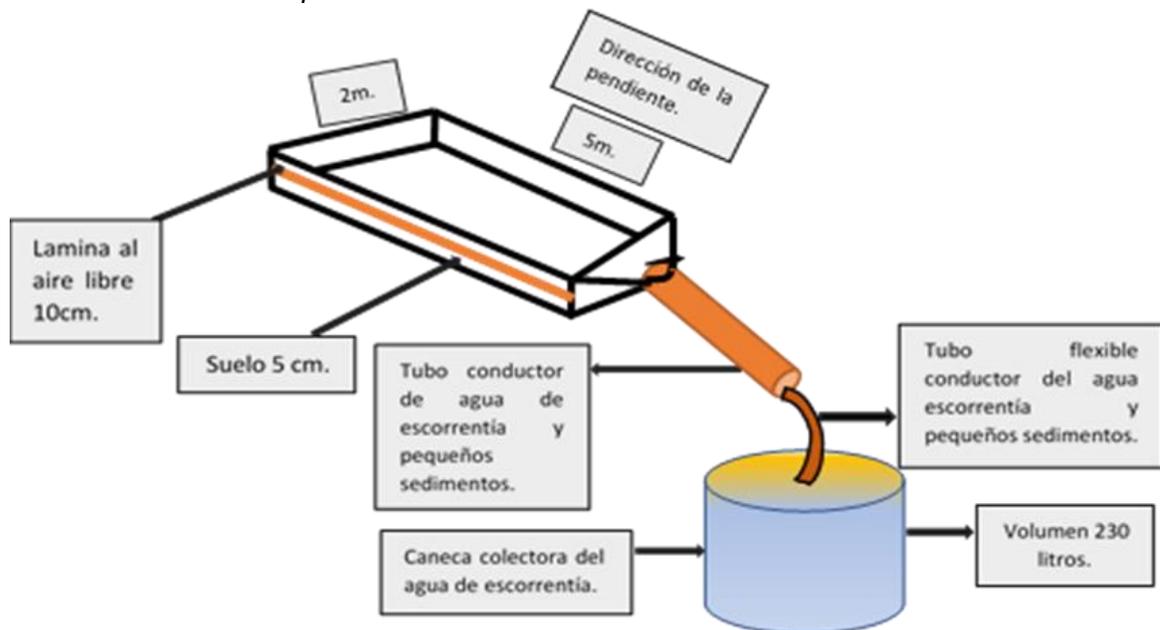
DETERMINACIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS, FÍSICAS Y FISICOQUÍMICAS PARA CALIDAD DE AGUA		
Tipo de variable	Variable	Metodología
<b>QUÍMICAS</b>	pH	Electrometría basada en los protocolos establecidos por el IDEAM TP0080 versión 3 y la NTC 4803 (IDEAM, 2007c).
	Nitratos	Determinación fotométrica con fotómetro PF-12 plus. Para esto se hizo uso del Kit de prueba colorimétrica VISOCOLOR ECO Nitratos; Test 5-41 (MACHEREY-NAGEL, 2022c).
	Amonios	Determinación test de prueba fotométrica con fotómetro PF-12 plus. Se hizo uso del Kit de prueba colorimétrica VISOCOLOR ECO Amonios 3; Test 5-08 (MACHEREY-NAGEL, 2022a).
	Fosfatos	Determinación fotométrica con fotómetro PF-12 plus, se usó el Kit de prueba colorimétrica VISOCOLOR ECO fosfatos; Test 5-84 (MACHEREY-NAGEL, 2022b).
	Conductividad eléctrica	Electrométrico en aguas según el protocolo del IDEAM TP0082 versión 2 y NTC 5994 (IDEAM, 2016).
<b>FÍSICAS</b>	Turbiedad	Nefelometría (Método B) del protocolo IDEAM TP0443 versión 1 y NTC 4707 (IDEAM, 2007d).
	Sólidos suspendidos	Sólidos suspendidos totales en agua, secados a 103-105°C versión 1 según protocolo IDEAM TP0436 y NTC 897 (IDEAM, 2017).
<b>FISICOQUÍMICAS</b>	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	Incubación de 5 días y electrometría del protocolo IDEAM TP0087 y NTC 3630 (IDEAM, 2015).
	Demanda química de oxígeno (DQO).	Reflujo cerrado y volumetría del protocolo IDEAM TP0086 versión 5 y la NTC 3629 (IDEAM, 2007a).

## 7.5 Descripción de las parcelas de esorrentía

Las parcelas de esorrentía permiten la delimitación de un campo experimental del terreno para la evaluación del potencial de calidad de aguas de esorrentía superficial lo cual permite estudiar como los diferentes factores del uso del suelo y la vegetación afectan la calidad de agua de esorrentía, estas parcelas se construyen en terrenos con pendientes uniformes y se dividen en secciones para medir la cantidad y calidad de la esorrentía además, son comúnmente utilizadas en estudios de calidad del agua y gestión de cuencas hidrográficas.

En la ilustración 2 se muestra el modelo de las parcelas de esorrentía establecida por el CIAT, como se muestra a continuación:

**Ilustración 2.** Modelo parcela de esorrentía CIAT.



Fuente: (Romero et al., 2016).

Las parcelas experimentales de escorrentía están constituidas por dos partes:

- Campo experimental.
- Sistema receptor (ubicado en la parte inferior).

La parcela de escorrentía tiene dimensiones de 5m x 2m, lo que corresponde a un área de 10 m<sup>2</sup> para el análisis. Los materiales utilizados en la instalación de la parcela fueron: láminas metálicas de preferencia galvanizadas para evitar el deterioro y la oxidación de las mismas para asegurar la calidad de la información, los bordes de estas deben estar enterrados y sobresalir por lo menos unos 10 cm para evitar filtraciones hacia y desde el interior de la parcela de escorrentía. Así, se asegura que la causante de escorrentía sea únicamente la precipitación que cae sobre el campo experimental.

En la parte inferior de la parcela se debe instalar una pestaña horizontal y completamente a ras del suelo, con la finalidad de recolectar la totalidad de la escorrentía que se forma en la parcela y evitar pérdidas por infiltración en el borde inferior de la parcela de escorrentía. El tubo de PVC conecta la parcela de escorrentía a una caneca de 230L en donde se almacena el agua producto de la escorrentía.

En la finca Santuario se establecieron 4 parcelas con sus duplicados distribuidas en los siguientes sistemas de uso:

- Bosque.
- Silvopastoril.
- Pastos.
- Revegetalización natural.

## **7.6 Toma y preservación de las muestras**

Para la toma de las muestras se hizo uso de recipientes de plástico con capacidad de 2 litros que se almacenaron provisionalmente mientras se transportaban al laboratorio de la

Universidad de Caldas, en neveras portátiles de icopor con el fin de evitar cambios drásticos en la temperatura de las mismas; al momento de aforarlas en el laboratorio estas se pusieron en refrigeración para conservar la cadena de frío y posteriormente analizarlas.

## **7.7 Precauciones en la toma de muestras**

Las precauciones que se tomen al muestrear y almacenar afectarán los parámetros a determinar. En general, las muestras deben ser homogéneas y representativas y no deben alterar las propiedades fisicoquímicas o biológicas del agua por lo que:

- Los envases deben ser tratados según el tipo de análisis y previa esterilización y limpieza.
- Antes de llenar el envase con la muestra se debe lavar dos o tres veces el recipiente con el agua que se va a coleccionar.
- Para tomar la muestra se debe tener cuidado para garantizar que el análisis coincida con la composición real.
- Llevar un registro con información suficiente, nombre del responsable, fecha, hora, lugar, lugar de muestreo e identificación de la muestra (Londoño et al., 2010).

## **7.8 Propiedades químicas**

### **7.8.1 Determinación de pH**

El pH mide la actividad de los iones hidrogeno mediante mediciones potenciométricas utilizando un electrodo patrón de hidrógeno y otro de referencia. La acidez del agua es una medida de su capacidad para reaccionar con bases fuertes. Las medidas pueden variar significativamente con el punto final, la acidez es una medida de las propiedades de los

agregados del agua, que solo puede explicarse por una sustancia específica si se conoce la composición química de la muestra.

Los ácidos minerales fuertes; ácidos débiles como el ácido carbónico, ácido acético y sales hidrolizadas a sulfato ferroso o de aluminio pueden aumentar la acidez del agua (Londoño et al., 2010).

### **7.8.1.1 Método**

Se determinó el pH utilizando el método por electrometría basado en los protocolos establecidos por el IDEAM TP0080 versión 3 y la NTC 4803 (ICONTEC, 2016).

### **7.8.1.2 Procedimiento de análisis**

Se debe agitar suavemente las muestras para asegurar su homogeneización evitando la incorporación de dióxido de carbono. Para muestras con fuerza iónica alta, se debe dejar el electrodo en la muestra durante un minuto. Se toma una muestra fresca y se lee el pH con un potenciómetro. Para soluciones débilmente amortiguadas, se debe sumergir el electrodo en tres o cuatro secciones consecutivas de la muestra y se toma una muestra nueva para medir el pH (IDEAM, 2007c).

### **7.8.1.3 Procesamiento de datos**

Para instrumentos con compensación automática de temperatura y lectura directa de unidades de pH, la lectura se corrige automáticamente para 25°C. Se debe reportar la lectura obtenida en el dispositivo en unidades de pH con dos cifras significativas.

pH= n Unidades de pH (IDEAM, 2007c).

#### **7.8.1.4 Parámetro de evaluación**

De conformidad con los artículos 10 y 39 del Decreto N° 475 de 1998 del Ministerio del Ambiente, el valor del potencial de hidrógeno (pH) del agua potable debe estar entre 6,5 y 9,0 (Ministerio de Ambiente, 2002).

### **7.8.2 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es una medida de las propiedades de una solución acuosa para conducir la corriente eléctrica. Esta propiedad depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y temperatura de medida. Las soluciones de la mayoría de los compuestos inorgánicos son buenos conductores dado que, las moléculas orgánicas no se disocian en el agua y conducen la electricidad en una escala muy pequeña (IDEAM, 2016).

#### **7.8.2.1 Método**

El método empleado es electrométrico en aguas según el protocolo del IDEAM TP0082 versión 2 y NTC 5994 (IDEAM, 2016).

#### **7.8.2.2 Procedimiento de análisis**

Se introduce la celda inmediatamente después de agitar bien la muestra, garantizando que la ranura del sensor quede sumergida en ella. De lo contrario se debe colocar una alícuota de 40 a 50 ml de la muestra de prueba en un vaso de precipitados, la celda de conductividad debe purgarse con la misma muestra. Finalmente se lee y se reporta la conductividad medida en las unidades correspondientes ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el formato de datos de electrometría TF0021 (IDEAM, 2016).

### **7.8.2.3 Parámetro de evaluación**

Según el decreto 475 de 1998, que establece los requisitos organolépticos y físicos del agua en su artículo 36, el valor permisible de la conductividad eléctrica en agua potable debe ser menor a 1500 micro Siemens/cm (Ministerio de Ambiente, 2002).

### **7.8.3 Determinación de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )**

Los nitratos son iones formados por tres átomos de oxígeno, un átomo de nitrógeno y una carga negativa ( $\text{NO}_3^-$ ), estos iones no tienen color ni sabor y se disuelven naturalmente en el agua. Su presencia natural en aguas superficiales o subterráneas es resultado del ciclo natural del nitrógeno, sin embargo, en algunas zonas este ciclo se ha visto alterado, es decir, las concentraciones de nitratos han aumentado, principalmente debido al uso excesivo de la fertilización nitrogenada y su posterior liberación por lluvia o riego (Palomares, 2013).

La escorrentía superficial de fertilizantes, la absorción de fitoplancton y la desnitrificación bacteriana pueden causar cambios rápidos en las concentraciones de nitratos en las aguas superficiales (OMS, 2017).

#### **7.8.3.1 Método**

La técnica empleada corresponde a la determinación fotométrica con fotómetro PF-12 plus, consiste en la reducción de los iones nitratos a iones nitritos en medios ácidos; formando así en presencia de una amina aromática adecuada un colorante azoico amarillo anaranjado utilizando, para esto el Kit de prueba colorimétrica VISOCOLOR ECO Nitratos; Test número 5-41 (MACHEREY-NAGEL, 2022c).

### 7.8.3.3 Procedimiento de análisis

Después de haber filtrado las muestras de agua de escorrentía, se prepara un blanco con 5ml de agua destilada a la que se le adicionan los reactivos correspondientes con ayuda de la jeringa de 5ml proporcionada en el kit o en su defecto usando un pipeteador, posteriormente se agita la muestra y se deja reposar por el tiempo requerido según el manual para después proceder con la lectura. Se enciende el fotómetro antes de que comiencen las lecturas, el equipo requiere de un código para cada modelo del método a emplear y se registra el rango de mediación, las lecturas comienzan colocando el blanco de reactivo en la celda del fotómetro. A continuación, se adicionan 5ml de la muestra de agua a los tubos de ensayo, después se añaden 5ml del indicador  $\text{NO}_3^-$  - 1, se cierra el tubo y se mezcla, luego se agrega una porción medidora rasa del indicador  $\text{NO}_3^-$  - 2, se cierra el tubo y se agita inmediatamente con fuerza durante un minuto, después de 5 minutos se abre el tubo y se coloca en la celda, se selecciona el botón denominado “M” para procesar la muestra y finalmente se leen y registran las lecturas.

El rango de medición para esta prueba es de 1–120 mg/L  $\text{NO}_3^-$ , si al momento de realizar las lecturas el dato de  $\text{NO}_3^-$  es mayor a 120 mg/L se debe proceder a realizar dilución de la muestra con agua destilada para bajar la concentración y hacer nuevamente la medición de Nitratos en el fotómetro (MACHEREY-NAGEL, 2022c).

### 7.8.3.3 Parámetro de evaluación

El valor máximo permisible de nitratos es de 10 mg/L, según lo establece el Artículo 8 sección b) del Decreto 475 del Ministerio de Salud, del 10 de marzo de 1998. Norma de calidad química para el agua con implicaciones de carácter económico o de acción indirecta en salud (Ministerio de Ambiente, 2002).

## 7.8.4 Determinación de amonios ( $\text{NH}_4^+$ )

El amonio se encuentra en el agua como resultado de la descomposición de materia orgánica de animales y plantas, diversas actividades industriales, la desaminación microbiana de las proteínas en un proceso denominado amonificación (Cárdenas & Sánchez, 2013).

### 7.8.4.1 Método

Para esta determinación se empleó el test de prueba fotométrica con fotómetro PF-12 plus; la fundamentación de esta metodología consiste en la expresión de iones amonio por actuación del cloro en medio alcalino, en la que por acción de la monocloramina se da la formación de timol que posteriormente generará indofenol azul; para esto se hizo uso del Kit de prueba colorimétrica VISOCOLOR ECO Amonios 3; Test número 5-08 (MACHEREY-NAGEL, 2022a).

### 7.8.4.2 Procedimiento de análisis

Se vierten 5ml de la muestra de agua previamente filtrada a cada uno de los tubos de ensayo con la ayuda de una jeringa de 5ml o un pipeteador, luego se procede a adicionar 10 gotas del indicador  $\text{NH}_4$  -1, se sella el tubo y se mezcla posteriormente, se añade 1 porción del indicador de  $\text{NH}_4$  -2, se sella el tubo y se agita la mezcla hasta su disolución y se deja reposar durante 5 minutos.

