

Implementación de un prototipo a escala piloto de humedal artificial como herramienta de investigación y educación ambiental.

Andrés Fernando Pedraza López

Astrid Viviana Robles Sosa

Universidad Santo Tomás
Facultad De Ingeniería Ambiental
Tunja, Boyacá
2022

Implementación de un prototipo a escala piloto de humedal artificial como herramienta de investigación y educación ambiental

Andrés Fernando Pedraza López

Astrid Viviana Robles Sosa

Directora:

PhD. Lina Patricia Vega Garzón

Trabajo de grado para optar al título de ingenieros ambientales

Universidad Santo Tomás
Facultad De Ingeniería Ambiental
Tunja, Boyacá
2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Tunja, 02 de junio de 2022

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Santo Tomás, a la Facultad de Ingeniería Ambiental, a los docentes por proporcionarnos el conocimiento necesario para nuestra formación profesional en especial a nuestra directora PhD. Lina Patricia Vega Garzón por brindarnos su conocimiento, acompañamiento y dedicación para el buen desarrollo de nuestro trabajo de grado.

Terminando esta parte del camino, le agradezco a Dios por permitirme experimentar, aprender y crecer como persona rodeada del amor y el apoyo de mi familia. Le agradezco a mis padres por ayudarme a vencer los obstáculos que se me presentaron a lo largo de mi carrera profesional, infinitas gracias por su amor, su absoluto respaldo, por sus consejos y por la confianza que han depositado en mí. A mi hermano por ser esa voz de aliento en aquellos momentos difíciles y por motivarme a ser un buen ejemplo para él. Y a todos los integrantes de mi hermosa familia muchas gracias por su apoyo en esta etapa tan importante de mi vida.

También me siento agradecida por contar con la amistad de grandes personas que fui encontrando en esta travesía, con los que en equipo nos impulsamos para continuar con energía en los momentos difíciles. Infinitas gracias por las sonrisas y todos los momentos que compartimos.

Astrid Viviana Robles Sosa

A mi madre María Zoraida López Castro que con su amor y apoyo incondicional demuestro la persona dedicada y luchadora que sacó adelante a su hijo, a mis abuelitos Blanca Elvira Castro y Segundo Fulgencio López quienes formaron una persona de valores, a mis hermanos María Fernanda Católico López y Sergio Alejandro Católico López quienes me motivan a ser una mejor persona y un buen ejemplo para ellos, a mi pareja Diana Ríos por su apoyo y voz de aliento, a toda la familia López Castro quienes siempre creyeron en mí y por ultimo a mis amigos quienes hicieron parte de un gran proceso de aprendizaje y una etapa importante en mi vida.

Andrés Fernando Pedraza López

Resumen

Una alternativa de fácil operación y de bajo costo utilizada en el tratamiento de aguas residuales son los humedales artificiales, por lo que es una tecnología ideal para aplicar como una opción sustentable y adaptable a diversos entornos y usuarios. Además, se puede combinar con otros tipos de sistemas para su tratamiento, con el fin de optimizar el rendimiento en la disminución de contaminantes. La educación ambiental permite integrar una gran variedad de disciplinas alrededor de diferentes conceptos ambientales los cuales dan paso a desarrollar habilidades que ayudan a la conservación y el cuidado de los recursos naturales desde diversos puntos de vista y capacidades.

Este proyecto pretende demostrar la implementación de humedales artificiales en la educación ambiental, y la investigación en ingeniería, mediante la implementación de un prototipo de humedal artificial, adaptable a diferentes dimensiones. Por un lado, se utiliza como herramienta de formación ambiental buscando mediante demostraciones prácticas la posibilidad de apropiación del conocimiento por parte de los estudiantes evaluados, para que sirva para la posterior ejecución de estas tecnologías en el tratamiento de agua y en su formación ambiental.

Por otro lado, el prototipo tiene una configuración versátil de tal manera que sea posible su uso en la enseñanza de la ingeniería ambiental en áreas como la microbiología ambiental, técnicas de campo y tratamiento de agua residual; entre otras; que de igual forma sirva en la investigación y generación de nuevo conocimiento al utilizarse en la búsqueda de la solución a problemas ambientales reales o teóricos. La importancia de realizar este tipo de tácticas educativas y de investigación se basa en que la información suministrada debe ser clara en la fase experimental y la aplicación de técnicas y tecnologías por parte de los estudiantes.

La metodología para el logro de este fin se dividió en tres etapas: 1. Construcción del prototipo de humedal artificial híbrido a escala piloto, 2. Verificación del funcionamiento y efectividad del prototipo y 3. Formulación de una estrategia de educación ambiental y formación en ingeniería en torno a su utilización y manejo. En el análisis de la investigación se identificó que el prototipo de humedal artificial híbrido presentó gran efectividad en la remoción de contaminantes de control debido a que se obtuvieron porcentajes de remoción de 67% para amoníaco, 86% para nitritos, 87% para nitratos y 75% para fósforo. Adicionalmente el prototipo de humedal artificial construido se convirtió en una herramienta clave para la educación ambiental y la investigación, debido a que gracias a las estructuras que conforman el sistema propuesto los estudiantes pudieron conocer

acerca del funcionamiento, operación y mantenimiento de estas y de esta manera ampliaron sus conocimientos en lo que relaciona a esta tecnología que actualmente no es muy implementada en el país. Por otro lado, el prototipo da paso a que en un futuro se desarrollen diversas investigaciones en torno al tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, las cuales generan múltiples impactos a los ecosistemas.

Palabras clave

Humedales artificiales, tratamiento del agua, parámetros fisicoquímicos, tecnologías sostenibles, educación ambiental, prototipo.

Abstract

Artificial wetlands are an easy-to-operate and low-cost alternative for wastewater treatment, making it an ideal technology to apply as a sustainable and adaptable option for different environments and users. In addition, it can be combined with other types of treatment systems to optimize performance in the reduction of pollutants. Environmental education allows the integration of a wide variety of disciplines around different environmental concepts which give way to the development of skills that help the conservation and care of natural resources from different points of view and capabilities.

This project aims to demonstrate the implementation of artificial wetlands in environmental education and engineering research through the implementation of an artificial wetland prototype, adaptable to different dimensions. On the one hand, it is used as a tool for environmental education, seeking through practical demonstrations the possibility of appropriation of knowledge by the students evaluated, to serve for the subsequent implementation of these technologies in water treatment and in their environmental education.

On the other hand, the prototype has a versatile configuration so that it can be used in the teaching of environmental engineering in areas such as environmental microbiology, field techniques and wastewater treatment, among others; it can also be used in research and generation of new knowledge when used in the search for solutions to real or theoretical environmental problems. The importance of carrying out this type of educational and research tactics is based on the fact that the information provided must be clear in the experimental phase and the application of techniques and technologies by the students.

The methodology for the achievement of this goal was divided into three stages: 1. Construction of the hybrid artificial wetland prototype at pilot scale, 2. Verification of the operation and effectiveness of the prototype, and 3. Formulation of an environmental education and engineering training strategy for its use and management. In the analysis of the research, it was identified that the hybrid artificial wetland prototype was highly effective in the removal of control pollutants due to the fact that removal percentages of 67% for ammonia, 86% for nitrites, 87% for nitrates and 75% for phosphorus were obtained. Additionally, the constructed artificial wetland prototype became a key tool for environmental education and research, because thanks to the structures that make up the proposed system, the students were able to learn about the operation, operation and maintenance of these structures, thus expanding their knowledge of this technology, which is currently not widely implemented in the country. On the other hand, the prototype gives way to the development of future research on the treatment of different types of wastewaters, which generate multiple impacts on ecosystems.

Keywords

Artificial wetlands, water treatment, physicochemical parameters, sustainable technologies, environmental education, prototype.