Seguidamente se agregan 4 gotas del indicador  $\text{NH}_4$  -3, se sella el tubo y se mezcla, se abre el tubo después de 7 minutos y se limpia en su exterior para proceder con la lectura en el fotómetro. Finalmente se hace la lectura y reporte de amonios en las unidades correspondientes (mg/L). Para empezar a realizar las lecturas se debe establecer primero un blanco el cual sigue el mismo procedimiento mencionado anteriormente, pero con los reactivos mencionados en este apartado.

El rango de medición para esta prueba es de 0,2 – 3 mg/L  $\text{NH}_4^+$  al momento de realizar las lecturas si el dato de  $\text{NH}_4^+$  es mayor a 3mg/L se debe realizar dilución de la muestra con agua destilada para disminuir su concentración y hacer nuevamente la medición en el fotómetro (MACHEREY-NAGEL, 2022a).

### **7.8.4.3 Parámetro de evaluación**

Según el Ministerio del medio ambiente la resolución 0883 de 2018 en el Artículo 9 se especifica como parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales no domésticas un valor máximo admisible de 5 mg/L de nitrógeno amoniacal (Ministerio de ambiente, 2018).

### **7.8.5 Determinación de fosfatos ( $\text{Po}_4^{-3}$ )**

El fósforo que se encuentra en las aguas naturales y residuales es casi exclusivamente como fosfatos, dividido en ortofosfato, fosfatos condensados (pirofosfatos, metafosfatos y otras polifosfatos) y fosfatos orgánicos. El análisis de fósforo involucra dos pasos generales: (a) conversión de la forma de fósforo de interés a ortofosfato disuelto, y (b) determinación colorimétrica de ortofosfato disuelto.

La presencia de fósforo soluble en los cursos de agua proviene del uso de fertilizantes, jabones, limpiadores o suelo. A medio plazo esta presencia, provoca la proliferación de algas y otras plantas acuáticas (eutrofización) en las aguas continentales. Las polifosfatos utilizadas en los detergentes o el tratamiento del agua perjudican la purificación del agua al evitar la floculación y el ablandamiento, mientras que generan mucha espuma (IDEAM, 2007b).

El fósforo se tiene en cuenta como parámetro importante de la calidad del agua debido a que puede afectar la eutrofización por eso es importante contar con métodos analíticos

para determinar la concentración de diferentes especies solubles en agua, absorbida sobre moléculas o relacionado con especies acuáticas (Sierra & García, 2012).

### **7.8.5.1 Método**

La técnica empleada fue el test de prueba fotométrica con fotómetro PF-12 plus, el método consiste en molibdato de amonio para formar ácido fosfomolibdico con los fosfatos. Este se reduce a azul de fosfomolibdeno; para esto se hizo uso del Kit de prueba colorimétrica VISOCOLOR ECO Fosfato; Test número 5-84 (MACHEREY-NAGEL, 2022b).

### **7.8.5.2 Procedimiento de análisis**

Para la determinación de fósforo disuelto, se prepara un blanco de la muestra con 5ml de agua destilada al que se le adicionan los reactivos correspondientes, se mezcla y se debe esperar 10 minutos, finalmente se lee este blanco en el fotómetro registrando el código de la muestra y seleccionando el botón llamado “NULL ZERO”; a continuación, se registra el blanco para proceder con las lecturas de las muestras de agua de escorrentía filtradas.

Se adiciona 5 ml de las muestras de agua en los tubos de ensayo con la ayuda de una jeringa de plástico de 5ml o con una pipeta y se añaden 6 gotas de indicador  $\text{PO}_4^{-1}$ , se cierra el tubo y se mezcla, posteriormente se añaden 6 gotas de indicador  $\text{PO}_4^{-2}$ , se cierra y se mezcla nuevamente; se deja reposar la solución por un tiempo de 10 minutos, pasado este tiempo se coloca el tubo de ensayo en el fotómetro seleccionado el botón “M” para realizar la lectura de fosfatos que se observa en la pantalla.

Se registran los resultados con precisión de 2 cifras significativas en la hoja de control, verificando que los valores están dentro del rango de medición de 0,2–5 mg/L  $\text{PO}_4^{-3}$ , por el contrario, si el resultado excede el rango mencionado anteriormente, se debe realizar una dilución para la disminuir la concentración y realizar nuevamente la lectura hasta que se encuentre dentro del rango. El fotómetro arroja resultados en mg/L  $\text{PO}_4^{-3}$  de acuerdo al factor de dilución digitado en el momento de la lectura (MACHEREY-NAGEL, 2022b).

### **7.8.5.3 Parámetro de evaluación**

Según el Ministerio de Salud Decreto 475 del 10 de marzo de 1998 en el Artículo 8 parte b), se especifica como estándares de calidad química para agua con influencia económica o indirecta para la salud humana, con un valor máximo admisible de 0,2 mg/L de fosfatos (Ministerio de Ambiente, 2002).

## **7.9 Propiedades físicas**

### **7.9.1 Turbidez del agua**

La turbidez en el agua es causada por materia suspendida y coloidal como arcilla, sedimentos, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros microorganismos microscópicos. Los valores de turbidez se utilizan para determinar el grado de tratamiento requerido para una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y tasa de filtración óptima, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración, y para determinar la potabilidad del agua (IDEAM, 2007d).

#### **7.9.1.1 Método**

El método empleado es la nefelometría (Método B) del protocolo IDEAM TP0443 versión 1 y NTC 4707 (IDEAM, 2007d).

#### **7.9.1.2 Procedimiento de análisis**

Se deben dejar las muestras en temperatura ambiente, se agitan las muestras en sus recipientes, en una celda limpia se adiciona cuidadosamente la muestra de aproximadamente 25 ml de tal manera que no genere burbujas, se tapa la celda, se

enjuaga y se limpia para que no quede suciedad en las paredes externas, seguido de esto se coloca la celda de la muestra en el porta celdas dentro del turbidímetro, se debe asegurar que la celda entre hasta el fondo en el porta celda; a continuación se alinea la celda y se espera respuesta, después de 6 segundos finalmente se registra el dato en el respectivo formato, luego se retira la celda, se desecha la muestra, y se enjuaga 3 veces con agua destilada. Al finalizar la lectura de muestras se llena la parte inferior del formato de captura (Londoño et al., 2010).

### **7.9.1.3 Parámetro De Evaluación**

Según el decreto 475 de 1998, que establece los requisitos organolépticos y físicos del agua en su artículo 7, el agua potable debe tener valores menores o iguales a 5 unidades nefelométricas (Ministerio de Ambiente, 2002).

## **7.9.2 Sólidos Suspendidos**

Los sólidos son todas las sustancias presentes en los cuerpos hídricos y que son diferentes al agua. Las aguas con una alta concentración de sólidos disueltos suelen tener una baja potabilidad y pueden provocar reacciones fisiológicas perjudiciales para los seres humanos, mientras que un alto contenido de minerales es perjudicial para muchas aplicaciones industriales. Los sólidos tienen diferentes efectos sobre la calidad del agua. El control de los procesos físicos y biológicos en el tratamiento de aguas residuales, así como el cumplimiento de la normativa legal vigente, dependen del análisis de sólidos (Londoño et al., 2010).

### **7.9.2.1 Método**

Se utilizó el método de sólidos suspendidos totales en agua, secados a 103-105°C versión 1 según protocolo IDEAM TP0436 y NTC 897 (IDEAM, 2017).

### **7.9.2.2 Procedimiento de análisis**

Inicialmente se debe insertar el disco de fibra de vidrio tipo Gelman o Crisol de Gooch con la cara rugosa hacia arriba en el embudo de filtración, posteriormente se realiza la succión hasta eliminar los residuos de agua, seguidamente se lleva el disco a la estufa para su secado a 103°C durante una hora, y se enfría en el desecador para su pesaje; después se miden 100mL de muestra o volumen entre 2,5mg y 200mg de residuo y se inserta nuevamente en el filtro del embudo de filtración, se conecta el vacío y se inicia la succión, se filtra la muestra que había sido previamente agitada con el filtro de fibra de vidrio, que posteriormente se lava con 10mL de agua destilada continuando con la succión por tres minutos; finalmente se retira el filtro del embudo y se pone a secar en la estufa a 103°C-105°C durante una hora; cuando el proceso de secado haya terminado se determinara el peso del filtro. Este ciclo de secado, enfriamiento y pesaje debe repetirse hasta que el peso sea constante (Londoño et al., 2010).

### **7.9.2.3 Parámetro de evaluación**

El valor permisible de sólidos suspendidos en descargas de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales es de máximo 100 mg/L, según lo establece la resolución 0631 de 2015 en el artículo 9 (Ministerio de Ambiente, 2015).

## **7.10 Propiedades fisicoquímicas del agua**

### **7.10.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)**

El contenido de materia orgánica biodegradable se usa como medida de la demanda bioquímica de oxígeno. Este indicador responde a la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de la materia orgánica en la muestra de agua y como resultado de la acción de oxidación bioquímica aerobia (Londoño et al., 2010).

### **7.10.1.1 Método**

Para la estandarización del método de demanda bioquímica de oxígeno se utilizó el protocolo por el IDEAM TP0087 y NTC 3630 “Demanda bioquímica de oxígeno, incubación de 5 días y electrometría” (IDEAM, 2015).

### **7.10.1.2 Procedimiento de análisis**

El proceso implica incubar las muestras en recipientes herméticos durante un período de tiempo predeterminado en condiciones específicas. Tanto antes como después de la incubación, se mide la cantidad de oxígeno disuelto (OD) (Londoño et al., 2010).

A lo largo de la prueba, se debe asegurar que el ambiente sea adecuado para el crecimiento y operación de microorganismos; por lo tanto, la muestra debe estar libre de cualquier sustancia tóxica y ser provista de los nutrientes necesarios para el desarrollo bacteriano, como N y P. Adicionalmente, durante la prueba, debe existir una población de organismos conocida como "Cepa" o "Semilla" que sea lo suficientemente grande en número y diversidad de especies para permitir la descomposición de la materia orgánica (IDEAM, 2015).

### **7.10.1.3 Parámetro de evaluación**

El valor límite permisible de demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) en descargas de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales es de 50 mg/L O<sub>2</sub>, tal como lo establece el artículo 9 de la resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente, 2015).

## **7.10.2 Demanda química de oxígeno (DQO)**

Bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo, la demanda química de oxígeno (DQO) mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua. Es una técnica utilizada tanto para aguas residuales como para aguas superficiales (IDEAM, 2007a).

### **7.10.2.1 Método**

Se empleó el protocolo IDEAM TP0086 versión 5 el método de reflujo cerrado y volumetría de la NTC 3629 (IDEAM, 2007a).

### **7.10.2.2 Procedimiento de análisis**

El proceso inicia con la preparación de 6 tubos de digestión como blancos, de los cuales se usarán 3 para la digestión junto con las muestras; con el fin de determinar la concentración del Sulfato Ferroso Amoniacal (FAS); se agita la muestra y se transfieren 2,5mL de esta a un tubo de digestión al que se le agregan con cuidado 1,5mL de solución de digestión y 3,5mL de reactivo de ácido sulfúrico por la pared del tubo hasta que se forme una capa de ácido debajo de la mezcla de muestra y solución digestora. Después el tubo de digestión se tapa y agita, si la muestra tiene una coloración verdosa o azul, indica que se encuentra fuera del rango de lectura por lo que debe repetirse el procedimiento utilizando dicromato de potasio 0,25 N y se titula con sulfato ferroso amoniacal. Se debe medir y registrar el volumen en el formato y en el envase antes de iniciar el análisis.

Seguidamente se colocan los tubos con las muestras, los blancos para digestión y los estándares de control en el microdigestor precalentado a 150°C. Adicionalmente, se debe esperar a que se establezca la temperatura en 150°C y se deja en digestión por 2 horas,

cuando este tiempo ha transcurrido se sacan los tubos y se colocan en una gradilla a enfriar.

Por último, se transfiere cuantitativamente el contenido de cada tubo a un Erlenmeyer marcado con el número de muestra, el blanco o control (IDEAM, 2007a).

### **7.10.2.3 Parámetro de Evaluación**

Los valores límite máximo permisibles en los vertimientos de aguas residuales no doméstico según lo establecido en el artículo 9 de la resolución 0631 de 2015, para la demanda química de oxígeno (DQO) oscilan entre 150 a 200 mg/L O<sub>2</sub> (Ministerio de Ambiente, 2015).

## 8. Resultados y discusión

### 8.1 Escorrentía y pendiente

(Fibras y Normas de Colombia, 2023) definen como escorrentía a la lámina de agua que se mueve sobre la superficie del suelo bajo la acción de la gravedad, esta es generada principalmente por la precipitación y alimenta las corrientes superficiales de las cuencas.

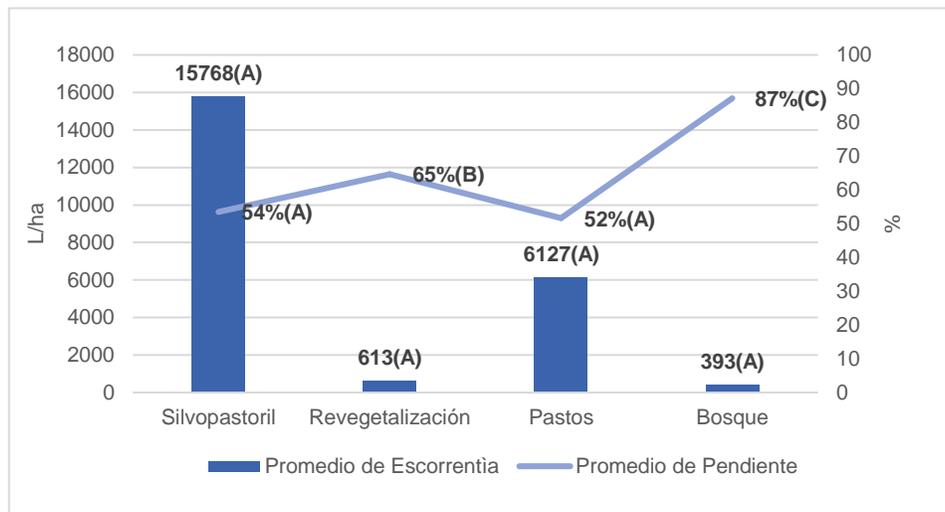
Para (Ruiz & Martínez, 2021) parte del agua producto de la precipitación llega por escorrentía superficial hasta los ríos mientras que, la otra parte se infiltra y transporta a través del perfil del suelo pudiendo acumularse en niveles freáticos, o emerger en manantiales.

Adicionalmente (Castañeda & Barros, 1994) consideran que la infiltración es el flujo de agua que se mueve a través del suelo hacia las zonas no saturadas. Esta capacidad se encuentra en respuesta al volumen de agua por unidad de tiempo y de área total; por otra parte, este comportamiento del agua en el suelo se ve influenciado por el tipo de cobertura vegetal, las características hidráulicas del suelo, el estado de humedad del suelo, la intensidad de la lluvia o cantidad de agua de riego y el laboreo. Con todo esto, encontramos con una correlación negativa entre la infiltración y escorrentía ya que, si bien las dos responden a las propiedades físicas del suelo y al volumen de agua disponible tenemos que, a volúmenes constantes de agua si el suelo aumenta su capacidad de infiltración, la cantidad de agua que queda disponible para moverse superficialmente en el suelo se verá considerablemente reducida.

En la gráfica 1 se presenta la escorrentía acumulada de los 8 meses generada en los sistemas de uso de suelo (Silvopastoril, revegetalización, pastos, bosques), según los resultados obtenidos durante la toma y procesamiento de las muestras de agua, aunque

no se evidenciaron diferencias significativas, el sistema silvopastoril fue el que más generó agua de escorrentía con resultado promedio de 15768 L/ha seguido de pastos con 6127 L/ha, por otra parte los sistemas de revegetalización y bosque generaron menor escorrentía con valores de 613 L/ha y 393 L/ha respectivamente.

**Gráfica 1.** Cantidad promedio de escorrentía debido al porcentaje de pendiente en los diferentes usos de suelo.



Al realizar el test de análisis de varianza, no se encontraron diferencias significativas de la escorrentía generada por los diferentes sistemas de uso de suelo, obteniéndose un margen de error ( $p > 0,05$ ), aunque los valores registrados presentaron extremos marcados en los que el valor mínimo fue de 1,0 y el máximo de 250000 L/ha; al considerar que, entre los valores registrados existe una alta dispersión se hace difícil establecer medidas de tendencia central que den noción sobre las relaciones de significancia existentes entre los datos y, por esta razón se asume que, no existen diferencias significativas entre los resultados de escorrentía arrojados por los sistemas de uso evaluados; a diferencia de la pendiente, en la que, si hubo diferencias significativas entre los sistemas de revegetalización y bosque, contrario a los sistemas de silvopastoril y pastos que presentan un valor de  $p > 0,05$ .

(Alonso, 2011) Describe el silvopastoreo como un sistema en desarrollo dinámico y constante. Su evolución incluye diferentes etapas conocidas como la evaluación de sus componentes que consideran la estructura y composición del propio suelo, y su relación con la flora, fauna, el ciclo de nutrientes, la producción animal y sus derivados, buscando el equilibrio entre prácticas ecológicas y los intereses socioeconómicos.

Al considerar que la infiltración y escorrentía responden a las coberturas y que estas características modifican la dinámica hídrica del suelo encontramos que, para (Montagnini et al., 2015) un sistema silvopastoril puede mejorar la infiltración del suelo por la intercepción de lluvia que el mantillo arbóreo hace reduciendo así la cantidad de agua que llega a la superficie del suelo.

Sin embargo, hay situaciones en las que el sistema silvopastoril es menos eficiente respecto a la infiltración del suelo; una de las razones por la que esto puede darse es por la escasa densidad arbórea y su marco de plantación haciendo que el área de intercepción se vea reducida y por consiguiente, la retención de agua sea menor aumentando así la cantidad de agua que llega al suelo y se mueve superficialmente en este, esto en concordancia con (Velasquez & Jaramillo, 2009) los cuales afirman que, la escorrentía se relaciona negativamente con la cobertura vegetal ya que un incremento en la cobertura disminuye la escorrentía; por otra parte también sustentan que este resultado puede verse reflejado inversamente en áreas muy descubiertas en las que por ausencia de cobertura la escorrentía se ve incrementada.

Adicionalmente (Ramírez et al., 2005) aseguran que, la cobertura vegetal aumenta la porosidad del suelo mejorando la infiltración.

Según un estudio realizado por (Ríos et al., 2008) el pastoreo incide negativamente en la infiltración al aumentar la compactación del suelo por acción del pisoteo del ganado en concordancia a esto (Malagón, 1998) también expone que la compactación origina disminución de la porosidad reduciendo con esto la infiltración, al producir un

endurecimiento superficial aumentando la escorrentía; otro de los factores que puede incidir en el aumento de la escorrentía es la intensidad de la lluvia debido a que influye en el volumen de agua que se mueve por el suelo.

Adicionalmente (Velasquez & Jaramillo, 2009) mencionan que, los cambios en las coberturas vegetales alteran el balance hídrico, sobre todo, en términos de cantidad de agua desplazada por escorrentía.

Para (Jimenez, 2021) los pastos pueden concebirse como plantas gramíneas y leguminosas que se desarrollan en el potrero y que son utilizados para el alimento del ganado, es decir cualquier planta que sea reproducida sobre la superficie del suelo y se aproveche por el ganado para su alimentación.

Sobre la relación entre el sistema de pastos y la escorrentía (Reyna, 2021) ha considerado que el sistema de cultivo de pastos puede disminuir la escorrentía superficial ya que, por su extenso sistema de raíces este posee un gran área radicular activa altamente eficiente para la infiltración al mejorar la estructura porosa del suelo; sin embargo, cuando esta cobertura es de mala calidad o su densidad disminuye por el sobrepastoreo; la capacidad de intercepción de la misma se reduce favoreciendo que, en los espacios resultantes las gotas de lluvia impacten directamente en la superficie del suelo y como se había mencionado anteriormente a este efecto se le suma la disminución de infiltración generada por la compactación superficial.

Por otra parte (Reyna, 2021) considera que la intensidad de la precipitación se correlaciona positivamente con la escorrentía ya que, a medida que la intensidad de la precipitación es mayor la escorrentía aumenta.

En un estudio realizado por (Álvarez, 2013) se analizó la escorrentía subsuperficial en cubiertas experimentales de pasto Kikuyo (*Penisetum clandestinum*), arrojando como resultados que la compactación del suelo tiene una alta relación con la escorrentía, seguido

de la intensidad de los eventos de lluvia y en menor proporción al manejo que se le da a la cobertura vegetal.

(Velasquez, 2013) Define que, los sistemas de revegetalización constan de diferentes plantas en un área determinada en la cual se ha removido la cubierta vegetal por algún tipo de perturbación en el ambiente. El autor menciona que no solo se trata de que la zona afectada se reestablezca sino que sea recuperada lo más pronto posible para que los impactos negativos en el suelo del sistema sean mínimos; ahora bien, este sistema presenta correlación negativa con la escorrentía al garantizar que, con el mejoramiento de la porosidad la capacidad de infiltración se vea favorecida por acción de la diversa vegetación y, adicionalmente las plantas de porte leñoso y arbóreo junto con los pastos al actuar como barrera física reducen la velocidad y fuerza con la que el agua se mueve superficialmente por el suelo; lo anterior se encuentra en concordancia con (Díaz, 2011) al establecer que, la dinámica de infiltración del suelo es favorecida en sistemas de revegetalización ya que estos reducen la velocidad e intensidad del movimiento del agua y mejoran la capacidad del suelo de transportarla a través de sus perfiles. Ahora bien, si la escorrentía y la intensidad de la misma se ven reducidas los niveles de erosión superficial también pueden disminuirse lo que conlleva a un mejoramiento en la calidad del agua de las fuentes hídricas que se ven surtidas principalmente por el agua que se mueve superficialmente en el suelo la cual presentaría una menor concentración de sedimentos que pueden constituir fuentes de contaminación.

Sobre el sistema de bosques (Ramos & Armenteras, 2019) definen que son ecosistemas importantes por la gran diversidad de servicios ecosistémicos que proveen, de la misma manera juegan un papel importante en el ciclo del agua, además favorecen la infiltración aumentando la humedad del suelo y la recarga de acuíferos de los ecosistemas.

Respecto a la interacción entre cobertura arbórea y escorrentía se puede deducir que está es negativa ya que, niveles crecientes de cobertura reducen la escorrentía superficial como efecto de la interceptación que se da en las áreas de dosel, tronco, hojarasca y sistema radicular siendo así, que el agua proveniente de la precipitación se reduce

considerablemente al atravesar la cobertura arbórea en su trayecto hacia el suelo; de este modo, el sistema con menor escorrentía superficial es el de bosques todo esto en concordancia con (Reyna, 2021) que hace mención sobre la alta eficiencia de estos en la reducción de la escorrentía superficial y del aumento de la infiltración; a su vez (Mohammad & Adam, 2010) demostraron que el sistema de bosques es responsable de la reducción de la escorrentía aproximadamente de un 70% en comparación con suelos de pastos.

Según la gráfica 1, otro aspecto importante a relacionar es la pendiente de las parcelas debido a que es un factor importante en la generación de escorrentía al influir sobre la velocidad con la que el agua se mueve sobre el suelo.

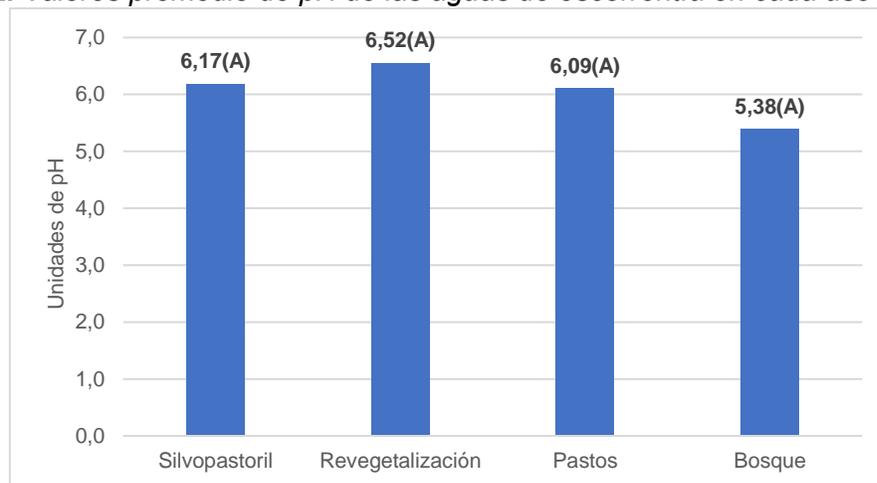
Teóricamente se esperaría que, los sistemas con mayor pendiente presenten una mayor escorrentía ya que, el agua puede moverse con mayor velocidad y fuerza que en terrenos planos; no obstante, se debe considerar que las áreas con pendientes pronunciadas son de difícil laboreo por lo que generalmente se destinan como zonas de reserva forestal siendo lo que sucede en este caso con los sistemas de bosque y revegetalización referenciados en la gráfica 1 de los que se esperaría una mayor escorrentía no obstante, al considerar el tipo de vegetación presente en estas áreas se puede establecer que los bajos niveles de escorrentía se ven mediados por la intercepción arbórea y la disminución de la velocidad en el movimiento superficial del agua como resultado del efecto de barrera que esta vegetación ejerce en dichos sistemas en los que, a medida que el agua avanza con menor velocidad una porción considerable se infiltra o evapora mientras que una pequeña fracción continúa con su tránsito sobre la superficie del suelo.

Por otra parte, en los sistemas de pastos y silvopastoril con pendientes menos pronunciadas que de los anteriores sistemas se presentaron mayores valores de escorrentía superficial en consecuencia con la baja cantidad y calidad de sus coberturas por lo que, el agua impacta y circula con mayor facilidad; contrario a los anteriores sistemas que presentan impedimentos físicos propios de las coberturas para el ingreso y movimiento del agua en el suelo.

## 8.2 pH del agua.

La gráfica 2 indica que los valores de pH del agua no tuvieron diferencia significativa en el análisis estadístico con un  $p > 0,05$  ya que se encontraron resultados que están entre 5,18 como valor mínimo y 8,07 como máximo; adicionalmente el comportamiento del pH en los sistemas de uso de suelo (Silvopastoril, revegetalización, pastos, bosque) se mantuvieron estables con una tendencia promedio de pH de 6,2 aproximadamente, por lo que podría decirse que estas aguas con valores de pH cercanos a la neutralidad más exactamente dentro de la clasificación ligeramente ácida, pero dentro de un rango aceptable para la mayoría de los usos que no representa riesgo significativo para la salud humana o el medio ambiente, sin embargo este indicador se puede ver afectado por diferentes causas, que incluyen la geología del suelo, la presencia de materia orgánica, la lluvia y otros factores ambientales.

**Gráfica 2.** Valores promedio de pH de las aguas de escorrentía en cada uso de suelo.



Según un estudio realizado por (Loera et al., 2019) la variación de pH en aguas agrícolas fluctúa entre 7,0 y 7,8, mientras que el pH del agua de lluvia osciló entre 4,3 y 6,0; Por otra parte, el rango de pH medido en los diferentes sistemas de uso de suelo del presente estudio se situó entre 5,38 y 6,52. Adicionalmente los autores señalan que, cuando la escorrentía se descarga directamente en los embalses de agua naturales, el aumento del

pH en el agua de escorrentía en comparación con el agua de lluvia indica una rápida neutralización de las depositaciones ácidas, fenómeno ventajoso para el medio ambiente. En contraste, el sistema de bosques presentó el menor valor de pH con promedio de 5,30 lo que indica que su agua de escorrentía es ácida. Según (Andina, 2008) el pH es crucial para la calidad de agua ya que, este limita el potencial para la vida acuática y muchos usos relacionados con el agua, además menciona que los cambios en el pH se producen debido a la presencia de desechos industriales, el drenaje de la minería, el lavado de minerales y la acidificación del suelo causada por la lluvia ácida.

Adicionalmente (Pérez, 2021) considera que la lluvia ácida es aquella que ha estado expuesta a la atmósfera y ha adquirido óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno; cuando esta lluvia cae sobre el suelo, puede disolver ciertos nutrientes y minerales, como Calcio y Magnesio, que son esenciales para mantener un pH saludable en el suelo. La acidificación del suelo puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas y la salud general del ecosistema. Sin embargo, la presencia de árboles y otros tipos de vegetación en los sistemas forestales puede ayudar a mitigar estos efectos al absorber dióxido de carbono de la atmósfera y liberar oxígeno.

En relación con lo anteriormente mencionado, se hace importante monitorear regularmente el pH del agua de escorrentía para detectar cualquier cambio o tendencia a largo plazo ya que, niveles extremos pueden indicar un problema ambiental o de calidad del agua.

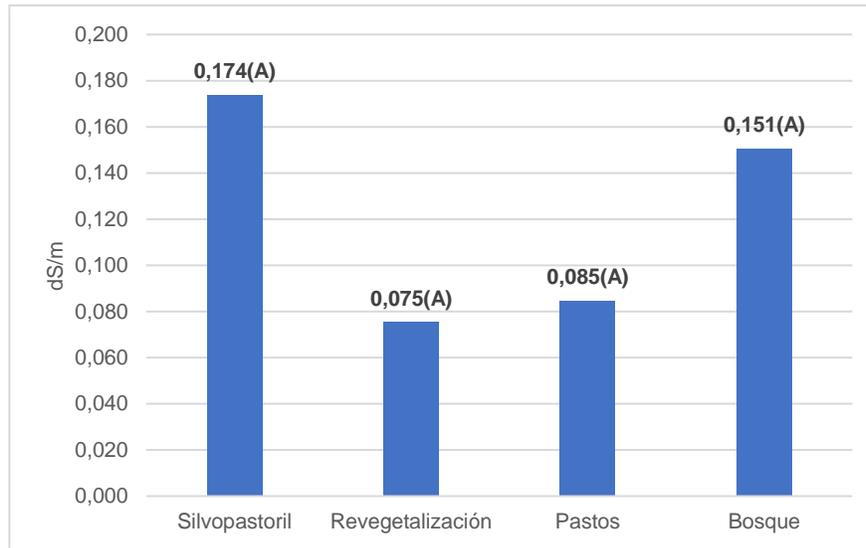
Según el Decreto 475 de 1998 del Ministerio del Ambiente, de conformidad con los artículos 10 y 39, el valor del potencial de hidrógeno (pH) del agua potable debe estar entre 6,50 y 9,00 (Ministerio de Ambiente, 2002). En este caso, las aguas estudiadas no entrarían dentro de este rango ya que, los valores de pH para las aguas de todos los sistemas de uso de suelos se encuentran por debajo del valor mínimo contemplado en el rango de admisibilidad al tener un valor promedio de pH que se encuentra en 6,04 catalogable como ligeramente ácido y que puede ser limitante en términos de calidad sobre todo, si se destinara para consumo humano por lo que, de ser así estas aguas deberían someterse a un tratamiento de estabilización de pH; no obstante, por la cercanía que estos

valores presentan a la neutralidad se considera que, no representan un peligro para la salud o el medio ambiente. Adicionalmente, la limitación mayor en términos de pH se encuentra en las aguas del sistema de bosques con un valor reportado de 5,38.