Tabla de contenido

Resumen	5
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1. Objetivo general.....	13
1.2. Objetivos específicos	13
2. Antecedentes	14
2.1. Humedales artificiales.....	14
2.2. Contaminación del agua.....	17
3. Marco teórico	19
3.1. Marco conceptual.....	19
3.2. Marco legal	24
4. Metodología	26
4.1. Primera etapa: Diseño y construcción del prototipo de humedal artificial híbrido a escala piloto.....	28
4.2. Segunda etapa: Verificación de la efectividad del prototipo de HA híbrido	30
4.3. Tercera etapa: Estrategia de educación ambiental	32
5. Análisis y discusión de resultados.....	35
5.1. Prototipo de humedal artificial híbrido.	35
5.2. Análisis de la efectividad del prototipo de humedal artificial híbrido.....	43
5.3. Estrategia de educación ambiental.....	61
6. Impacto social y humanístico del proyecto	68
7. Conclusiones	69
8. Recomendaciones.....	71
Referencias	72
Anexos.....	80

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. <i>Diagrama metodológico.</i>	26
Ilustración 2. <i>Trampa de grasas.</i>	41
Ilustración 3. <i>Humedal subsuperficial de flujo vertical.</i>	42
Ilustración 4. <i>Humedal subsuperficial de flujo vertical.</i>	42
Ilustración 5. <i>Muestra inicial (afluente)- Ensayo 1.</i>	56
Ilustración 6. <i>Muestra inicial (afluente)- Ensayo 3</i>	57
Ilustración 7. <i>Muestra inicial (afluente)- Ensayo 4.</i>	57

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Características del medio filtrante para HAFSS.</i>	29
Tabla 2. <i>Parámetros de diseño.</i>	35
Tabla 3. <i>Componentes y materiales del prototipo de HA.</i>	38
Tabla 4. <i>Ensayos Experimentales.</i>	43
Tabla 5. <i>Resultados obtenidos para coliformes totales y fecales en los ensayos realizados.</i>	55
Tabla 6. <i>Identificación de zooplancton y fitoplancton</i>	58
Tabla 7. <i>Resultados obtenidos de los cuestionarios aplicados a los estudiantes.</i>	62

Lista de gráficas

Gráfica 1. <i>Comportamiento de la turbidez.</i>	44
Gráfica 2. <i>Valores promedio de temperatura para los ensayos realizados.</i>	46
Gráfica 3. <i>Conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT)</i>	47
Gráfica 4. <i>Valores promedio de pH.</i>	48
Gráfica 5. <i>Oxígeno disuelto y potencial de óxido reducción (ORP).</i>	50
Gráfica 6. <i>Comportamiento del DQO.</i>	51
Gráfica 7. <i>Valores registrados de Amoniacó</i>	52
Gráfica 8. <i>Valores registrados de Nitritos</i>	53
Gráfica 9. <i>Valores registrados de Nitratos</i>	54
Gráfica 10. <i>Comportamiento del Fósforo</i>	55
Gráfica 11. <i>Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 1.</i>	63
Gráfica 12. <i>Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 2.</i>	64
Gráfica 13. <i>Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 3.</i>	65
Gráfica 14. <i>Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 4.</i>	66
Gráfica 15. <i>Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 5.</i>	67

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. <i>Fórmula de Arrhenius</i>	28
Ecuación 2. <i>Fórmula para el área superficial</i>	29
Ecuación 3. <i>Obtención del largo y ancho del humedal artificial</i>	30

Ecuación 4. <i>Obtención de la constante de temperatura</i>	35
Ecuación 5. <i>Valor del área superficial del HSSFV.</i>	36
Ecuación 6. <i>Valor del área superficial del HSSFH.</i>	36
Ecuación 7. <i>Valores del largo- ancho para HA.</i>	36

Lista de planos

Plano 1. <i>Estructura del prototipo de humedal artificial híbrido</i>	37
---	----

Introducción

Debido a las características geográficas, a los regímenes climáticos y a su orografía, Colombia se encuentra en el grupo de países que poseen una gran riqueza hídrica. No obstante, se evidencia que en algunas regiones existe una baja disponibilidad del recurso afectando de manera directa o indirecta a la población y a los ecosistemas presentes en estos lugares, esta problemática surge a causa de los diversos impactos creados por el hombre (Lopera Gómez, M. J., Campos, S. M., & Olarte, 2011). Uno de estos impactos es la contaminación del recurso hídrico debido a vertimientos inadecuados de agua residual doméstica o agroindustrial, perjudicando la calidad del agua, la salud de las comunidades y aumentando los costos para el tratamiento del agua (Bernal, D.P., Cardona, D.A., Galvis, A., & Peña, 2002).

Para evitar estas problemáticas actualmente se investiga sobre alternativas nuevas que sean sostenibles en el tratamiento de agua residual, con el propósito de disminuir los impactos negativos en el ambiente. Los países desarrollados se destacan por el aumento significativo en el uso de este tipo de tratamiento para la remediación de diferentes tipos de aguas residuales. Caso contrario ocurre en los países en desarrollo como Colombia, debido a que existe un sesgo de información en las comunidades en lo relacionado al funcionamiento, operación y mantenimiento de dichas tecnologías. Por esta razón se deben efectuar diversas estrategias, con el fin de que la población conozca más acerca de esta alternativa de tratamiento para contribuir a la gestión integral y sostenible del agua (Bernal, D.P., Cardona, D.A., Galvis, A., & Peña, 2002; Hoffmann, H., Platzer, C., Von Münch, E., & Winker, 2011).

Los humedales artificiales (HA) registran gran efectividad en la remoción de contaminantes, son costo-eficientes y fácilmente adaptables a condiciones locales. Sin embargo, para el éxito en la operación de estos sistemas se ven involucrados múltiples componentes como el agua a tratar, los microorganismos, la vegetación y el sustrato que intervienen en el proceso de la remoción de los contaminantes (Arce Cardona, 2018).

Dicho lo anterior la dificultad que busca solucionar esta investigación es el sesgo de información que existe sobre la implementación, funcionamiento e importancia de los humedales artificiales como una alternativa en el tratamiento de agua residual, en muchos casos estas no son tratadas apropiadamente, produciendo diversos impactos negativos en el ecosistema. Para esto es preciso redefinir una estrategia de educación ambiental, de formación e investigación con base a los

resultados del funcionamiento del prototipo de HA híbrido, que tiene como meta aportar en el área de la investigación y capacitación ambiental en la Universidad Santo Tomás.

Para ello la metodología de la presente investigación estuvo dividida en tres etapas; En la primera se tuvo un enfoque en el diseño y construcción del prototipo de HA híbrido; La segunda consistió en la verificación del funcionamiento y efectividad del prototipo, y la tercera, el desarrollo de una estrategia de educación ambiental teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el prototipo, sirviendo como apoyo en el área de investigación y capacitación ambiental.

Los resultados obtenidos de la investigación son una interpretación del funcionamiento del humedal artificial, su efectividad y aporte en la educación ambiental. Por este motivo la importancia de conocer el comportamiento del sistema en cuanto a la remoción de contaminantes de control (nitritos, nitrato, fosforo y amoníaco) ya que permite determinar un amplio campo de aplicación en el tratamiento de agua residuales que a su vez genera un interés en la población que busca aplicar e instruirse en nuevas alternativas sostenibles y costo-eficientes.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Implementar un prototipo a escala piloto de humedal artificial como herramienta de investigación y educación ambiental, cuya finalidad este enfocada a que más personas conozcan acerca de esta tecnología de tratamiento.

1.2. Objetivos específicos

- Construir un prototipo de humedal artificial híbrido a escala piloto, dinámico con su funcionamiento y de fácil accesibilidad en las instalaciones de la universidad.
- Verificar el buen funcionamiento y efectividad del prototipo de humedal artificial por medio del análisis de pruebas fisicoquímicas y microbiológicas de laboratorio.
- Establecer una estrategia de educación ambiental basada en los resultados obtenidos en el funcionamiento del prototipo de humedal artificial híbrido que funcione como apoyo en el área de investigación y capacitación ambiental.

2. Antecedentes

2.1. Humedales artificiales

2.1.1. Implementación de prototipos de humedales artificiales en el tratamiento de agua residual

La aplicación de humedales artificiales en el tratamiento de agua residual ha sido presentada de forma amplia en la literatura. Las investigaciones publicadas tienen el propósito de analizar el óptimo desempeño del tratamiento de aguas residuales de diferente origen, planteando etapas que van desde la construcción del prototipo, el diseño de su estructura y los componentes utilizados, como se evidencia a continuación:

En la investigación de Belmont et al., (2004), se construyó un humedal a escala piloto en Santa María Nativitas en la cuenca del río Texcoco, con el propósito de evaluar la remoción de contaminantes. Este sistema de tratamiento estaba constituido por 3 plataformas de sedimentación, permitiendo la retención de arenas y sólidos en suspensión, adicionalmente se implementó un tanque estabilizador, dos humedales de flujo horizontal (SSFH) acoplados en paralelo con una profundidad de 0,6 m con sustrato de grava de 3 a 5 cm de diámetro (Belmont et al., 2004).

En la búsqueda de optimizar los humedales artificiales, Angarita Vargas & Rodríguez Susa, (2006), incorporaron modificaciones en la composición del sustrato, usando montmorillonita, por su capacidad de intercambio catiónico. También establecieron una zona anóxica, óxica y anaerobia para potenciar la descomposición de contaminantes y aumentar el porcentaje de remoción. El humedal artificial fue construido de tres metros de largo por uno de ancho 3:1, con una profundidad de 0.6 metros, escalonada con la arcilla montmorillonita como material impermeabilizante. Adicionalmente, el material filtrante fue grava con una porosidad promedio de 0.5 y diámetro de 2.5 cm, sirviendo como soporte para la implementación de distintas especies nativas de la sabana de Bogotá: *Bidens laevis* (Botoncillo), *Polygonum hydropiperoides* (Barbasco del pantano), y *Juncus effusus-scirpus* (Junco) (Angarita Vargas & Rodríguez Susa, 2006).