### **8.3 Conductividad eléctrica (CE).**

En la gráfica 3 se observa que, los valores promedio de conductividad eléctrica (CE) son mayores en los sistemas de silvopastoril con 0,174 dS/m y bosque con un valor de 0,151 dS/m mientras que, para los sistemas de revegetalización y pastos los valores registrados en las aguas de escorrentía fueron menores siendo 0,0755 dS/m y 0,0850 dS/m respectivamente, esto indica que, hay menor presencia de sales y nutrientes disueltos en las aguas provenientes de los sistemas de revegetalización y pastos lo que traduciría en una menor contaminación salina y un mayor grado de conservación del suelo; por otra parte, los sistemas de silvopastoril y bosques exceden el valor de 0,150 dS/m determinado en la normativa; en el caso del primero este comportamiento puede ser generado por el excremento de los animales que aporta sales a la solución del suelo en su proceso de descomposición las cuales posteriormente son movilizadas hasta los afluentes por medio de las escorrentías; adicionalmente, el valor por encima del rango para CE en el sistema de bosques podría explicarse como producto de la acumulación de materia orgánica en descomposición que libera compuestos solubles en agua, como ácidos húmicos y fúlvicos además de iones y compuestos orgánicos como nitratos o fosfatos provenientes de la descomposición de ramas y hojas que al momento ser transportados por el agua de escorrentía pueden aumentar la concentración de iones y, por lo tanto la CE.

**Gráfica 3.** Valores promedio de la conductividad eléctrica de las aguas de escorrentía en los diferentes usos de suelo.



Estadísticamente entre la conductividad eléctrica de los diferentes sistemas de uso evaluados, no se encontraron diferencias significativas al obtener un  $p > 0,05$ , se presentaron valores de muestreo mínimo y máximo de 0,0232 dS/m y 1,938 dS/m respectivamente.

(Gualdrón, 2016) Analizó las características físicas, químicas y microbiológicas de diferentes ríos de Colombia y determinó el índice de calidad de agua (ICA) de los ríos estudiados, donde obtuvo valores de CE con un promedio de 0,0545 dS/m; el autor menciona que este valor está bastante por debajo de lo establecido para la calidad de agua potable (2 dS/m) de la misma manera, el valor de conductividad reportado se encuentra dentro del rango establecido para ríos, el cual está dentro de 0,03 – 0,06 dS/m.

(Loera et al., 2019) Evaluaron la calidad de agua de escorrentía para uso agrícola, además de determinar pH y CE, teniendo como resultado valores entre 0,103 y 0,373 dS/m, según los autores en conformidad a los criterios ecológicos CE-CCA-001/89 estos valores son bajos. En otro estudio realizado por (Chaplot et al., 2018) en Sudáfrica, se reportan valores

de 0,0614 dS/m en el agua de una presa aguas abajo, en el que se asocia este valor con el transporte lateral de sólidos por escorrentía superficial.

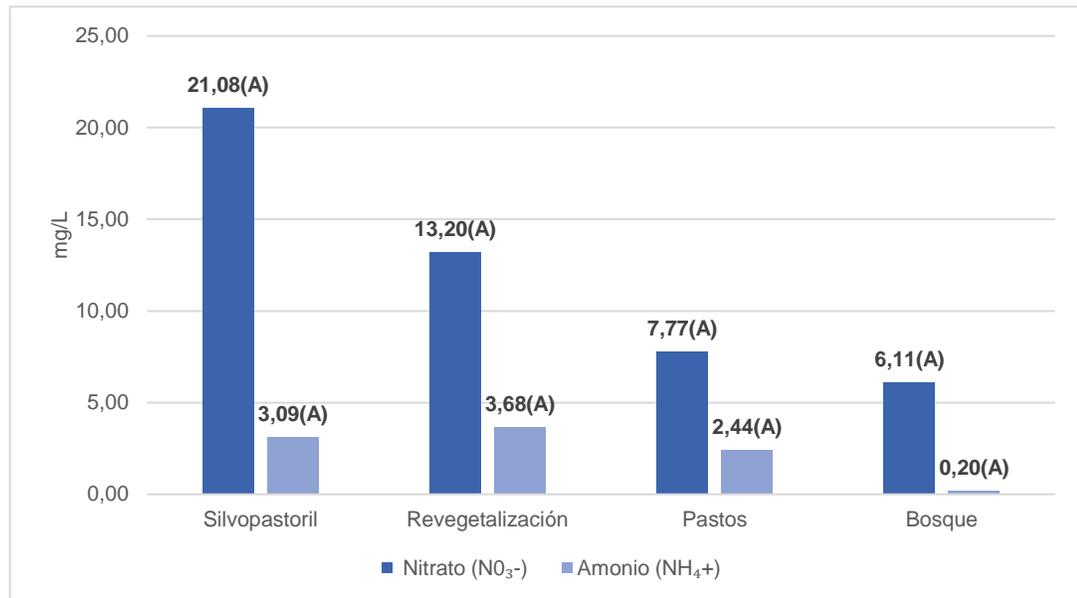
El decreto 475 de 1998, establece en los requisitos organolépticos y físicos del agua en su artículo 36, que el valor permisible de la CE en agua potable debe ser menor a 1500 micro Siemens/cm o 0,150 dS/m (Ministerio de Ambiente, 2002). Este mismo parámetro se encuentra en el artículo 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015 donde se establecen los criterios de calidad de agua residual para uso agrícola (0,15 dS/m) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). Adicionalmente, los valores promedio de CE medidos en las aguas de escorrentía de los sistemas de revegetalización y pastos se encuentran dentro de este parámetro con valores de 0,075 dS/m y 0,085 respectivamente, a diferencia de los sistemas de silvopastoril y bosques que sobrepasan este parámetro.

## **8.4 NITRATOS ( $\text{NO}_3^-$ ), AMONIOS ( $\text{NH}_4^+$ ).**

En la gráfica 4 se aprecian los valores promedio de Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y Amonios ( $\text{NH}_4^+$ ) y como se observa en esta, para todos los sistemas de uso de suelo (Silvopastoril, revegetalización, pastos, bosque) se destacaron en mayor proporción los valores de nitratos con respecto a la otra variable (amonios).

Pudiese ser que, la mayor presencia de nitratos en las aguas de escorrentía en comparación con el amonio se deba a la alta solubilidad de los nitratos en el agua por lo que, pueden moverse más fácilmente a través del suelo. En el sistema silvopastoril, al haber más materia orgánica en proceso de descomposición, se tendrá una mayor actividad bacteriana y, por lo tanto, una conversión más alta de nitrógeno orgánico a nitratos; además, en este sistema generalmente se encuentran menores cantidades de nitrógeno fijado por la actividad biológica, lo que aumenta la proporción de nitratos en relación con el amonio.

**Gráfica 4.** Contenidos promedio de Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), Amonios ( $\text{NH}_4^+$ ) en el proceso de escorrentía por uso de suelo.



Dentro del análisis estadístico, no se encontraron diferencias significativas entre nitratos y amonios de los diferentes sistemas de uso evaluados, obteniéndose un  $p > 0,05$  ya que, en el caso de nitratos los valores mínimos y máximos fueron de 0,10 mg/L y 347,20 mg/L respectivamente, seguidamente para amonios los valores mínimos y máximos de 0,10 mg/L y 31,0 mg/L.

### 8.4.1 Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).

Las pérdidas de nitratos calculadas en las aguas de escorrentía son mayores para el sistema de silvopastoril con valores promedio de 21,08 mg/L, seguido de revegetalización con 13,20 mg/L, mientras que, los sistemas de pastos y bosques presentaron las menores pérdidas con 7,77 mg/L y 6,11 mg/L respectivamente.

Estadísticamente como se mencionó anteriormente considerando la alta dispersión entre las concentraciones de nitratos con 0,10 y 347,20 mg/L como valores mínimos y máximos, no se encontraron diferencias significativas para estos, obteniéndose un  $p > 0,05$ .

(Rodríguez et al., 2005) mencionan que las cubiertas vegetales pueden ser útiles para limitar la dispersión de contaminantes debido a su capacidad para reducir el flujo de escorrentía. Por otro lado, los sistemas de manejo de suelos son muy dependientes de la cantidad de nitrógeno soluble en el agua de escorrentía. Los sistemas con cobertura almacenan el nitrato del suelo durante la temporada de lluvias, lo inmovilizan y lo liberan a través de la mineralización una vez que la cubierta ha muerto; sin embargo, el comportamiento evidenciado en las parcelas experimentales no coincide con los autores ya que, en esta se reporta para los cuatro usos de suelo la presencia de nitratos en todas las coberturas vegetales con mayores cantidades en los sistemas de revegetalización y silvopastoril, esto posiblemente por la actividad ganadera, así como la acumulación de hojas y ramas en el suelo. Además, la presencia de árboles en estos sistemas puede facilitar el proceso de nitrificación, que convierte el amonio en nitrato y aumenta la concentración de nitratos en el agua de escorrentía. En cuanto al sistema de revegetalización se puede explicar que los nitratos son más frecuentes en las aguas de escorrentía debido a que las plantas fijan el nitrógeno atmosférico y luego lo liberan en el suelo y el agua a través de procesos biológicos. La adición de plantas fijadoras de nitrógeno a los sistemas de revegetalización generalmente aumenta la cantidad de estas especies minerales en el suelo y el agua.

Por otra parte, los sistemas de uso de pastos y bosques presentaron niveles bajos de nitratos en el agua de escorrentía superficial; debido a que, la biomasa vegetal funciona como un filtro natural que retiene y absorbe una porción considerable de los nutrientes antes de que lleguen al suelo y se infiltren en él haciéndolos menos solubles y más resistentes a la lixiviación.

(Rodríguez et al., 2005) También mencionan que el aporte de nitratos en suelos utilizados para usos agrícolas que están relacionados con procesos de erosión y escorrentía junto

con los plaguicidas, son los principales elementos y la fuente más peligrosa de contaminación agrícola difusa. Las descargas de estos elementos pueden ser producidos por su movimiento en el agua de drenaje o por el proceso de escorrentía a través de la erosión; también mencionan que el nitrato es el principal contaminante de las aguas de escorrentía por medio de las prácticas tradicionales de fertilización, debido a la utilización de abonos exclusivamente de fuentes nitrogenadas y que en muchas ocasiones permanecen en la superficie.

Según la norma colombiana en la Resolución 2115 de 2007, la concentración de nitratos para el agua potable debe ser menor o igual a 10 mg/L de  $\text{NO}_3^-$  (IDEAM, 2013). Los resultados obtenidos en los sistemas de pastos y bosques se encuentran dentro de ese rango ya que sus valores son inferiores a este parámetro (7,77mg/L y 6,11 mg/L respectivamente) por el contrario, el agua de escorrentía generada por los sistemas de silvopastoril y revegetalización tuvo valores superiores a 10 mg/L (21,08 mg/L y 13, 20 mg/L respectivamente), lo cual podría generar implicaciones químicas para el agua, también de carácter económico y repercutir adicionalmente sobre la salud.

El decreto 1076 de 2015 en los artículos 2.2.3.3.2.5 y 2.2.3.3.2.8 establece en los criterios de calidad de aguas residuales para el uso agrícola que el valor máximo permisible de nitratos es de 11 mg/L (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021); es decir, que solo las aguas de escorrentía provenientes de los sistemas de pastos y bosques cumplen con esta normativa para su utilización con fines agropecuarios ya que sus valores están dentro del rango permitido (7,77mg/L y 6,11 mg/L); por el contrario, de los sistemas silvopastoril y revegetalización los valores de nitratos en las aguas de escorrentía sobrepasan este parámetro, sin embargo (Sarabia et al., 2011) consideran que concentraciones altas de nitratos no implican inconvenientes y no lo consideran restrictivo para uso agrícola dado que, este elemento se encuentra en cualquiera de sus formas y es transformado o transferido directamente para llevar a cabo sus funciones fisiológicas, no obstante la toxicidad de los nitratos debe considerarse cuando el agua se utiliza para consumo humano. Los mismos autores recomiendan que se deben apreciar estos valores cuando se utilicen fertilizantes, ya que se estima que utilizando agua de riego con una

concentración de nitratos de 25 mg /L-1 se agregarían 40 kg de nitrógeno al suelo por hectárea.

### **8.4.2 AMONIOS (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).**

Las pérdidas de amonios calculadas en las aguas de escorrentía son mayores para el sistema de revegetalización con un valor promedio de 3,68 mg/L, seguido de silvopastoril con 3,09 mg/L, por el contrario, los sistemas de pastos y bosques obtuvieron los valores más bajos entre 2,44 mg/L y 0,20 mg/L como se observa en la gráfica 4.

Estadísticamente como se establece en la gráfica 4, no se evidencian diferencias significativas para las concentraciones de amonios en las aguas de los sistemas evaluados, obteniéndose un  $p > 0,05$ ; en el que se encontraron valores mínimos de 0,10 mg/L y máximos de 31,0 mg/L respectivamente.

El aumento de los valores de amonios en el agua de escorrentía del sistema de revegetalización se puede presentar por el uso de fertilizantes químicos nitrogenados al revegetalizar áreas degradadas. Estos fertilizantes pueden contener grandes cantidades de nitrógeno amónico, que la escorrentía puede llevar a los cuerpos de agua cercanos. Además, la revegetalización implica a menudo la introducción de leguminosas, que tienen relación simbiótica con bacterias que fijan el nitrógeno atmosférico en el suelo en forma de amonios, si se producen fuertes lluvias poco después de que estas bacterias fijen el nitrógeno, la lluvia puede lavar el amonio y llevarlo a cuerpos de agua cercanos.

Como lo mencionado por (García, 2011) estas bacterias fijadoras de nitrógeno viven libres o en simbiosis con plantas que son esenciales para fijar nitrógeno tanto como nitratos y amonios. Estas bacterias absorben nitrógeno directamente del aire, produciendo compuestos que pueden incorporarse al suelo o componentes biológicos, de esta manera, el nitrógeno atmosférico comienza a circular y es absorbido por las plantas, los herbívoros continúan el ciclo sintetizando proteínas y los carnívoros obtienen proteínas de estos, luego

el nitrógeno se devuelve al suelo, ya sea a través de los excrementos o cuando el cadáver se descompone; los animales forman iones de amonios (amoníaco, urea o ácido úrico) que son altamente tóxicos y deben eliminarse. Lo mismo podría suceder con el sistema de silvopastoril ya que, la gran cantidad de estiércol y/o fertilizantes nitrogenados utilizados por la agricultura y la ganadería puede contribuir a las concentraciones más altas de amonios en las aguas de escorrentía en comparación con otros sistemas naturales como los bosques. Además, una menor cobertura vegetal en los sistemas silvopastoriles también puede contribuir a una mayor lixiviación de amonios en el agua de escorrentía. Este ciclo termina con la intervención de ciertas bacterias llamadas desnitrificantes; estas bacterias devuelven grandes cantidades de nitrógeno inorgánico del suelo.

En relación con los resultados obtenidos otra parte del agua de escorrentía en los sistemas de pastos y bosques puede tener un bajo contenido de amonios; probablemente por la capacidad de los árboles y las plantas para absorber y retener nutrientes en el suelo, así como a una mayor actividad microbiana que ayuda a convertir el amonio en nitrato y otros compuestos, además los pastos y bosques tienden a poseer mayor cobertura vegetal y menos actividad animal, lo que reduce la erosión, y por consiguiente la cantidad de amonio transportado por el agua de escorrentía.

De acuerdo con (Blasco, 2017) el amonio ingresa a los suministros de agua a través de la escorrentía de las áreas agrícolas, donde se aplican fertilizantes, o de la generación de desechos metabólicos (como la urea o el ácido úrico) de las instalaciones ganaderas. Desde estas fuentes, el amonio encuentra fácilmente su camino hacia el acuífero y desde allí continúa a través de diferentes partes del ciclo del agua, lo que podría generar toxicidad para la fauna y los humanos. El autor también considera que la presencia de altas concentraciones de amonios en las aguas superficiales es dañina (tóxica) para una amplia gama de organismos acuáticos y también puede conducir a un aumento de las concentraciones de nitrito y nitratos en los ecosistemas acuáticos y los suministros de agua potable por catálisis o colonización accidental de filtros por bacterias oxidantes de amonio.

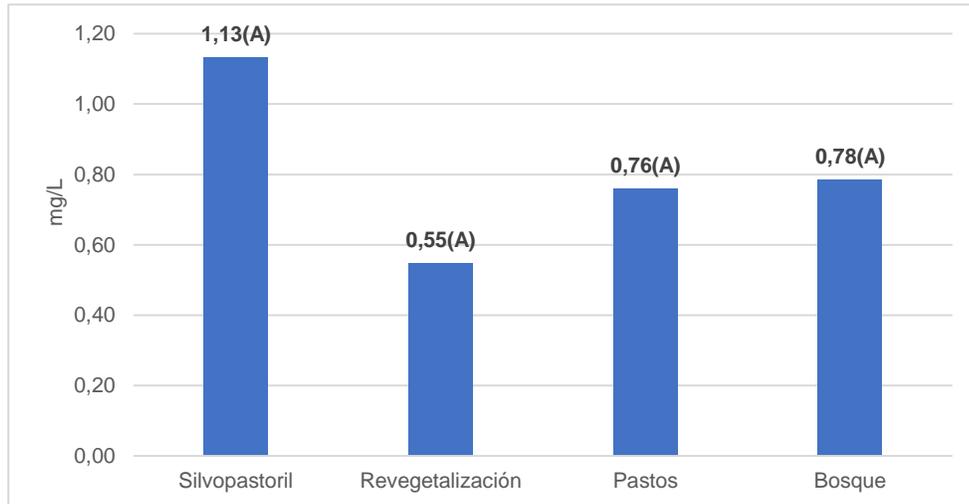
(Márquez, 2021) expone que los bajos niveles de amonios puede deberse al periodo de traslado de las muestras de aguas residuales, ya que se cree que debido a la liberación de este compuesto que se produce antes de ser llevado al laboratorio para su posterior análisis aun cuando las muestras fueron refrigeradas durante su movilización. Adicionalmente (Cárdenas & Sánchez, 2013) establecen que los aumentos en las temperaturas sobre todo por encima de 20 °C favorecen la remoción biológica del nitrógeno al afectar la dinámica de los organismos responsables de los procesos de transformación de este elemento.

Según (Ministerio de ambiente, 2018) en la resolución 0883 de 2018 artículo 9 se especifica como parámetro fisicoquímico y sus límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales no domésticas un valor máximo admisible de 5 mg/L de nitrógeno amoniacal. Este mismo parámetro lo establece (FAO, 1994) para las aguas de uso agrícola en las cuales el amonio debe estar entre 0 – 5 mg/L. En las aguas evaluadas respecto a la concentración de amonio, estas podrían considerarse como de buena calidad ya que, en las aguas de escorrentía de los diferentes sistemas de uso de suelo este elemento no supera los valores establecidos por las diferentes entidades (0,20 mg/L – 1,13 mg/L).

### **8.4.3 Fosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ ).**

Como se aprecia en la gráfica 5, estadísticamente no se encontraron diferencias significativas para los valores de fosfatos entre los sistemas evaluados, al obtener un  $p > 0,05$  debido a la alta dispersión entre los datos mínimos y máximos encontrados desde 0,20 mg/L y 5 mg/L respectivamente.

**Gráfica 5.** Contenidos promedio de Fosfatos ( $PO_4^{-3}$ ) en el proceso de escorrentía por uso de suelo.



Adicionalmente, el promedio de las concentraciones de fosfatos para los diferentes usos de suelo fue relativamente bajo y, en el sistema de silvopastoril se encontró la mayor cantidad de fosfatos en las aguas de escorrentía con resultado de 1,13 mg/L, por otra parte, para los demás sistemas (revegetalización, pastos y bosques) los valores fueron de 0,55mg/L, 0,76mg/L y 0,78 mg/L, todos superiores al valor máximo admisible de 0,2 mg/L de fosfatos para agua potable, de acuerdo con (Ministerio de Ambiente, 2002); contrario a lo que establecen (Ayers et al., 1985), que indican que el parámetro admisible de fosfatos en aguas para uso agrícola comprende valores entre 0 – 2 mg/L, es decir que las aguas de escorrentía obtenidas de las parcelas con los diferentes sistemas de uso se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la FAO para el uso agrícola, pero estarían limitadas para uso humano directo sin potabilización.

Se puede explicar que el aumento de los niveles de fosfatos en el agua de escorrentía de los sistemas silvopastoriles es producto de la aplicación de fertilizantes fosforados en la producción de pasturas y alimentos para el ganado, aumentando así la cantidad de fósforo en el suelo que puede ser lixiviado con el agua de lluvia y la escorrentía.

(Blasco, 2017) Menciona que el fósforo no se vuelve tóxico en altas concentraciones, pero cuando se combinan grandes flujos de P y N se pueden promover procesos de eutrofización a gran escala en los cuerpos de agua; para poder predecir estos efectos, se debe tener en cuenta la concentración de fósforo en los cuerpos fluviales considerando que, la mayoría de las aguas superficiales tienden a mostrar bajas concentraciones de fosfatos. El autor también señala que el fosfato ingresa a las vías fluviales a través de los desechos humanos y animales, las rocas madre ricas en fósforo o los fertilizantes y otras fuentes; la acumulación de estos fosfatos puede nutrir las plantas acuáticas, lo que finalmente conlleva a la eutrofización.

(Arteaga et al., 2019) Exponen que los fertilizantes utilizados en la agricultura contienen principalmente fosfatos, que se infiltran a las aguas subterráneas a partir de la escorrentía de los campos agrícolas. Aunque el fósforo es importante para los ecosistemas, grandes cantidades de este pueden conducir a la eutrofización de los cuerpos de agua, causada por el exceso de nitrógeno (N) y fósforo (P), lo que conduce a un aumento de las algas y disminución del oxígeno disuelto.

(Bolaños et al., 2017) también mencionan que, cuando hay una mayor concentración de fosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ ), las algas crecen en exceso, lo que a su vez afecta la cantidad de oxígeno en el agua. El ion fosfato normalmente funciona como un nutriente para el crecimiento de las algas y, en consecuencia, generaría el crecimiento descontrolado de materia orgánica viva, lo que provoca una mayor tasa de descomposición y, en última instancia, un claro proceso de eutrofización. También señalan que el estiércol y otros tipos de desechos orgánicos de la agricultura pueden contribuir a la alta concentración de fosfatos, al igual que los componentes y minerales naturales del suelo. Estas fuentes de contaminación frecuentemente terminan en zanjas, canales, arroyos, ríos y lagos representando un riesgo ambiental significativo. Para (Lavie et al., 2010) la contaminación por fosfatos generalmente se ve como resultado directo del uso de fertilizantes por parte de la agricultura en la que en las actividades productivas no se respetan las zonas de amortiguación.

Para (Valera, 2016) las altas concentraciones de fosfatos en cuerpos de agua superficiales pueden llegar a ser nocivas para la salud del agua, la fauna acuática y representar un peligro para los consumidores de estas aguas tanto animales como humanos ya que, por la baja concentración de oxígeno disuelto en el agua pueden generarse toxinas peligrosas para quien las consume; adicionalmente el crecimiento descontrolado de algas modifica negativamente la dinámica poblacional de la flora y fauna acuáticas.

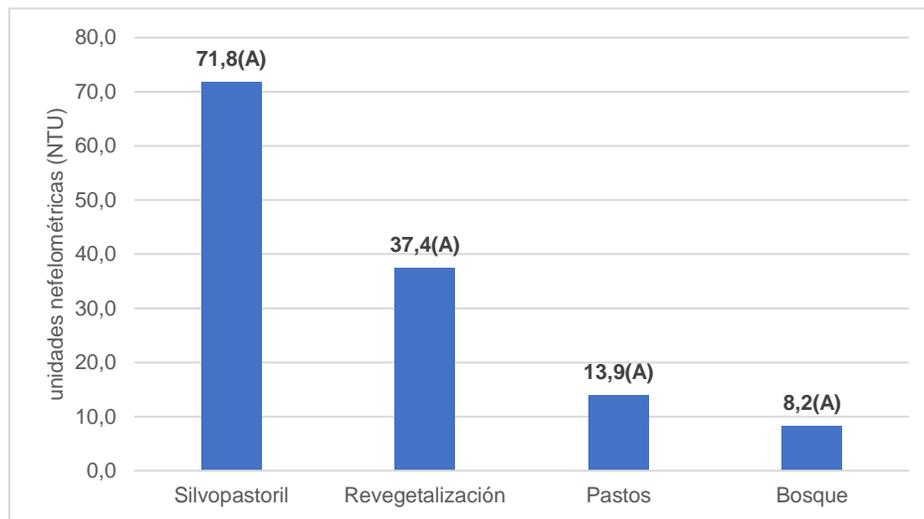
Por otra parte, para (Valera, 2016) la presencia de fosfatos en los diferentes cuerpos de agua proviene principalmente de actividades antrópicas en las que la agricultura y las industrias aportan las mayores cantidades de fosfatos a las aguas.

Comparando los resultados obtenidos con el Decreto 475 del 10 de marzo de 1998 en el Artículo 8 inciso b, donde se especifican como estándares de calidad química para agua con influencia económica o indirecta para la salud humana, un valor máximo admisible de 0,2 mg/L de fosfatos (Ministerio de Ambiente, 2002), considerando esto se evidencia que, los recursos hídricos del área de estudio no cumplen con este criterio de calidad, dado que en ningún muestreo se obtuvieron valores promedio inferiores al umbral establecido para las calidades de agua buenas/moderadas ya que, los valores se encuentran entre 0,55 mg/L – 1,13 mg/L.

#### **8.4.4 Turbidez.**

Los resultados expuestos en la gráfica 6 muestran que los mayores niveles de turbidez se encuentran en el sistema silvopastoril con valores promedio de 71,8 NTU, seguido de revegetalización con 37,4 NTU; en contraste, los sistemas de bosques y pastos presentaron valores más bajos de 8,2 NTU y 13,9 NTU respectivamente.

**Gráfica 6.** Cantidad promedio de Turbidez del proceso de escorrentía por cada uso de suelo.



Estadísticamente, no se encontraron diferencias significativas de la turbidez entre los diferentes usos de suelo evaluados, obteniéndose un  $p > 0,05$  aunque se determinaron valores mínimos de 0,30 NTU y máximos de 798,50 NTU.

La mayor turbidez en el agua de escorrentía en los sistemas silvopastoriles (71,8 NTU) puede deberse a la presencia de sedimentos y partículas finas de suelo que son arrastradas por la escorrentía debido a las actividades de pastoreo y pisoteo del ganado en el suelo, así como a la exposición de este, al sol y la lluvia. Además, la eliminación de la cubierta vegetal también puede conducir a una mayor turbidez en el agua. De la misma manera podría suceder con el sistema de revegetalización por la presencia de partículas sueltas, provenientes posiblemente de la erosión del suelo, y la acción antrópica.

Se cree que, la turbidez podría darse por la presencia de residuos vegetales en el agua que se descomponen liberando estas partículas en suspensión; para reducir este fenómeno, se pueden tomar medidas como la construcción de barreras de contención o la implementación de medidas de conservación del suelo. Por el contrario, los sistemas de pastos y bosques pueden ayudar a filtrar y retener sedimentos y partículas en el suelo por la presencia de vegetación, reduciendo así la turbidez del agua de escorrentía, además

estos sistemas tienen mayor capacidad de retención de agua, lo que disminuye la velocidad de flujo permitiendo que el agua tenga más tiempo para infiltrarse en el suelo antes de llegar a los cueros hídricos cercanos reduciendo así la cantidad de sedimentos y partículas transportadas en el agua de escorrentía, generando menor turbidez.

Para (Cedeño & Mendoza, 2016) la turbidez es una propiedad perceptible de una suspensión, lo que hace que la luz se procese en lugar de transmitirse a través de ella; la turbidez en el agua es producida por la diversidad de materiales en suspensión de diferentes tamaños, desde dispersiones disueltas en partículas gruesas, limo, arcilla, materia orgánica e inorgánica y microorganismos.

Adicionalmente (Marcó et al., 2004) consideran que la turbidez es muy importante ya que, refleja el contenido de material coloidal, mineral u orgánico en el agua y, por lo tanto, puede ser un indicador de contaminación. Los autores también consideran que niveles elevados de turbidez protegen a los microorganismos de la desinfección, estimulan el crecimiento bacteriano y aumentan la demanda de cloro. En muchos casos, es imposible destruir los patógenos y bacterias fecales que se agrupan o absorben en los gránulos; también productos químicos peligrosos como metales pesados y organoclorados, que se combinan principalmente con ácido húmico y otras partículas orgánicas son difícilmente removidos del agua. Otro aspecto importante es que los componentes de las partículas orgánicas generadoras de turbidez también servirán como nutrientes para los microorganismos que logran eludir los tratamientos a los que se someten las aguas en las plantas de potabilización.

(Marcó et al., 2004) Mencionan que, aunque la medida nefelométrica de la turbidez no está estrictamente relacionada con el tamaño y número de partículas involucradas en cada muestra, se puede usar como medida no científica de la concentración de partículas.