Nivala et al., (2013), tomaron como referente distintos modelos de humedales artificiales para diseñar y construir un modelo de humedal artificial alternativo de dos celdas. La estructural del HA partió de la distribución proporcional de las celdas A y B con 2,75 m de ancho cada una, diferenciándose por la distribución de tuberías en paralelo con un diámetro de 25 mm y con orificios de 5 mm en la celda A y de 100 mm en la celda B. Además, tenía una red de

reaprovechamiento interna con dos bombas y un sistema de tuberías de 200 mm, situado en el fondo de las dos celdas, cuya función permitió controlar el ciclo de distribución de agua (cada 30 min) desde la celda A hasta la celda B, permitiendo obtener distintas profundidades de agua en los dos lechos. Este modelo tuvo como funcionalidad aumentar la cantidad de oxígeno controlando parámetros como DQO, DBO y nitrógeno (Nivala et al., 2013).

Por otro lado, en la investigación realizada por Núñez (2017), cuyo objetivo principal consistía en “generar información sobre la capacidad de remoción de nitrato en un humedal construido a escala de laboratorio, sometido a diferentes cargas hidráulicas” (p.15). El autor identificó que el humedal artificial registró resultados significativos en la remoción de nitratos, los porcentajes de remoción fueron de 6%, 91%, 92% en cada una de las tres etapas analizadas en el proyecto. Gracias a dichos resultados el autor concluyó que los sistemas de HA de flujo ascendente son una eficiente herramienta en el tratamiento de efluentes contaminadas con nitratos debido a que registran una buena remoción de estos (Núñez, 2017).

En el estudio titulado “Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos” los autores determinaron que el sistema más eficiente en la remoción de coliformes totales y *Escherichia coli*, son los humedales de flujo subsuperficial vertical (HC-FSSV) continuo a los humedales de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSSH). De esta manera confirmaron que los humedales construidos híbridos son efectivos para la disminución de los patógenos presentes en aguas residuales, pero destacaron el hecho de que para reutilizar el agua tratada en agricultura se hacía necesaria la implementación de sistemas conformados como mínimo de dos etapas y que se tuviera en cuenta la selección de los sistemas individuales (Zurita et al., 2015).

2.1.2. Humedales artificiales como herramienta de educación ambiental

La educación ambiental relacionada al cuidado del recurso hídrico involucra generalmente la participación activa de la juventud y el cuerpo docente, para la apropiación de conceptos ligados a la sostenibilidad ambiental y al cuidado del territorio, mediante talleres y visitas de campo a cuerpos hídricos y plantas de tratamiento (Suaréz & Giraldo, 2008; Vera Rojas et al., 2017). La interdisciplinariedad que abarca la educación ambiental permite que cualquier individuo desarrolle habilidades que le permitan actuar en pro de la preservación de los recursos, más en un país en desarrollo como Colombia (Rengifo et al., 2012).

La implementación de una estrategia de capacitación ambiental tiene como objetivo principal la generación de conciencia sobre aspectos ambientales, cambiando el comportamiento de aquellos que reciben la información. Tal es el caso presentado por Lara & Otaño, (2017), que realizaron su investigación basándose en el conocimiento que adquirieron de una comunidad rural de la Pampa argentina, la cual desarrolló estrategias para el aprovisionamiento de agua en las instituciones educativas de la región, donde la comunidad participó y adquirió información para introducirla en sus costumbres.

El enfoque de la educación ambiental aplicada a humedales se centra aún en la vulnerabilidad de estos ecosistemas en cuanto al cambio de sus dinámicas naturales debido al cambio climático y las intervenciones antrópicas (Puertas & Pinilla Moscoso, 2017). Tal es el caso del modelo de educación ambiental aplicado en humedales del departamento de Córdoba, Colombia, donde mediante un diagnóstico se identificaron conductas inapropiadas de la comunidad hacia estos ecosistemas, que mediante la aplicación de herramientas pedagógicas como talleres y cuestionarios, a través de las cuales se reconocieron variables como el contexto socioeconómico de los participantes y su disposición hacia promover el desarrollo sostenible en el territorio (Villadiego Lorduy et al., 2017).

Según González Gómez & Perilla Gutiérrez (2015), los estudiantes son capaces de desarrollar competencias en diferentes niveles educativos, gracias al uso de una unidad de trabajo experimental para evaluar la calidad del agua tratada en un humedal artificial y aplicando módulos educativos divididos en fase introductoria, fase de actividades y fase de evaluación. El resultado de la aplicación de dichos módulos se basa en la sensibilización del cuidado del recurso hídrico y el reconocimiento de distintas formas en las que se puede tratar el agua residual.

Para (Bedoy et al., 2010) las estrategias de educación ambiental en relación con humedales artificiales tienen en particular una característica y es que la edad no es una limitante, debido que los materiales didácticos se elaboran teniendo en cuenta el rango de edad del grupo al cual se le aplicará la estrategia de educación ambiental. Para el caso de que la población objetivo sean niños las capacitaciones usualmente se enfocan en la protección y conservación de los humedales como ecosistemas que aportan diversos servicios ecosistémicos, para ello se implementan diversos materiales didácticos con el fin de facilitar la comprensión de los temas tratados.

Por otro lado, gracias a los resultados conseguidos en el estudio realizado por Muñoz & Novoa (2018), pudieron concluir que al combinar la teoría con materiales didácticos se puede adaptar mejor el tema, potenciando así los conocimientos relacionados con los sistemas acuáticos y permiten enfatizar en la importancia del uso y la importancia de los recursos hídricos. Esto aumenta la probabilidad de que los estudiantes aprendan más sobre estos temas y muestren un mayor interés.

2.2. Contaminación del agua

2.2.1. Principales causas de la contaminación de cuerpos de agua

La contaminación del agua se referencia como el ingreso de materiales o sustancias que modifican su composición química, obstaculizando el proceso de aprovechamiento o consumo del recurso, lo que influye en el establecimiento de políticas públicas que propendan por su cuidado y calidad (Baquerizo et al., 2019; Guadarrama Tejas et al., 2016). Las fuentes de contaminación pueden ser puntuales, es decir vertimientos o descargas en zonas concretas, y aquellas difusas que se refieren a las que no pueden delimitarse ya que suelen ser producto de escorrentía o infiltración (Guadarrama Tejas et al., 2016).

Los contaminantes presentes más comunes son agentes patógenos, sustancias químicas orgánicas e inorgánicas provenientes de procesos industriales generalmente y nutrientes (Guadarrama Tejas et al., 2016). A fin de establecer los criterios sobre la contaminación del recurso, se encuentran los Índices de Calidad del Agua (ICA), basados en características físico químicas y microbiológicas del agua, que varían según el país, pero que como herramienta de planificación ambiental permite que su uso sea sostenible. También se analizan características biológicas relacionadas a los procesos naturales de los ecosistemas, así como los bioindicadores que analizan la presencia o ausencia de especies como señal del nivel de contaminación (Rocha Gil et al., 2015; Suarez Castillo et al., 2019). Los ICA incluyen regularmente parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) pH, conductividad, oxígeno disuelto (OD), alcalinidad, coliformes, cloruros, temperatura, sólidos suspendidos, entre otros (Rodríguez Miranda et al., 2016).

2.2.2. Contaminantes presentes en aguas residuales provenientes de escorrentía agrícola.

El sector agropecuario es el que más agua utiliza para su desarrollo, así como ocupación del suelo, y es una de las fuentes más relevantes de la contaminación del agua en zonas rurales, debido

a la incorporación de agroquímicos y malas prácticas, que potencian el deterioro de la calidad del agua, influenciando de forma negativa en la salud de las comunidades y los ecosistemas (Pérez Espejo, 2012).

El uso de sustancias sintéticas en dicho proceso productivo es una constante, ya que su aplicación es poco efectiva debido a que solo cerca del 1% permanece en los cultivos y el resto se dispersa en el ambiente, especialmente en el agua. Por sus características, los compuestos aplicados en los cultivos son contaminantes persistentes, que no se degradan con facilidad al usar técnicas químicas para retirarlos (Bernal González, 2012).