En un estudio realizado por (Gualdrón, 2016) se analizaron las características físicas, químicas y microbiológicas de diferentes ríos de Colombia determinando el índice de

calidad de agua (ICA) de los ríos estudiados. En dicha investigación se encontraron altos niveles de turbiedad y sólidos disueltos totales; con valores bastante variables donde la mayoría de ellos se ubicaron por encima de 5 NTU sobrepasando el valor límite máximo permisible por la normativa colombiana, con valores promedio de 49,9 mg/L de partículas en suspensión que reducen la visibilidad o transparencia del agua; y que llegan a los caudales por arrastre de suelo o en otros casos por vertimientos de uso industrial o urbano. Los autores señalan que este parámetro afecta directamente a los organismos ya que, reduce la visibilidad lo que a su vez dificulta la alimentación disminuyendo su producción primaria. Los resultados encontrados en literatura coinciden con los obtenidos en las aguas evaluadas dentro de este estudio en donde se reportan valores de turbidez que superan los máximos permisibles por la normativa colombiana; estando por encima de 5 NTU por lo que su tratamiento puede ser complejo ya que, dentro de los aglomerados generadores de turbidez pueden hallarse elementos contaminantes además de organismos altamente nocivos para la salud que por encontrarse encapsulados presentan una susceptibilidad reducida a los procesos de potabilización.

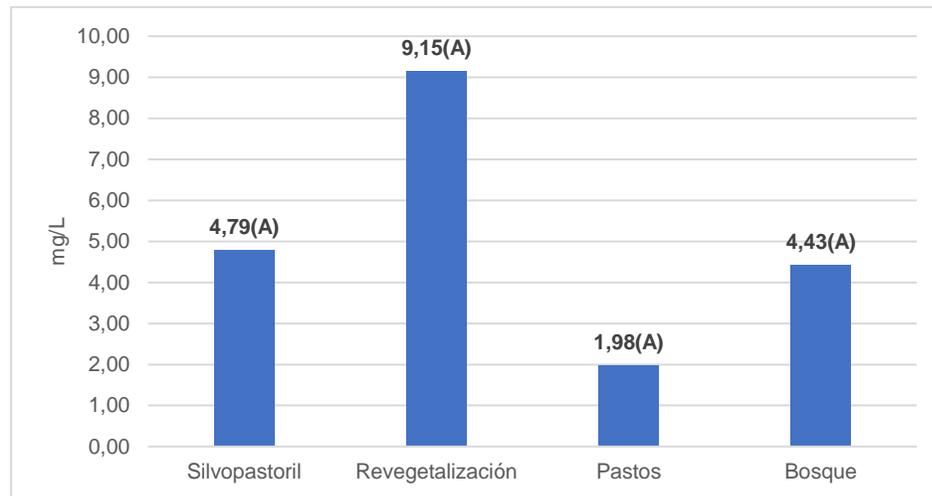
Comparando los resultados obtenidos, con el Decreto 475 de 1998, artículo 7 en el que se establece que, el agua potable debe tener valores menores o iguales a 5 unidades nefelométricas (NTU) (Ministerio de Ambiente, 2002). Los resultados obtenidos están muy por encima del parámetro establecido, ya que comprenden valores entre 9,2 NTU en bosque a 71,8 NTU en Silvopastoril. (Marcó et al., 2004) mencionan que hay riesgos que se acentúan cuando la turbidez está por encima de 5 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez), también comentan que el valor no debe excederse para ninguna muestra. Por lo tanto, la turbidez debe ser baja para que la desinfección sea efectiva reduciendo así el riesgo de que el agua potable lleve toxinas que contribuyen a diversas enfermedades crónicas.

## **8.5 Sólidos suspendidos.**

Según lo que puede observarse en la gráfica 7 todas las concentraciones de sólidos suspendidos se encuentran por debajo de los límites establecidos en la normativa

colombiana (100 mg/L) teniendo para los sistemas de silvopastoril, revegetalización, pastos y bosques valores 4,79 mg/L, 9,15 mg/L, 1,98 mg/L y 4,43 mg/L respectivamente.

**Gráfica 7.** Cantidad promedio de sólidos suspendidos del proceso de escorrentía por cada uso de suelo.



No se encontraron diferencias significativas de sólidos suspendidos entre los diferentes usos de suelo evaluados, obteniéndose un  $p > 0,05$ , con valores de muestreo mínimo y máximo de 0,10 mg/L y 85,00 mg/L respectivamente.

Si buscamos una explicación para los bajos niveles de sólidos suspendidos en las aguas de escorrentía de los sistemas evaluados podemos establecer que inicialmente para los sistemas silvopastoriles, la presencia de árboles y vegetación arbórea puede actuar como barrera física para interceptar y retardar la escorrentía superficial. Esto ayuda a prevenir la erosión del suelo y la pérdida de sedimentos, reduciendo así la carga de sólidos en suspensión en el agua de escorrentía.

Para el caso de los sistemas de revegetalización, la introducción de vegetación en áreas degradadas o sin vegetación puede estabilizar el suelo y reducir la erosión ya que esta

actúa como un sistema de redes que ayuda a mantener la estructura del suelo, evitando su separación y transporte por escorrentía disminuyendo la cantidad de sólidos en suspensión en el agua de escorrentía. Finalmente, para los sistemas de bosques y pastos el manejo correcto del pastoreo y la conservación del suelo pueden disminuir la erosión y la pérdida de sedimentos, al evitar que el suelo sea desplazado por el agua de escorrentía, la cubierta vegetal y la presencia de raíces que ayudan a estabilizar el suelo.

Para (Blasco, 2017) las concentraciones de sólidos suspendidos en los cursos de agua varía mucho, debido a que estas se ven condicionadas por los aportes de materiales arrastrados por las lluvias mediante las escorrentías superficiales, además pueden ser alteradas por una serie de acciones humanas como la remoción de vegetación y suelos o naturales como el movimiento de sedimentos por parte de los peces.

En este sentido, cabe señalar que ningún valor límite de sólidos en suspensión es universal porque el agua puede tener una calidad apropiada para ser infiltrada mediante un determinado tipo de instalación de recarga artificial y ser inapropiada para otra (Murillo, 2009).

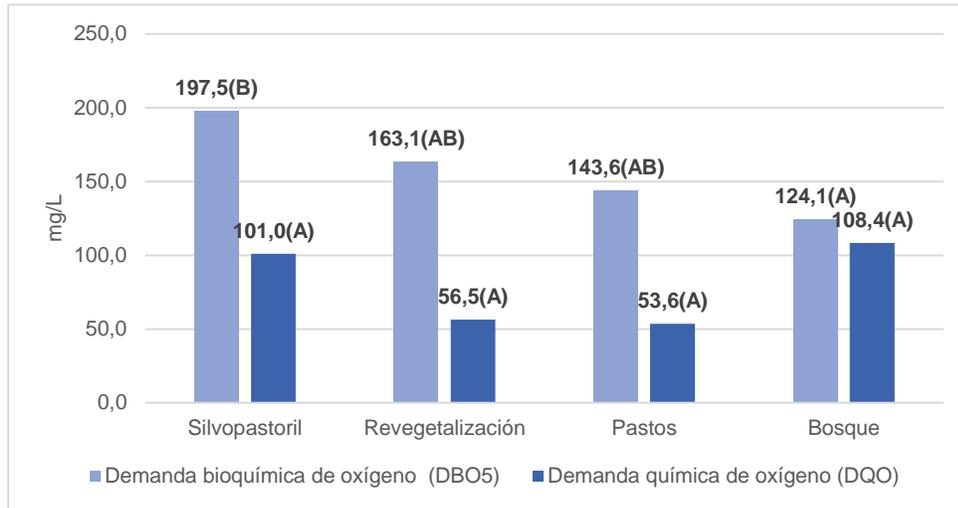
(Beltrán, 2012) Menciona que, los sólidos suspendidos son uno de los principales problemas de contaminación debido al impacto de la urbanización y las actividades agrícolas donde se han encontrado concentraciones de estos entre 30 – 110 mg/L por lo cual se incrementan las condiciones para la eutrofización. El autor también expone que, la variabilidad de los sólidos suspendidos es alta y establece que hay factores que pueden influir en su comportamiento como la intensidad de descarga de agua, la temperatura, los vertimientos y la intensidad de la lluvia; además también dio a conocer que los sólidos suspendidos, en los meses de mayores precipitaciones aumentan y en épocas secas disminuyen, sugiriendo que, a mayores descargas de agua hay un aumento en el transporte de materiales; pero por otra parte la intensidad de las precipitaciones hace que los tiempos de retención de material en las fuentes primarias sean menores.

La resolución 0631 de 2015 en el artículo 9 establece que, los valores permisibles de sólidos suspendidos en descargas de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales es de máximo 100 mg/L (Ministerio de Ambiente, 2015). En comparación con los resultados obtenidos las aguas de escorrentía de los diferentes usos de suelo para todos los sistemas de uso de suelo no se excedió el parámetro máximo admisible ya que sus valores oscilan entre 1,98 mg/L en pastos y 9,15 mg/L en revegetalización lo que indica que no hay contaminación en el agua por parte de este parámetro.

## **8.6 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y Demanda química de oxígeno (DQO).**

Los resultados expresados como promedio según se observa en la gráfica 8 para los parámetros de DBO5 y DQO muestran que es más alta la DBO5 para todos los sistemas de uso de suelo (Silvopastoril, revegetalización, pastos, bosque) donde los mayores valores se evidencian en el sistema silvopastoril con 197,5 mg/L, revegetalización con 163,1 mg/L y pastos con 143,6 mg/L por el contrario, bosques presentó un menor valor con 124,1 mg/L en comparación con los valores obtenidos para DQO. Por otra parte, el sistema que obtuvo mayores valores para DQO fue el de bosque con 108,4 mg/L seguido de silvopastoril con 101,1 mg/L y los menores valores, con comportamientos similares en los sistemas de revegetalización y pastos con valores de 53,6 mg/L y 56,6 mg/L respectivamente.

**Gráfica 8.** Valores promedio de la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y Demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas de escorrentía en cada uso de suelo.



Al realizar el test de análisis de varianza, para DBO5, se encontraron diferencias significativas entre los sistemas de silvopastoril y bosque, comportamiento contrario pudo evidenciarse en los sistemas de revegetalización y pastos en los que no se encontraron diferencias significativas de DBO5 con valores mínimos y máximos de (63,00 mg/L - 358,00 mg/L) y (81 mg/L - 445 mg/L) para revegetalización y pastos, con un  $p > 0,05$ .

Por otra parte, en el caso de DQO tampoco se presentaron diferencias significativas con  $p > 0,05$  entre los sistemas de uso evaluados, aunque se obtuvieron valores mínimos de 22,00 mg/L y máximos de 612,00 mg/L.

En este sentido cabe señalar que, en el agua de escorrentía de todos los sistemas, la demanda bioquímica de oxígeno es mayor que la demanda química de oxígeno debido a la presencia de materia orgánica en descomposición y desechos animales en el suelo que favorecen la presencia de microorganismos en el agua que consumen oxígeno en el proceso de descomposición de esta materia orgánica. Según (Arias, 1991) la descomposición de la materia orgánica es un proceso importante que relaciona la dinámica de la vegetación con la dinámica del suelo, además la regulación de este proceso involucra tanto factores bióticos como abióticos donde se ve implicada la actividad de bacterias y otros

microrganismos consumidores de oxígeno, por lo tanto, cuando hay más materia orgánica en el agua se aumenta la demanda bioquímica de oxígeno en esta. Por otro lado, la demanda química de oxígeno según (Ramírez et al., 2008) es un parámetro químico que indica que, toda la materia orgánica e inorgánica presente en una disolución o suspendida puede ser oxidada por la acción de agentes oxidantes en condiciones ácidas.

Finalmente, si buscáramos establecer tendencias para las concentraciones de materia orgánica e inorgánica en el agua; encontramos reportados mayores valores de DBO5 lo que puede significar que, las aguas analizadas tienen cargas materiales mayoritariamente de tipo orgánico; si esto lo relacionamos con el DQO que responde a la presencia de materia orgánica e inorgánica en el agua los valores que se obtienen de este indicador son considerablemente más bajos en contraste con los resultados de DBO5 teniendo en cuenta que, la concentración de partículas orgánicas supera la de las inorgánicas.

## **8.7 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5).**

Los resultados promedio de las concentraciones de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) evidenciados en la gráfica 8 en la que el mayor DBO5 se encuentra en el sistema silvopastoril con valor promedio de 197,5 mg/L, seguido de revegetación con 163,1 mg/L, y bosque y pastos presentan valores menores que oscilan entre 108,4 mg/L – 143,6 mg/L respectivamente.

Según la gráfica 8, estadísticamente se encontraron diferencias significativas de DBO5 ( $p > 0,05$ ) entre los sistemas silvopastoril y bosques; lo contrario sucede con los sistemas de revegetación y pastos en los que, no se encontraron diferencias significativas de DBO5, en los que se hallaron valores mínimos y máximos de 63,00 mg/L y 358,00 mg/L para revegetación y de 81 mg/L como mínimo en contraste con el valor máximo que se ubica en 445 mg/L para pastos.

El aumento en la DBO5 puede ser causado por la descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes en el agua; adicionalmente los sedimentos y la materia orgánica en suspensión también pueden contribuir a una DBO5 más alta.

Es posible que, las mayores concentraciones de DBO5 en el sistema de silvopastoril se deban a la presencia de pastos y árboles que contribuyen a la acumulación de hojarasca, ramas y otros restos vegetales en el suelo. Estos materiales orgánicos se descomponen a través de procesos microbianos, lo que genera una liberación de nutrientes y el aumento en la demanda bioquímica de oxígeno del agua de escorrentía.

De la misma manera podría ocurrir en el sistema de revegetalización, debido a que son sistemas de restauración de la vegetación en las que se usan plantas específicas para restaurar áreas degradadas o erosionadas. Durante el establecimiento de la vegetación, los materiales orgánicos se utilizan a menudo como mantillo o cobertura del suelo para mejorar la retención de agua y promover el crecimiento de las plantas. Esta materia orgánica también ayuda a aumentar el contenido de materia orgánica del suelo, lo que aumenta la DBO5 en estas aguas.

Por el contrario se presentan menores concentraciones de DBO5 en los sistemas de pastos 143,6 mg/L y bosques 124,1 mg/L; para el caso de los sistemas de pastoreo, la cubierta vegetal densa de pastos ayuda a reducir la erosión del suelo y la materia orgánica que ingresa al agua de escorrentía; además, debido a los efectos de las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo, la estructura del suelo de los pastizales es mayormente estable generando como resultado la liberación de menos materia orgánica en el agua y por lo tanto una menor DBO5.

Por otra parte, el sistema de bosques presenta densa cubierta arbórea que ayuda a la retención del suelo y la infiltración de la escorrentía a través de la vegetación; adicionalmente los bosques también poseen alta capacidad de retención de nutrientes

debido a la descomposición lenta de biomasa en el suelo reduciendo así la cantidad de materia orgánica y nutrientes que ingresan al agua de escorrentía disminuyendo la DBO5. (Nieto, 2014) Considera que, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) es de los parámetros más importantes en el estudio y caracterización de aguas no potables; porque además de indicar la presencia de materia orgánica y biodegradabilidad de la misma, actualmente, es un método para estimar la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar el carbono orgánico, y la velocidad con la que este material es metabolizado por las bacterias en condiciones normales presentes en aguas residuales.