Los nutrientes aplicados generalmente en los cultivos para fomentar su crecimiento y aumentar su productividad están compuestos por nitrógeno en forma de amoníaco y urea; por fósforo en forma de pentóxido de fósforo, fosfato monoamónico y diamónico, y finalmente por potasio en forma de potasa u óxido de potasio. El uso inapropiado de fertilizantes puede ocasionar problemas en el suelo como pérdida de la materia orgánica y desbalance nutricional que imposibilita el desarrollo de los cultivos, además de que puede perderse una considerable cantidad del compuesto aplicado por procesos de lixiviación, escorrentía y/o de forma gaseosa, terminando en la generación de problemáticas ambientales como la eutrofización de fuentes de agua superficial, incapacitando a los ecosistemas aledaños dependientes de estas fuentes de agua para proporcionar servicios ambientales de igual forma que en el pasado (Jara Durán, 2012; Rocha Gil et al., 2021).

El tratamiento de las aguas residuales del sector agrícola es fundamental para un desarrollo óptimo y sustentable del mismo, que afecta la calidad de vida de las comunidades en cuanto a seguridad alimentaria y el acceso a agua para consumo, y a la salud ambiental dada la alteración de los ciclos naturales y el cambio climático (Betancourt Aguilar et al., 2017). Dicho tratamiento es posible de realizar desde una perspectiva ambiental que involucre ecotecnologías o mecanismos que imiten procesos biológicos, como los humedales artificiales, a fin de limitar los impactos ocasionados por la contaminación del agua y algunos tratamientos convencionales (Arteaga Cortez et al., 2019). El reusó de estas aguas residuales luego de un debido proceso de depuración cumpliendo con la normatividad establecida en diferentes presenta ventajas como la mitigación de problemas de estrés hídrico (Villa Hoyos, 2020).

3. Marco teórico

3.1.Marco conceptual

3.1.1. Educación ambiental

El concepto de educación ambiental es antiguo y se puede ver en el desarrollo del II Congreso sobre Educación Ambiental, Moscú 1987 el cual la definió así: “La Educación Ambiental es un proceso permanente en el cual los individuos y las comunidades, adquieren conciencia de su medio y aprenden los conocimientos, los valores, las destrezas, la experiencia y también la determinación que les capacite para actuar, individual y colectivamente en la resolución de los problemas ambientales presentes y futuros”.

Ors, (2012) sostiene que la educación ambiental no puede limitarse a la enseñanza en las instituciones educativas, sino que debe trascender estos límites y comenzar a difundirse y vivirse como un tema social de alto valor. Actualmente, varios grupos en instituciones educativas están teniendo discusiones sobre el medio ambiente y la conciencia ambiental, ya que involucran a los estudiantes en varios temas fundamentales relacionados con la educación ambiental. Sin embargo, este importante tema aún requiere ser profundizado en sus dimensiones económicas y sociales, las cuales representan los factores determinantes del avance de problemáticas ambientales y las estrategias que se desarrollan para enfrentarlos.

3.1.2. Humedal natural

Los humedales son ecosistemas que se distinguen por el hecho de que la capa freática se encuentra sobre o cerca de la superficie del suelo cubriéndolo todo. Según la Convención de los Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR), este ecosistema se define como “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” y su interés ambiental se debe especialmente a que es el hogar de las aves acuáticas (RAMSAR, 2006).

Los humedales de acuerdo a su ubicación y características se clasifican en: humedales marinos, humedales estuarios, humedales lacustres o con poca circulación de agua, humedales ribereños, humedales palustres o también llamados pantanosos y humedales artificiales (Moreno et al., 2002; RAMSAR, 2006). Hoy en día a causa de los efectos del cambio climático y de actividades

antrópicas los humedales son más vulnerables, sin embargo aún conservan una concentración de diversas especies y depósitos de material genético, por lo que se consideran cunas de diversidad biológica, además de ser también importantes sumideros de carbono (RAMSAR, 2015b, 2015a).

3.1.3. Humedal artificial

Actualmente para hacerle frente a la problemática ambiental que representa la contaminación del recurso hídrico, se encuentran una diversidad de opciones de tratamiento no convencional, las cuales involucran procesos físico-químicos y biológicos, como los humedales artificiales (HA), disminuyendo el impacto negativo sobre el ambiente que suelen ocasionar aquellos tratamientos convencionales con el uso de maquinarias y componentes tóxicos (Esponda Aguilar, 2001; Fenoglio Limon, 2003). El sistema de los HA simula las características de este ecosistema natural para llevarlo a un ambiente controlado, que mediante la acción microbiológica y el trabajo de absorción del material vegetal, permite la depuración de aguas residuales (Gerba et al., 1999; Guido Zárate & Durán de Bazúa, 2008).

3.1.3.1. Tipos de humedales artificiales

La clasificación de los humedales artificiales se da en algunos casos a partir del tipo de plantas utilizadas, si son emergentes, flotantes o sumergidas, aunque generalmente se tipifican los HA de acuerdo a su tipo de flujo: humedales de flujo superficial (HFS), humedales de flujo horizontal subsuperficial (HFSS), humedales de flujo vertical (HFV) y Sistemas híbridos (SH) (Arias & Brix, 2003; Chafloque & Gómez, 2006; Vymazal et al., 2006).

Un **humedal de flujo híbrido** se define como aquel sistema que involucra el uso de unidades de diferentes tipos de humedales artificiales como los mencionados anteriormente, con el propósito de usar diversas especies vegetales y crear diferentes ambientes como el anóxico del humedal de flujo horizontal y el aerobio del vertical, para obtener una mayor eficiencia en el tratamiento del agua (Arteaga Cortez et al., 2019; Lima Coasaca, 2021).

En el contexto de la presente investigación el sistema de estudio es uno híbrido que se constituye por dos unidades de humedales de flujo subsuperficial, uno vertical y el otro horizontal:

El HFV, tiene un flujo descendente que se distribuye de manera uniforme por el sustrato que sustenta el desarrollo de las raíces del material vegetal implantado, para obtenerse el agua tratada en la parte baja de la unidad (Arias & Brix, 2003). El humedal de flujo horizontal subsuperficial

(HFSS), es aplicado comúnmente en el tratamiento de aguas pluviales, aguas grises, y residuales originarias de sistemas de alcantarillado, industrias y/o sistemas agropecuarios, manejando especies macrófitas flotantes para el tratamiento (Tanner & Headley, 2011).

3.1.3.2. Componentes de un humedal artificial

Los humedales artificiales están conformados principalmente por cuatro elementos principales: aguas residuales, sustrato, vegetación y microorganismos.

a. Aguas residuales:

Según la OEFA, las aguas residuales “Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado”. Dependiendo del origen del agua residual, pueden estar compuesta por diferentes contaminantes, como por ejemplo materia orgánica biodegradable, microorganismos patógenos, sólidos disueltos y suspendidos, nutrientes, compuestos tóxicos, metales pesados (Rolim Mendonca, 2000).

b. Sustrato (medio granular):

El sustrato en los humedales está compuesto por material granulométrico, arcilla, entre otros. El medio debe tener una superficie permeable que permita la distribución del agua por la estructura. Por esta razón es recomendable utilizar material granulométrico de diámetros que oscilan entre los 5 mm y 30 mm aproximadamente, los cuales permiten la absorción y eliminación de contaminantes (Tanner & Headley, 2011).

c. Vegetación:

La fitorremediación trae consigo una serie de ventajas y limitaciones comparadas con otras alternativas convencionales en el tratamiento del agua. Aplicada comúnmente en grandes superficies, con contaminantes inmóviles o con bajos niveles de contaminación, teniendo en cuenta que los resultados se darán posteriormente debido a la temporalidad del proceso (Delgadillo López et al., 2011).

Los humedales se clasifican por el tipo de plantas que se utilizan y a su estructura fisiológica, La clasificación para plantas acuáticas se basa principalmente en sus características morfológicas, las cuales pueden ser enraizadas y flotantes. Usualmente las plantas enraizadas se implementan en humedales artificiales (Pérez López, 2009).

Según León Romero (2017), algunas plantas hiperacumuladoras y biorremediadoras propias de Latinoamérica y utilizadas comúnmente en humedales artificiales son: *Eichhornia crassipe* (Jacinto de agua), *Schoenoplectus californicus* (Totorá), *Azolla caroliniana* (Flor del pato), y *Limnobium laevigatum* (Buchón de agua).

De acuerdo con la convención de RAMSAR en 1971, las especies de plantas más utilizadas en humedales artificiales tienen gran contribución al momento de tratar del agua residual. A continuación, se mencionan algunos de sus beneficios:

- Eliminación de contaminantes debido a la absorción del sustrato como medio filtrante y su capacidad hidráulica de controlar la velocidad del flujo
- Durante sus procesos biológicos, hay un intercambio de componentes gaseosos entre el sustrato y la atmósfera, sin embargo, se reconoce que también hay un intercambio de oxígeno generado por las plantas que favorece y mejora las condiciones del sustrato.
- En el tallo y las raíces de las plantas hay un desarrollo de distintos microorganismos, entre estos se pueden encontrar bacterias facultativas y anaerobias que se encargan de degradar la materia orgánica, donde la vegetación transfiere una pequeña cantidad de oxígeno a las raíces, permitiendo el crecimiento de bacterias aeróbicas.

d. Microorganismos:

En los humedales los microorganismos que se registran son hongos, levaduras y bacterias, entre otros. La biopelícula de microorganismos fija en gran medida nutrientes, además tiene como funcionalidad transformar sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y permite transformar las condiciones de reducción y oxidación del sustrato. Igualmente se reconoce que las sustancias contaminantes pasan a un estado gaseoso y son expuestas a la atmósfera, esto debido a la acción biológica y microbiológica (Lara Borrero, 1999).

3.1.4. Parámetros físico-químicos

Son aquellas variables del agua que se miden con el fin de determinar las propiedades del fluido, tales como las organolépticas, es decir color, olor y sabor (García de la Fuente, 2013; Londoño Gaitán, 2014). También incluye factores como:

- El pH que determina el nivel acidez o basicidad.
- La conductividad, para determinar sólidos disueltos a través de su comportamiento al conducir electricidad.
- Sólidos disueltos totales.

3.1.5. Parámetros microbiológicos

Estos parámetros se refieren a la medición de concentración de microorganismos que pueden representar un riesgo de salud pública si se presentan en ciertas cantidades en el agua de consumo, en cuanto a la propagación de enfermedades infecciosas (Londoño Gaitán, 2014). Los microorganismos patógenos que se incluyen regularmente en los análisis de agua de acuerdo a la prevención de transmisión de enfermedades son (Obón de Castro, 2014).

De origen bacteriano:

- *Salmonella typhi*, *Salmonella*., *Paratyphi A y B*, *Shigella*, *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli* *ET*, *Campylobacter*, *Yersinia enterocolitica*, *Salmonella sp*, *Shigella sp*.

De origen viral:

- *Virus de la hepatitis A y E*, *Virus de la polio*, *Virus Nortwalk*, *Rotavirus*, *Astrovirus*, *Calicivirus*, *Enterovirus*, *Adenovirus*, *Reovirus*.

De origen parasitario

- *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia*, *Cristosporidium*.

3.2.Marco legal

Dentro de este marco legal se encuentran la normatividad vigente establecida que se aplica al objetivo del presente trabajo enfocado en el uso de un prototipo de humedal artificial como herramienta de investigación y de educación ambiental.

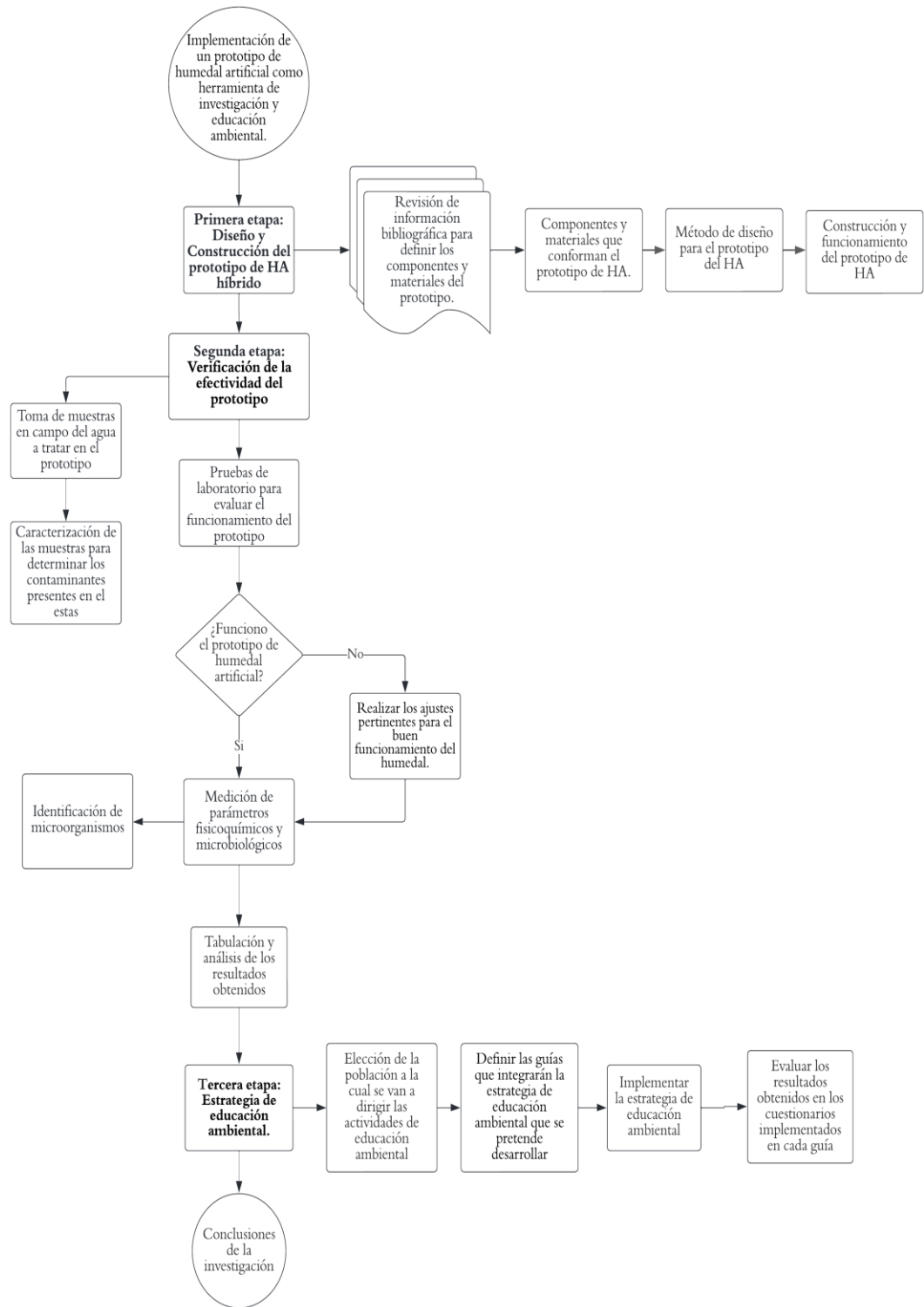
- **Decreto – Ley 2811 de 1974:** “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”.
- **Decreto 1594 de 1984:** “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.”
- **Ley 99 de 1993:** “Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental -SINA- y se dictan otras disposiciones”.
- **Ley 373 de 1997:** “Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua”.
- **Resolución 0157 de 2004:** “Por la cual se reglamentan el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales y se desarrollan aspectos referidos a los mismos en aplicación de la Convención RAMSAR”.
- **Decreto 3930 de 2010:** “Por el cual se reglamenta parcialmente, el título 1 de la ley 9 de 1979, así como el capítulo 2 del título 5 – parte 3 – libro 2 del decreto ley 2811 de 1974, en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones”.
- **Decreto 4728 de 2010:** "Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010"
- **RAS título J- 2010:** Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico “Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural”.
- **Resolución 1207 de 2014:** “Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas”.
- **Resolución 631 de 2015:** “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.
- **Decreto 1076 de 2015:** “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”.

- **Resolución 0330 de 2017:** “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009”.

4. Metodología

La metodología está conformada por tres etapas, donde la primera hace referencia al diseño y construcción del prototipo de HA híbrido a escala piloto; en la segunda etapa se verificó el funcionamiento y efectividad del prototipo y la tercera, el desarrollo de una estrategia de educación ambiental basada en los resultados obtenidos en el funcionamiento del prototipo, la cual sirve como apoyo en el área de investigación y capacitación ambiental. A continuación, en la **Ilustración 1**, se presenta el diagrama metodológico y se presentarán las actividades realizadas en cada una de las etapas anteriormente mencionadas.

Ilustración 1. *Diagrama metodológico.*



Fuente: Autores

4.1. Primera etapa: Diseño y construcción del prototipo de humedal artificial híbrido a escala piloto.

En primera instancia se revisó la información bibliográfica con el fin de definir parámetros de diseño, componentes y materiales (macrófitas, sustratos, material granulométrico, entre otros) que conformaron el prototipo de HA, además en esta etapa se buscó que el modelo estructural fuera versátil y de fácil funcionamiento.

4.1.1. Método de diseño para el prototipo del humedal artificial

Para el dimensionamiento del prototipo se implementó la ecuación utilizada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la cual se deriva del modelo de cinética de primer orden (EPA, 1993). Se tuvo en cuenta:

- Se implementó la ecuación de Arrhenius (**Ecuación 1**) para la corrección por temperatura de la constante cinética de primer orden, a partir de un promedio de la temperatura del agua a tratar.