Esto mismo consideran (Lecca & Lizama, 2014) ya que, para ellos la demanda bioquímica de oxígeno es uno de los indicadores más importantes en la medición de la contaminación de las aguas residuales y en el control del agua potable; de la misma manera (Angel, 1994) también considera que, la determinación de DBO5 es de las pruebas más importantes para comprender la capacidad de estabilización de los cuerpos receptores, y el poder contaminante de las aguas negras y desechos industriales; (Angel, 1994) expone que valores para aguas residuales domésticas en países situados en la zona templada, es de 200 mg/L y adicionalmente recomienda que estos valores, no deben utilizarse indiscriminadamente, ya que pueden no ser validos por obsolescencia de la norma considerando que, al momento de creadas la influencia de descargas industriales era mínima hace 2 o 3 décadas.

Contrastando los resultados con lo descrito en el artículo 9 de la resolución 0631 de 2015 donde se establece que, los valores permisibles de la demanda bioquímica de oxígeno en descargas de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales es de máximo 50 mg/L  $O_2$  (Ministerio de Ambiente, 2015) pudo observarse una clara diferenciación entre límite permitido y las concentraciones medidas en las muestras de cada uno de los sistemas de uso de suelo debido a que se exceden los valores permitidos por la regulación vigente teniendo como resultado que para los sistemas silvopastoril, revegetalización, pastos y bosque la DBO5 fue de 197,5 mg/L, 163,1 mg/L, 143,6 mg/L, 124,1 mg/L respectivamente.

(Ibanez, 2017) Analiza la clasificación de los valores que puede tomar la DBO5 estableciendo que:

**Tabla 4.** Clasificación de aguas respecto a DBO5 elaboración propia con información de (Ibanez 2017).

Tipo de agua	Valores de referencia
Pura	2 – 20 mg/L
Poco contaminada	20 – 100 mg/L
Medianamente contaminada	100 – 500 mg/L
Muy contaminada	500 – 3000 mg/L
Extremadamente contaminada	3000 – 15000 mg/L

Considerando los valores obtenidos en las muestras al contrastarlos con (Ibanez, 2017) podría decirse que estas aguas son medianamente contaminadas al encontrarse dentro del rango establecido para esto (100 – 500 mg/L).

## 8.8 Demanda Química De Oxígeno (DQO).

Sobre la demanda química de oxígeno puede apreciarse valores muy cercanos en los sistemas de revegetalización y pastos teniendo como resultado demandas de 56,5 mg/L y 53,6 mg/L respectivamente. Adicionalmente para los sistemas de silvopastoril y bosques se encontraron mayores valores (101,1 mg/L y 108,4 mg/L) como se reporta en la gráfica 8.

Al realizar el test de análisis de varianza, no se encontraron diferencias significativas entre la DQO de los sistemas de uso evaluados, obteniéndose un  $p > 0,05$ , aunque se presentaron valores mínimos de 22,00 mg/L y máximos de 612,00 mg/L.

La mayor demanda química de oxígeno (DQO) en el agua de escorrentía de los sistemas de bosques puede atribuirse a la descomposición de la materia orgánica presente en este tipo de ecosistemas debido, a la acumulación de hojarasca, ramas y desechos orgánicos en el suelo que conduce a encontrar niveles más altos de materia orgánica en estas aguas; además, los bosques pueden recibir insumos químicos a través de la depositación atmosférica de contaminantes como productos químicos industriales y fertilizantes agrícolas. Estos productos químicos pueden ser transportados por el agua de escorrentía, lo que aumentaría la demanda química de oxígeno.

Por otra parte, el aumento de la demanda química de oxígeno para el sistema silvopastoril puede ser el producto de un mayor aporte de materia orgánica en la escorrentía por la interacción entre las coberturas vegetales y los animales; adicionalmente la DQO puede aumentar en las aguas por la influencia de las materias fecales que necesitan de oxígeno para su descomposición.

En los sistemas de revegetalización, la presencia de vegetación en áreas previamente degradadas o carentes de esta ayuda a mejorar la calidad del agua de escorrentía al actuar como barrera física reduciendo la erosión del suelo y la pérdida de sedimentos, haciendo que la carga de nutrientes transportada en el agua sea menor al retener contaminantes y nutrientes.

En lo que respecta al sistema de pastos, el manejo adecuado del pastoreo puede contribuir con el mejoramiento de la calidad del agua de escorrentía con la implementación de prácticas como la rotación del pastoreo, el control de la tasa de pastoreo y la implementación de medidas de conservación de suelos ayudando a reducir la erosión y la pérdida de sedimentos, disminuyendo adicionalmente la carga de materia orgánica y nutrientes en el agua.

Para (Pillapa, 2022) la concentración de DQO representa el valor de toda materia orgánica e inorgánica presente en solución o suspensión, que puede ser oxidada químicamente por

la acción de un agente oxidante siendo un factor rápido para determinar el grado de contaminación del agua. De la misma manera (Rosabal, 2012) considera que, la demanda química de oxígeno es uno de los parámetros más efectivos en el control de la calidad del agua. Ante esto (Ramírez et al., 2008) también concuerdan con que es uno de los parámetros más importante para determinar rápidamente la contaminación del agua.

(Cuesta, 2014) Establece que, los valores medios de DQO para aguas domésticas oscilan entre 120 y 300 mg/l mientras que, para usos industriales las aguas pueden presentar valores de 70000, 35000, 150000 mg/L. (López, 2016) aporta una explicación para este fenómeno ya que en las aguas de fuentes domésticas los aportes de material orgánico e inorgánico son menores que los que provienen de fuentes industriales.

Respecto a la carga orgánica e inorgánica de las aguas (Delgado, 2018) establece que, una baja DQO indica bajas concentraciones de estos agentes.

Comparando los resultados encontrados en las aguas de escorrentía en los diferentes sistemas de uso de suelo con los rangos admitidos por el artículo 9 de la resolución 0631 de 2015 donde se establece que, los valores permisibles para demanda química de oxígeno en descargas de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales oscilan entre 150 a 200 mg/L  $O_2$  (Ministerio de Ambiente, 2015). Se observó que los de DQO obtenidos se encuentran por debajo de los límites permitidos en la normativa por lo que podría inferirse inicialmente que los suelos son altamente estables por lo que su aporte de materiales orgánicos e inorgánicos a las aguas es muy bajo; adicionalmente (Mayta & Mayta, 2017) exponen que altos valores de DQO en las aguas residuales pueden conducir a la reducción del oxígeno disponible del agua fenómeno que afectaría la dinámica poblacional de los organismos presentes en esta.

Con todo esto podría establecerse que, en materia de DQO las aguas de los sistemas de uso de suelo evaluados son seguras.

## 9. Análisis de resultados

### 9.1 Análisis de parámetros establecidos para calidad de aguas de escorrentía

**Tabla 5.** Análisis de variables para calidad de aguas de escorrentía.

Parámetros de calidad de agua evaluados por sistema de uso de suelo										
Sistemas de uso	Parámetro	pH	C.E	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Turbidez	SST	DBO	DQO
	Máximos permisibles	(6,5 - 9 U pH)	0,150 dS/m	10 mg/L	5 mg/l	0,2 mg/L	5 NTU	100 mg/L	50 mg/L	(150 - 200 mg/L)
<b>Silvopastoril</b>		No cumple	No cumple	No cumple	Si cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple
<b>Revegetalización</b>		Si cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple
<b>Pastos</b>		No cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple
<b>Bosque</b>		No cumple	No cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple

Respecto al cumplimiento de los parámetros establecidos para el análisis de calidad de las aguas de escorrentía en el presente estudio se tiene que, si bien ninguno de los sistemas cumple con la totalidad de parámetros, los sistemas de pastos y revegetalización presentan mejor comportamiento cumpliendo 6 de los 9 parámetros establecidos; seguidamente el sistema de bosques cumple con 5 de los 9 criterios y por último el sistema silvopastoril respecto a el análisis multicriterio es el que tiene un desempeño más bajo, cumpliendo solo con 4 parámetros.

Adicionalmente, respecto a la pertinencia de estas aguas para usos agrícolas (Ayers et al., 1985) establece una serie de criterios para determinar si las aguas pueden usarse para estas actividades, de este modo se analiza el cumplimiento de los parámetros de este estudio en concordancia con los criterios básicos establecidos por (FAO, 1985) teniendo como resultado la siguiente tabla.

**Tabla 6. Análisis de la calidad de agua para riego según criterio FAO 1985.**

Evaluación de la calidad de agua para riegos						
Sistemas de uso	Parámetro	pH	Conductividad eléctrica	Nitratos	Amonios	Fosfatos
	Intervalo normal	6,0 - 8,5 U pH	0 - 3 dS/m	0 - 10 mg/L	0 - 5 mg/L	0 - 2 mg/L
<b>Silvopastoril</b>		Si cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple	Si cumple
<b>Revegetalización</b>		Si cumple	Si cumple	No cumple	Si cumple	Si cumple
<b>Pastos</b>		Si cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple
<b>Bosques</b>		No cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple	Si cumple

Analizando los resultados obtenidos en cada uno de los sistemas de uso de suelo para los parámetros de pH, conductividad eléctrica, nitratos, amonios y fosfatos en concordancia con los intervalos establecidos por (Ayers et al., 1985) se encontró que el mejor comportamiento se tiene en las aguas provenientes del sistema de pastos ya que, este cumple con los 5 parámetros básicos establecidos.

## 10. Conclusiones

De los 4 sistemas de uso de suelo evaluados (Silvopastoril, revegetalización, pastos, bosque) en los que se determinó; escurrentía, pH, conductividad eléctrica, nitratos, amonios, fosfatos, turbiedad, sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno se concluye que:

En términos de escurrentía el mejor comportamiento pudo apreciarse en el sistema de bosques con 393 L/ha, esto particularmente como resultado de la interacción entre el suelo y el tipo de coberturas presentes en el que por su porte y volumen generan un impedimento físico para que el agua transite libremente en la superficie del suelo a pesar de presentarse pendientes altamente pronunciadas en este sistema, adicionalmente el dosel arbóreo intercepta gran parte del agua antes de que esta llegue a la superficie del suelo; en contraparte el sistema silvopastoril presentó los mayores valores de escurrentía superficial con 15768 L/ha, todo esto en relación con sus bajos niveles de cobertura arbórea, la deficiente calidad de los pastos y la compactación generada por los animales que en conjunto con un suelo descubierto favorecen el movimiento superficial del agua por el suelo.

Respecto a la calidad de las aguas que se mueve por escurrentía la respuesta más deficiente se obtuvo en el sistema silvopastoril al no cumplir con 5 de los 9 parámetros establecidos, esto implica que en este sistema la actividad de pastoreo y la presencia de árboles dispersos pueden aumentar la exposición del suelo a la erosión, lo que resulta en una mayor turbidez y sedimentación en el agua de escurrentía. Además, la aplicación de fertilizantes y la presencia de animales pueden contribuir a una mayor carga de nutrientes, como nitratos y fosfatos, en las aguas de escurrentía, sumado a un aumento en la compactación del suelo por el pisoteo y alto aporte de sales provenientes de las materias fecales generando con esto un incremento en la conductividad eléctrica que a su vez se relaciona negativamente con el movimiento del agua a través de los horizontes del suelo.

Por otra parte, los mejores comportamientos respecto a calidad de aguas se obtuvieron en los sistemas de pastos y de revegetalización que cumplieron en igual proporción con 6 de los 9 parámetros establecidos.

Inicialmente, en el sistema de pastos se dio cumplimiento de los parámetros de conductividad eléctrica, nitratos, amonios, fosfatos, sólidos suspendidos y demanda química de oxígeno, esto puede deberse a que los pastos, por su densidad en cobertura continua, reducen la erosión del suelo y minimizan la pérdida de sedimentos en el agua de escorrentía; además, las raíces de estos ayudan a mejorar la estructura del suelo amentando su capacidad de infiltración, permitiendo con esto una recarga más efectiva de los acuíferos subterráneos, contribuyendo a la disponibilidad de agua de calidad en las zonas agrícolas; adicionalmente los pastos en el suelo contribuyen al aumento en su eficiencia de reducción de la carga de nutrientes al absorber y utilizar el nitrógeno y fósforo disponibles, disminuyendo así su concentración en el agua de escorrentía.

Seguidamente, el sistema de revegetalización también cumple con 6 de los 9 parámetros establecidos pero, en este caso serían pH, conductividad eléctrica, amonios, fosfatos, sólidos suspendidos y demanda química de oxígeno; estos comportamientos pueden responder a la relación entre cobertura vegetal y las raíces de las plantas que ayudan a reducir la erosión del suelo y a retener los sedimentos en su lugar evitando que se depositen en el agua, mejorando así la calidad de estas; igualmente la vegetación en el sistema de revegetalización puede absorber y utilizar eficientemente los nutrientes como nitrógeno y fósforo; además de filtrar, absorber y retener contaminantes presentes en el agua de escorrentía, como metales pesados, pesticidas y otros productos químicos.

Finalmente, con los dos mejores sistemas evaluados (pastos y revegetalización) en cuanto a términos de calidad, si analizamos sus aguas desde una mirada agrícola podríamos decir que son aptas, ahora bien si buscamos definir si son seguras para el consumo humano no podríamos establecer un juicio ya que, dentro de las normativas colombianas los dos criterios más ampliamente usados para aprobar el uso de las aguas de un cuerpo hídrico para consumo humano las cuales son normativa ICA y normativa IRCA requieren del

análisis de una serie de parámetros más amplios sobre todo de tipo químico y microbiológico que para este estudio no se evaluaron ya que su principal fin es definir qué sistema de uso de suelo le aporta unas mejores características a las aguas de escorrentía que se usan principalmente para actividades agrícolas cotidianas.

Es así como pudo determinarse que, dos de los sistemas de uso propuestos (pastos y revegetalización) cumplen con el propósito de mejorar la calidad de las aguas pero, por la especificidad de este estudio hacia el uso para fines agrícolas no es posible encontrar en efecto cual es el mejor de los sistemas; aunque para posteriores investigaciones podría establecerse un sistema de uso de suelo que contemple la integración entre el sistema de pastos y revegetalización considerando que, dentro del análisis de criterios se encuentra una complementariedad ya que en dos de los tres criterios que no se cumplen en uno de los dos si se presenta el respectivo cumplimiento por lo que un mejoramiento en el diseño metodológico contemplando la introducción del nuevo sistema podría ampliar la discusión respecto a las prácticas de manejo en cuanto a conservación de suelos y su relación con la calidad de las aguas.

## Referencias bibliográficas

- Alonso, J. (2011). Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 45(2), 107–115.
- Álvarez, A. J., Yustres, L. F., & Ivanova, Y. (2021). Estimación del cambio de la capacidad de regulación hídrica como respuesta a los cambios de coberturas de la tierra (Caso de estudio: Cuenca alta del río Chinchiná, Caldas, Colombia). *Revista EIA*, 18(35), 43–53.
- Álvarez, L. (2013). *Análisis de la escorrentía sub-superficial en cubiertas experimentales de pasto kikuyo (pennisetum calndestinum)*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Andina, C. (2008). *Manual de estadísticas ambientales*.
- Angel, M. (1994). *Contribución al estudio de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)*. Universidad autónoma de nuevo León.
- Apolo, D. (n.d.). Cuenca del río Chinchiná. In *Cuencas climáticamente resilientes*. <http://cuencasresilientes-ciifen.org/es/index.php/donde-trabajamos/colombia-cuenca-del-rio-chinchiná>
- Arias, H. (1991). La descomposición de la materia orgánica y su relación con algunos factores climáticos y microclimáticos. *Agronomía Colombiana*, 8(2), 384–388.
- Arteaga, V., Quevedo, A., Valle, D., Castro, M., Bravo, Á., & Ramírez, J. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5), 319–343.
- Ayers, R. S., Westcot, D. W., & others. (1985). *Water quality for agriculture* (Vol. 29). Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome. [https://www.researchgate.net/profile/Abdelkader-Bouaziz/post/I\\_am\\_looking\\_for\\_a\\_research\\_paper/attachment/5e934607f155db0001f47f0a/AS%3A879539731316736%401586710021848/download/Water+Quality+for+Agriculture.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Abdelkader-Bouaziz/post/I_am_looking_for_a_research_paper/attachment/5e934607f155db0001f47f0a/AS%3A879539731316736%401586710021848/download/Water+Quality+for+Agriculture.pdf)
- Beltrán, J. (2012). Modelación dinámica de los sólidos suspendidos totales en el humedal Jaboque, Bogotá (Colombia). *Colombia Forestal*, 15(2), 191–205.
- Blasco, J. (2017). *Estudio de la influencia*

*de las aguas de escorrentía en la eutrofización de zonas costeras.*

Bolaños, J., Cordero, G., & Segura, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología En Marcha*, 30(4), 15–27.