Ecuación 1. *Fórmula de Arrhenius*

$$K_{v,t} = K_{v,20} \theta^{T-20}$$

Fuente: (Kadlec & Knight, 1996a)

Donde:

T: Temperatura promedio del agua, °C

θ : Coeficiente de Arrhenius, adimensional

Nota: Según Brown y Reed (1994) para el caso de los humedales de flujo subsuperficial: $K_{v,20}$ es igual a 1.104, con θ igual a 1.06.

- Posteriormente se definieron parámetros iniciales para el diseño, como lo es el caudal, la profundidad del lecho filtrante y el tipo de sustrato. A partir de la **Tabla 1** se definió el valor de porosidad del lecho filtrante implementado.

Tabla 1. Características del medio filtrante para HAFSS.

Tipo de medio	Tamaño efectivo (θ mm)	Porosidad %
Arena de cuarzo	2	32
Arena graduada	8	35
Grava fina	16	38
Grava media	32	40
Roca de cuarzo	128	45

Fuente: (CONAGUA, 2012; EPA, 1993)

- La DBO del afluente fue obtenida a partir de la medición de la DQO en el laboratorio y la DBO del efluente (valor deseado) fue determinada teniendo en cuenta los valores límites máximos permisibles registrados en la resolución 631 de 2015 para el vertimiento puntual de aguas residuales no domésticas.
- Se calculó el área superficial con la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Fórmula para el área superficial

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_{v,t} D_m n}$$

Fuente: (EPA, 1993)

Donde:

A_s : Área superficial del humedal, m^2

Q : Caudal del afluente, (m^3/d)

$K_{v,t}$: Constante cinética de primer orden, d^{-1}

D_m : Propuesta de profundidad de lecho, m

n : Porosidad, Adimensional.

- Se seleccionó una relación de 2:1 para el largo y ancho del humedal artificial.
- Para la obtención de largo y ancho se desarrolló la **Ecuación 3**, despejando las variables a partir del área superficial.

Ecuación 3. Obtención del largo y ancho del humedal artificial

$$L \times W = As$$

$$L = 2W$$

$$2W \times W = As$$

$$W = \frac{As}{2}$$

$$W = \sqrt{\frac{As}{2}}$$

Fuente: (EPA, 1993)

4.2.Segunda etapa: Verificación de la efectividad del prototipo de HA híbrido

A continuación, se presentan las diferentes fases que integraron esta etapa con el fin de cumplir con el objetivo propuesto:

4.2.1. Medición de parámetros del afluente

El muestreo del agua de escorrentía agrícola fue realizado en la vereda Barón Germania la cual conforma la zona rural de Tunja, con coordenadas 5° 28' 41'' N – 73° 24' 14'' W. En este lugar se desarrollan actividades de agricultura y ganadería (Ver **Anexo 1**). Siguiendo el procedimiento estandarizado por el IDEAM se tomó la muestra de agua y se realizó la medición en campo de los siguientes parámetros: pH, % OD, temperatura (°C), total de sólidos disueltos (ppm), potencial de óxido reducción (mV), conductividad eléctrica (µS/cm), directamente en campo (IDEAM & INVEMAR, 2017).

Posteriormente se llevó la muestra a laboratorio y se realizó la medición de parámetros físico, químicos y microbiológicos en el laboratorio de las muestras recolectadas, los cuales fueron: Turbidez (NTU), nitratos (mg/L), nitritos (mg/L), fósforo (mg/L), amoníaco (mg/L), DQO (mg/L), DBO (mg/L), color aparente, color real, análisis de coliformes totales y *Escherichia coli*.

4.2.2. Medición de parámetros del prototipo de HA híbrido

Los parámetros analizados fueron fisicoquímicos y microbiológicos teniendo como objetivo reconocer el desempeño y comportamiento del prototipo de HA híbrido en el tratamiento de agua proveniente de escorrentía agrícola.

4.2.2.1. Parámetros físicoquímicos

Estos parámetros fueron medidos y analizados en tres puntos de referencia lo cuales fueron: trampa de grasas (inicial), salida del HSSFV (Modulo 1) y salida del HSSFH (Modulo 2). Los equipos usados para estas mediciones fueron:

4.2.2.1.1. Multiparámetro Hanna Instruments HI 98194

Por medio de la sonda y los sensores que tiene este equipo se realizó la medición de: pH, sólidos disueltos totales (ppm), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), % OD, temperatura ($^{\circ}\text{C}$), potencial de óxido reducción (mV) (HANNA, 2011) (Ver **Anexo 2**).

4.2.2.1.2. Espectrofotómetro de Macherey- Nagel. NANOCOLOR® UV/VIS II / VIS II

Este equipo realiza la medición de la muestra de agua por medio de métodos colorimétricos. En este equipo se realizó la medición de turbidez (NTU) según en ISO 7027 (Ver **Anexo 3**), color real y Nitritos (mg/L) usando el método de nitrito- ácido sulfanílico / 1 – naftilamina (MACHEREY-NAGEL, 2015).

4.2.2.1.3. Fotómetro Multiparámetro – HI 83399

Este equipo funciona a partir de la medición del espectro de luz. El cambio en el color se debe a la reacción que tiene el químico adicionado a la muestra de agua. Este equipo fue utilizado para la medición de nitratos (mg/L) con el método del ácido cromotrópico, para el caso del amoníaco rango medio (mg/L) fue el método de Nessler adaptado del Manual de Tecnología del Agua y Medio Ambiente de la ASTM. Se implementó el método adecuado de Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas Residuales, para la medición de fosfato rango alto y para el caso de la DQO el método fue el acondicionado de la EPA 410.4 método aprobado para la determinación de este parámetro en aguas superficiales y aguas residuales (HANNA, 2020) (Ver **Anexo 4**).

4.2.2.2. Análisis microbiológico

La identificación y análisis de microorganismos se realizó implementando los siguientes métodos:

4.2.2.2.1. Número más probable (NMP)

En la determinación de la presencia de Coliformes totales y *Escherichia coli* en el afluente y en el efluente de cada uno de los ensayos realizados se implementó la metodología Colilert. Se realizó una disolución de 1 ml de muestra de agua y 50 ml de agua destilada en el recipiente estéril y se añadió 1 vial de Colilert, posteriormente se agitó hasta que se disolviera y se procedió a verter la

sustancia en una bolsa QuantiTray/2000 procurando que no se generaran burbujas. Esta bolsa fue sellada en el equipo IDEXX Quanti-Tray Sealer, después fue incubada por 24 horas y posteriormente se realizó la respectiva lectura teniendo en cuenta la tonalidad obtenida (Arboleda et al., 2016; Navarro Roa, 2007) (Ver **Anexo 5**).

4.2.2.2.2. Tinción de Gram

Este método consiste en tres etapas: la primera es la incubación por medio de la utilización de agar que posterior a 48 horas en condiciones óptimas de temperatura las colonias de bacterias se van a proliferar permitiendo tener una caracterización más definida. En la segunda etapa se procede a la fijación y tinción para que en la tercera y última etapa por medio de la utilización del microscopio se logren identificar tanto bacterias Gram negativas como bacterias Gram positivas y su morfología (González et al., 2020) (Ver **Anexo 6**).

4.2.2.2.3. Observación directa de la muestra

En este método se procede a tomar una muestra de agua con la ayuda de un gotero, posteriormente se aplica una gota de la muestra de agua en un portaobjetos y se lleva al microscopio Leica DM 500 identificando fitoplancton y zooplancton en los objetivos de 4X, 10X y 40 X (Ver **Anexo 7**).

4.3.Tercera etapa: Estrategia de educación ambiental

En el desarrollo de la estrategia de educación ambiental lo primero que se llevó a cabo fue la elección de la población a la cual se dirigieron las actividades de capacitación, estas fueron aplicadas a los estudiantes de la facultad de ingeniería ambiental de distintas asignaturas.

A continuación, se exponen las guías que integran la estrategia de educación ambiental, teniendo como objetivo suministrar la información teórica y práctica para el desarrollo de los laboratorios.

4.3.1. Guía 1: Humedales naturales y artificiales

Esta capacitación estuvo dirigida a los estudiantes de la asignatura introducción a la ingeniería ambiental, donde se implementó una guía educativa la cual les permitió conocer de manera general una de las tecnologías sostenibles y eficientes en el tratamiento de agua residual, como los humedales artificiales. Adicionalmente, los estudiantes realizaron una práctica de laboratorio donde midieron de los siguientes parámetros: pH, turbidez y oxígeno disuelto (OD) con los

respectivos equipos. Por último, se aplicó un cuestionario con el fin de evaluar los conocimientos adquiridos.

4.3.2. Guía 2: Protocolo de muestreo de agua y medición de parámetros

Teniendo en cuenta el protocolo de monitoreo del agua, este módulo estuvo dirigido a los estudiantes de la asignatura técnicas de campo, donde por medio de una guía informativa se expusieron las recomendaciones que se deben tener en cuenta a la hora de recolectar muestras de agua para su tratamiento en humedales artificiales, la importancia de realizar la medición de los parámetros en campo y en el laboratorio permite comprobar la efectividad del prototipo de humedal artificial híbrido.