Botero, L. A. (2020). La paradoja de la disponibilidad de agua de mala calidad en el sector rural colombiano. *Revista de Ingeniería*, 49, 38–51.

Cárdenas, G. L., & Sánchez, I. A. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(1), 72–88.

Castañeda, M., & Barros, V. (1994). Las tendencias de la precipitación en el Cono Sur de América al este de los Andes. *Meteorológica*, 19(1), 23–32.

Cedeño, E., & Mendoza, M. (2016). *Incidencia de las actividades agropecuarias del sitio La Bóveda, en la calidad del agua de Escorrentía al embalse Sixto Durán Ballén*. Calceta: ESPAM.

Chaplot, V., Selala, M. S., Thenga, H., & Jewitt, G. P. W. (2018). Comparison of the chemical quality of rainwater harvested from roof and surface run-off systems. *Water SA*, 44(2), 223–231.

CONDENSAN, & IEP. (2010). Estado de la acción acerca de los mecanismos de financiamiento de la protección o recuperación de servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes. In M. Quintero (Ed.), *Servicios Ambientales Hidrológicos en la Región Andina*.

CORPONOR. (2021). *ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA) EN CORRIENTES SUPERFICIALES- IDEAM*.  
[https://corponor.gov.co/calidad\\_agua/2021/iscal/6.INDICE\\_DE\\_LA\\_CALIDAD\\_DEL\\_AGUA\\_IDEAM.pdf](https://corponor.gov.co/calidad_agua/2021/iscal/6.INDICE_DE_LA_CALIDAD_DEL_AGUA_IDEAM.pdf)

Cuesta, F. (2014). *Evaluación de los niveles de remoción en demanda química y bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales de efluentes industriales con bacterias productoras de polihidroxicarboxilatos y exopolisacáridos a escala de laboratorio en empresas del sector*.

De Alba, S., Benito, G., & Pérez-González, A. (2002). *Parcelas experimentales para el estudio de la erosión hídrica: Finca*

*Experimental La Higuera.*

- Ministerio de ambiente, C. (2018). Resolución 0883 de 2018 - Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas marinas, y se dictan otras disposiciones. In *Bitkom Research* (Vol. 63, Issue 2). <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-0883-de-2018.pdf>
- Delgado, A. (2018). *Eutroficación, metamorfosis, contenido de boro y demanda química de oxígeno en las aguas del sistema hidrográfico de Río Grande en donde se construye la presa propósito múltiple Chone (PPMCH)*. Quito, 2018.
- Díaz, C. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 80–90.
- Dóniz, F. J. (2013). Tipo de cultivos y procesos de escorrentía en Las Llanadas, Los Realejos (Tenerife, España). *Vegeta: Anuario de La Facultad de Geografía e Historia*.
- Escobar, C., & Duque, G. (2016). Coberturas vegetales. In *Geotecnia para el trópico andino*. N/A.
- FAO. (1985). *Ayers and Wescot M56*.
- FAO. (2022). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. In *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. <https://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/>
- Fibras y Normas de Colombia. (2023). *Escorrentia: Definicion, Tipos Y Factores Que La Generan - Términos Y Definiciones*. <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/escorrentia-definicion-tipos-y-factores-que-la-generan/>
- García, S. (2011). Bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno. *Cuadernos Del Tomás*, 3, 173–186.
- Garzón, H. (1993). *Evaluación de la erosión hídrica y escorrentía superficial, bajo sistemas agroforestales, en tierras de laderas, Turrialba, Costa Rica*.
- Gualdrón, L. E. (2016). *Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos*.
- Hincapié, E., & Tobón, C. (2012). Dinámica del agua en Andisoles bajo

- condiciones de ladera. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín Medellín*, 65(2), 6765–6777.
- Ibanez, A. (2017). *DBO y DQO para caracterizar aguas residuales*. Agua, El Proceso de Clarificación. <https://nihonkasetu.com/es/dbo-y-dqo-para-caracterizar-aguas-residuales/>
- ICONTEC. (2016). *Calidad del agua. Determinación de la acidez y determinación de la alcalinidad*.
- IDEAM. (n.d.). *Calidad del agua*. <http://www.ideam.gov.co/web/siac/calidadagua>
- IDEAM. (2007a). *Demanda Química De Oxígeno Por Reflujo Cerrado Y Volumetría*. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Química+de+Oxígeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>
- IDEAM. (2007b). Fósforo soluble en agua por el método del ácido ascórbico. In *Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Fósforo+Soluble+en+Agua+por+el+Método+del+Acido+Ascórbico..pdf/4894199d-b9f6-414b-bd00-1ebeca63b981>
- IDEAM. (2007c). pH en agua por electrometría. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 7. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/pH+en+agua+por+Electrometría.pdf/ec53b64e-91eb-44c1-befe-41fcfccdfff1>
- IDEAM. (2007d). Turbiedad Por Nefelometría (Metodo B). In *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Turbiedad+por+Nefelometría..pdf/fc92342e-8bba-4098-9310-56461c6a6dbc>
- IDEAM. (2013). *Formato Común Hoja Metodológica Promedio de Nitrógenos totales ( PNT ) ( Hoja metodológica versión 1 , 00 ) Formato Común Hoja Metodológica*. 96, 1–8.
- IDEAM. (2015). *Demanda bioquímica de oxígeno 5 días, incubación y electrometría*. (Vol. 2). <http://www.ideam.gov.co/>
- IDEAM. (2016). *Conductividad eléctrica del agua por el Método Electrométrico en aguas* (Vol. 2). <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+Eléctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>

- IDEAM. (2017). Sólidos Totales secados a 103 - 105°C. In *IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*.  
<http://www.cambioclimatico.gov.co/documents/14691/38155/Sólidos+Totales+secados+a+103+-+105°C..pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935>
- IDEAM. (2022). Indicadores - Ideam. In *Evaluación Del Recurso Hídrico* (pp. 1–1).  
<http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1>
- Jimenez, W. (2021). *Pastos y forrajes conoce sus tipos, producción y manejo*. Pastos y Forrajes: Tipos, Producción, Manejo y Cultivo.  
<https://agrotendencia.tv/agropedia/pastos-y-forrajes/pasto-y-forraje-produccion-manejo-tipos-y-uso/>
- Lavie, E., Morábito, J., Salatino, S., Bermejillo, A., & Filippini, M. (2010). Contaminación por fosfatos en el oasis bajo riego del río Mendoza. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1), 169–184.
- Lecca, E., & Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17(1), 71–80.
- Loera, L. A., Torres, M., Martínez, J. F., Cisneros, R., & Martínez, J. de J. (2019). Calidad del agua de escorrentía para uso agrícola captada en bordos de almacenamiento. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(17), 283–295.
- Londoño, A., Giraldo, G. I., & Gutiérrez, A. A. (2010). Métodos analíticos para la evaluación de la calidad físicoquímica del agua. *Departamento de Ingeniería Química*.
- López, U. (2016). Caracterización de elementos y demanda de oxígeno en aguas naturales de la región geotérmica de los azufres. *Jóvenes En La Ciencia*.
- MACHEREY-NAGEL. (2022a). *Manual del usuario del kit de prueba Visocolor Eco Ammonium 3*. Manuals.  
<https://manuals.plus/es/macherey-nagel/visocolor-eco-ammonium-3-test-kit-manual>
- MACHEREY-NAGEL. (2022b). Visocolor ECO Kit de prueba de fosfato Manual del usuario. In *Manuals*.  
<https://manuals.plus/es/macherey-nagel/visocolor-eco-phosphate-test-kit-manual>
- MACHEREY-NAGEL. (2022c). Visocolor ECO Kit de prueba de nitrato Manual del usuario. In *Manuals*.  
<https://manuals.plus/es/macherey->

- nagel/visocolor-eco-nitrate-test-kit-manual
- Malagón, D. (1998). El recurso suelo en Colombia: Inventario y Problemática. *Revista Academia Colombiana de La Ciencia de Los Suelos*, 22, 13–52.
- Marcó, L., Azario, R., & Metzler, C. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4(11).
- Márquez, N. (2021). *Remoción de compuestos nitrogenados de aguas residuales municipales usando un consorcio bacteriano*. Corporación Universidad de la Costa.
- Mayta, R., & Mayta, J. (2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 83(3), 331–340.
- Meza, A., Rubio, J., Dias, L., & Walteros, J. (2012). Calidad de agua y composición de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca alta del río Chinchiná. *Caldasia*, 34(2), 443–456.
- Ministerio de Ambiente, C. (2002). *Gestión Ambiental Municipal SIGAM, Instrumentos*.
- Ministerio de Ambiente, C. (2015). *Resolución 0631*. <https://doi.org/10.4324/9780203861950>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 1256 de 2021. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS*, 1–6. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>
- Mohammad, A., & Adam, M. (2010). The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena*, 81(2), 97–103.
- Montagnini, F., Somarriba, E., Fassola, H., & Eibl, B. (2015). Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. *Serie Técnica. Informe Técnico*. [https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7124/Sistemas\\_Agroforestales.pdf?sequence=1](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7124/Sistemas_Agroforestales.pdf?sequence=1)
- Murillo, J. (2009). Turbidez y sólidos en suspensión de las aguas de escorrentía susceptibles de ser utilizadas en la recarga artificial del acuífero granular profundo subyacente a la ciudad de San Luis de Potosí (México). *Bol. Geol. Min*,

- 120, 169–184.
- OMS. (2017). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda. *Geneva*: WHO. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
- Ortega, L. F., León, J. D., & Villegas, J. C. (2014). *Evaluación comparativa del papel de diferentes coberturas vegetales sobre algunos servicios ecosistémicos en los Andes colombianos*. Masters thesis in Geomorphology and Soils. Universidad Nacional de Colombia~....
- Palomares, A. E. (2013). *Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento*.
- Pérez, J. H. (2021). *Medición y caracterización de la calidad del agua lluvia de escorrentía en cubierta para el diseño de un sistema de aprovechamiento implementado a descargas en la Institución Educativa Municipal Nuevo Horizonte De Girardot, Cundinamarca Sede Principal, Bl.*
- Pillapa, Y. (2022). *Estimación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) en aguas residuales de las empresas de jeans de la ciudad de Peñileo utilizando redes neuronales artificiales*. Universidad Técnica de
- Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos.
- Ramírez, L., Durán, C., García, A., Oaxaca, M., & Montuy, R. (2008). DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE MUESTRAS ACUOSAS:(A) Método alternativo (B) Tratamiento de los residuos generados por el método tradicional de reflujo abierto y por el método alternativo. 157. *PIQAYQA*.
- Ramírez, R., Carmona, A., & Pérez, G. (2005). Cambios en la conductividad hidráulica y su relación con otras variables físicas de un andisol bajo diferentes sistemas de manejo, en el municipio de Marinilla (Antioquia). *Medellín: UNAL*.
- Ramos, A., & Armenteras, D. (2019). Interceptación y escorrentía del bosque altoandino en la reserva forestal protectora "el malmo". *Acta Biológica Colombiana*, 24(1), 97–108.
- Reyna, G. A. (2021). *Evaluación de la erosión hídrica en tres tipos de uso de suelo de la Microcuenca Pomacochas, región Amazonas*.
- Ríos, N., Andrade, H., & Ibrahim, M. (2008). Evaluación de la recarga hídrica en sistemas silvopastoriles en paisajes ganaderos. *Zootecnia Tropical*, 26(3), 183–186.

- Rodríguez, A., Ordóñez, R., Espejo, A., González, P., & Giráldez, J. (2005). Estudio de la influencia de la cobertura vegetal viva en olivar en la contaminación de las aguas de escorrentía por nitratos. *Proc VII Jornadas de Investigación En La Zona No Saturada Del Suelo ZNS*, 5, 81–86.
- Rodríguez, L., & Moreno, S. (2015). *Análisis del índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano - IRCA y su relación con las variables meteorológicas (precipitación y temperatura) y la ubicación geográfica para el departamento del atlántico en los años 2012-2013*. [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1526&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1526&context=ing_ambiental_sanitaria)
- Rodríguez, S., & Delgado, M. I. (2020). Los Bosques Como Reguladores Del Ciclo Del Agua Para Disminuir Los Riesgos De Inundaciones. In *redforestal*. <https://www.argentinaforestal.com/2020/09/07/los-bosques-como-reguladores-del>
- Romero, M., Quintero, M., & Monserrate, F. (2016). *Elementos técnicos para la medición de huella hídrica en sistemas agrícolas*.
- Rosabal, Y. (2012). Evaluación de la demanda química de oxígeno en aguas de la provincia de Granma, Cuba. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 8(1), 15–20.
- Ruiz, E., & Martínez, M. (2021). Escorrentía. *Hidrología aplicada*. [https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/47725/mod\\_resource/content/1/Material\\_Docente/Tema\\_5.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/47725/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_5.pdf)
- Ruiz, O. A., Acosta, J. J., & León, J. D. (2005). Escorrentía superficial en bosques montanos naturales y plantados de Piedras Blancas, Antioquia (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2635–2650.
- Sánchez, J. A., & Rubiano, Y. (2015). Procesos específicos de formación en Andisoles, Alfisoles y Ultisoles en Colombia. *Revista EIA, SPE2*, 85–97.
- Sarabia, I., Cisneros, R., de Alba, J., Durán, H., & Castro, J. (2011). Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del Valle de San Luis Potosí, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(2), 103–113.
- Sierra, C., & Garcia, H. (2012). Determinación de Fosfatos en Aguas por Método Colorimétrico. Validación del Método. *Química Hoy*, 2(3), 28–32.

- SNET. (n.d.). *ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA GENERAL "ICA."*  
<https://doi.org/10.1119/1.1970348>
- Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79–94.
- Valera, A. (2016). *Evaluación de la capacidad de remoción de fosfatos en aguas residuales domésticas utilizando chlorella sp.*
- Velasquez, J. (2013). Revegetalización. In *Ingenio ambiental*. <http://ingenio-ambiental.blogspot.com/2013/01/revegetalizacion.html>
- Velasquez, S., & Jaramillo, A. (2009). *Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia.*
- Volverás, B., Campo, J. M., Merchancano, J. D., & López, J. F. (2020). Propiedades físicas del suelo en el sistema de siembra en wachado en Nariño, Colombia. *Agronomy Mesoamerican*, 743–760.