En la práctica de laboratorio programada para este módulo los estudiantes realizaron la medición de pH, OD, conductividad eléctrica, temperatura (°C), porcentaje de saturación de oxígeno a diferentes profundidades (5 a 20cm) y medición de amoníaco, nitritos y nitratos de las muestras recolectadas de los dos módulos que conforman el prototipo de humedal. Finalmente se realizó un cuestionario a los estudiantes.

4.3.3. Guía 3: Microorganismos presentes en los humedales artificiales.

La capacitación fue dirigida a estudiantes de la asignatura de microbiología ambiental cuyo objetivo era la identificación de microorganismos presentes en el prototipo del humedal artificial, por medio de la observación directa de fitoplancton y zooplancton en el microscopio. Adicionalmente en la guía se plasmó información teórica de los microorganismos que intervienen en el proceso, la importancia y su función de estos en el sistema.

El desarrollo de la práctica consistió en tomar una muestra de agua del prototipo con un gotero, posteriormente se procedió a realizar la observación en el microscopio en los objetivos de 4x, 10x, 40x. Como última actividad, los estudiantes realizaron un cuestionario con el fin de evaluar los conocimientos adquiridos.

4.3.4. Guía 4: Componentes ecológicos de los humedales naturales y artificiales.

Se llevó a cabo la socialización de un guía teórico práctica dirigida a los estudiantes de la asignatura de Ecología donde se hacía énfasis en los humedales naturales y artificiales teniendo en cuenta sus características, composición, servicios ecosistémicos, etc. En la fase práctica los estudiantes por medio de la identificación de los componentes del prototipo de humedal artificial

debían reconocer características y función de la vegetación como componente biótico y el sustrato como componente abiótico. Como último paso de la capacitación los estudiantes resolvieron un cuestionario de 5 preguntas, en relación con lo expuesto en la guía.

4.3.5. Guía 6: Humedales artificiales en el tratamiento del agua residual

Para este caso la población seleccionada fueron los estudiantes de la materia tratamiento de agua residual, en la respectiva guía se informó a cerca de los humedales naturales y artificiales, su importancia, la razón por la cual se consideran como una tecnología sostenible para el tratamiento del agua residual, el rango de aplicaciones y porque estos sistemas se consideran como un tratamiento terciario.

En la práctica se consideró la parte de diseño del prototipo para el tratamiento del agua residual y el porcentaje de remoción de los contaminantes de control presentes en la muestra de agua tomada del prototipo de humedal artificial; para finalizar con la actividad se realizó un cuestionario.

5. Análisis y discusión de resultados

A continuación, se presentarán el análisis y la discusión de los resultados obtenidos en la presente investigación.

5.1. Prototipo de humedal artificial híbrido.

En la siguiente sección se exhibe los resultados obtenidos para el objetivo específico número uno propuesto en esta investigación, el cual hace referencia a la construcción del prototipo de HA en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja.

5.1.1. Cálculos de Diseño

El prototipo de humedal artificial está dividido en dos módulos: el primer módulo es humedal subsuperficial vertical y el segundo módulo es un humedal subsuperficial horizontal. A continuación, se muestra el resultado del cálculo de la constante cinética de primer orden, determinada a partir de una temperatura promedio de 19.8 ° C del agua a tratar.

Ecuación 4. Obtención de la constante de temperatura

$$K_{v,t} = 1.104 * 1.06^{19.8^{\circ}\text{C} - 20}$$

$$K_{v,t} = 1.1$$

Fuente: (EPA, 1993)

En el dimensionamiento del humedal artificial se determinaron parámetros de diseño para cada uno de los módulos:

Tabla 2. Parámetros de diseño.

Parámetros	Humedal subsuperficial de flujo vertical (Modulo 1)	Humedal subsuperficial de flujo horizontal (Modulo 2)
Volumen m^3	0.045	0.030
Profundidad del lecho (m)	0.18	0.16
Porosidad	0.40	0.40
DBO Afluente (mg/L)	77	50
DBO Efluente (mg/L)	50	28

Fuente: Autores

Los parámetros: volumen de agua a tratar, profundidad del lecho y porosidad fueron elegidos a criterio. El volumen se determinó a partir de la cantidad de agua deseada a tratar en cada uno de módulos del HA, en el caso de la profundidad del lecho y la porosidad los valores dependen directamente de la cantidad y el tamaño del sustrato en este caso la grava.

El DBO como dato relevante en el diseño del humedal es obtenido a partir del DQO teniendo una correlación de 0,6 esto significa que la Demanda Biológica de Oxígeno es un 60% del valor total de la Demanda Química de Oxígeno, tomada como una fracción lentamente biodegradable (Pire; Rodríguez; Fuenmayor; Fuenmayor, 2011; Ubay E., Sözen S., Orhon D., 1998). La muestra de agua inicial tomada del pozo ubicado en Barón Germania fue de 128.3 mg/L (DQO) en relación al humedal vertical se obtiene un valor de 77 mg/L (DBO) y se define un valor deseado de 50 mg/L como valor criterio de cumplimiento según la Resolución 631 de 2015. Como el humedal horizontal es consecutivo al humedal vertical se toma como referencia inicial 50 mg/L de DBO y 28 mg/L como el valor deseado en el efluente del humedal artificial.

Los cálculos de área superficial de cada uno de los módulos, se presentan a continuación:

Ecuación 5. *Valor del área superficial del HSSFV.*

$$As = \frac{0.045 \text{ m}^3 (\ln 77 \text{ mg/L} - \ln 50 \text{ mg/L})}{1.1 * 0.18\text{m} * 0.40}$$

$$As = 0.245 \text{ m}^2$$

Fuente: (EPA, 1993)

Ecuación 6. *Valor del área superficial del HSSFH*

$$As = \frac{0.030 \text{ m}^3 (\ln 50 \text{ mg/L} - \ln 28 \text{ mg/L})}{1.1 * 0.16\text{m} * 0.40}$$

$$As = 0.245 \text{ m}^2$$

Fuente: (EPA, 1993)

Partiendo que en el método de la EPA determina que la relación largo-ancho es de 2 a 1, es decir que el largo del humedal es 2 veces el ancho. En el caso de los dos humedales se obtuvo un área de 0.245m^2 por consiguiente el largo y ancho para los dos módulos es el mismo:

Ecuación 7. *Valores del largo- ancho para HA.*

$$W = \sqrt{\frac{0.245 \text{ m}^2}{2}}$$

$$W = 0.35 \text{ m}$$

$$L = 2 * 0.35 \text{ m}$$

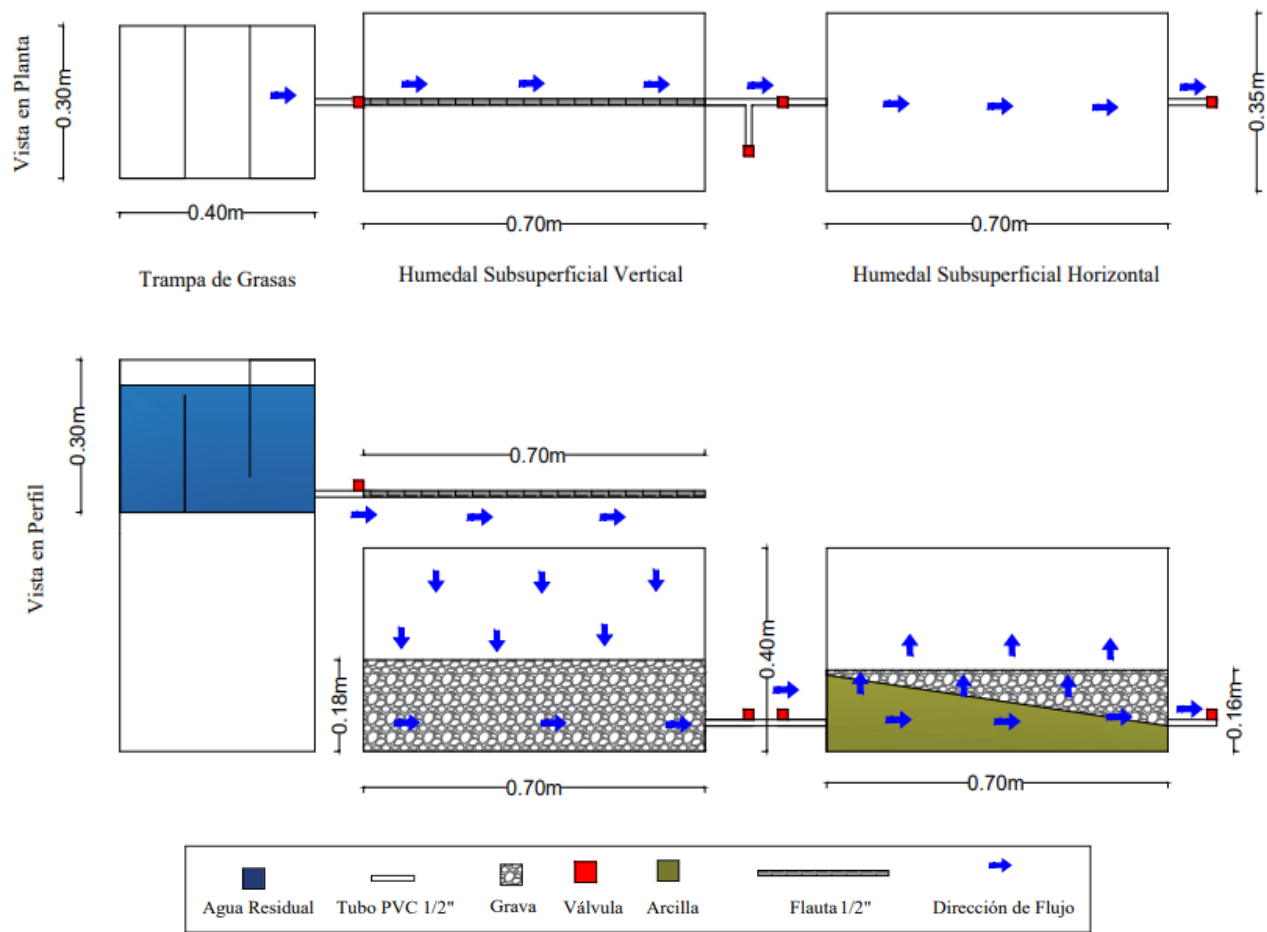
$$L = 0.70 \text{ m}$$

Fuente: (EPA, 1993)

5.1.2. Planos de Diseño

En el **Plano 1** se presenta la estructura del prototipo de humedal artificial híbrido, donde se presentan las dimensiones de la estructura, el sentido del flujo y los componentes que lo conforman.

Plano 1. Estructura del prototipo de humedal artificial híbrido



Fuente: Autores

5.1.3. Tiempo de retención

Es un parámetro empírico de diseño establecido a partir de criterio técnico, obtenido de la observación de un amplio análisis y estudio de sistemas de tratamiento, además posee la ventaja de ser un método rápido en su aplicación. Algunos valores promedio implementados en la experimentación se determinaron teniendo en cuenta lo investigado por (Kadlec & Knight, 1996b; Rousseau et al., 2004; Wood, 1995), donde se definieron tiempos de retención entre 2 a 7 días.

Teniendo en cuenta dichas investigaciones se estableció que para el módulo 1 (HSSFV) el tiempo de retención sería de 2 a 3 días aproximadamente, de igual manera para el caso del módulo 2 (HSSFH).

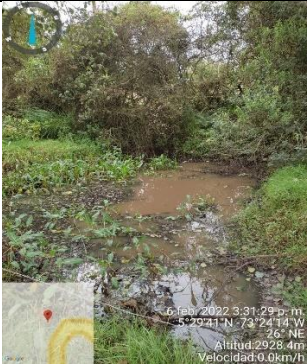
5.1.4. Componentes y materiales que conforma el prototipo de HA

Los componentes y materiales mostrados en la Tabla 3, fueron elegidos a criterio según el tipo de humedal y las condiciones del agua a trata.

En la siguiente tabla se describe cada uno de los materiales usados para el ensamble del prototipo de HA:

Tabla 3. Componentes y materiales del prototipo de HA.

Componente	Material	Descripción	Ilustración
Sustrato	Grava media	Con un tamaño de 5 a 32 mm (aprox), esta se distribuyó de forma uniforme.	
Sustrato	Arcilla	La arcilla se utiliza por su capacidad de intercambio iónico en función de la retención de metales pesados. Permite la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, etc. (Angarita Vargas & Rodríguez Susa, 2006).	

Vegetación	Sombrilla de agua (<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>)	Planta acuática con tallos horizontales, posee nodos radicales y con hojas con pecíolos delgados (Gobierno de España, 2010).	
Vegetación	Junco (<i>Juncus sp.</i>)	Planta cespitosa perenne de color verde oscuro, llegan a tener 1,5-2 m de altura (Rubio Chinguel & Montenegro Quiroz, 2018).	
Afluente	Agua proveniente de escorrentía superficial agrícola	El agua tratada fue recolectada de un pozo ubicado en la vereda Barón Germania, alrededor de este se cultiva papa y se desarrollan actividades de ganadería.	
Estructural	Flauta en PVC	La distribución del flujo en el primer módulo del prototipo se realizó por medio de un tubo de ½" con una longitud de 70 cm, orificios de 5 mm y una distancia de 8 cm entre cada orificio.	
Estructural	Tubo PVC	Se utilizó tubo de ½" con diferentes longitudes para la distribución del flujo en el sistema.	
Estructural	Válvula	Permite el control de la continuidad del flujo en los módulos que conforman al prototipo y para la toma de muestras en la	

		salida de cada módulo.	
Estructural	Vidrio	El grosor del vidrio usado para las estructuras del prototipo fue de 5 mm, el cual es resistente al peso ejercido por el agua y el sustrato adicionado al humedal.	
Estructural	Malla de polipropileno	Malla de polipropileno con orificios de 30 mm, le brindaba soporte a la planta <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> para evitar que las hojas tuvieran contacto con el agua tratada.	
Componente funcional	Bomba de oxigenación	Se oxigenó el agua a tratar con una bomba de capacidad de 0,7 m ³ /h.	
Componente funcional	Trampa de grasas	Permite la remoción sólidos sedimentables y flotantes presentes en la muestra de agua a tratar, esta estructura tiene una capacidad de 0,036 m ³ .	

Fuente: Autores

5.1.5. Construcción y funcionamiento del prototipo de HA

El prototipo de humedal artificial está conformado por una trampa de grasas y dos módulos de humedales. El primer módulo es un humedal subsuperficial de flujo vertical (HSSFV) y el segundo módulo es un humedal subsuperficial de flujo horizontal (HSSFH). A continuación, se explicarán los componentes implementados para la construcción de cada estructura:

- *Trampa de grasas*: Se construyó con dimensiones de 0,4 m de largo, 0,30 m de ancho y 0,30 m de alto. Su función es la remoción de sólidos flotantes (hojas, ramas, etc.) y sólidos sedimentables presentes en la muestra inicial del agua a tratar en el prototipo de HA. Adicionalmente cuenta con una salida conectada al tubo tipo flauta para la distribución del flujo al módulo 1 del prototipo. En esta unidad se oxigenó el agua con la bomba por media hora y posteriormente se dejó en reposo por una hora para el proceso de sedimentación (Ver **Ilustración 2**).

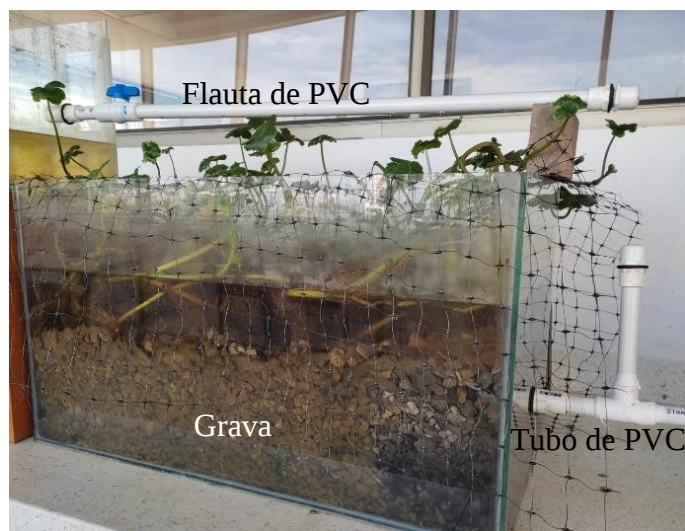
Ilustración 2. *Trampa de grasas.*



Fuente: Autores

- *Módulo 1 -Humedal subsuperficial de flujo vertical (HSSFV)*: Esta estructura se ensambló con láminas de vidrio, las cuales tenían un grosor de 5 mm, el flujo de agua va de arriba hacia abajo, gracias al sistema de tubería tipo flauta implementado. Así, el agua es filtrada por medio de la grava de diferentes diámetros (5 a 32 mm aproximadamente) donde la grava más gruesa se localiza en la parte superior y a medida que va disminuyendo el diámetro de la grava aumenta la profundidad en el humedal (Ver **Ilustración 3**) (Delgadillo et al., 2010). El módulo cuenta con un tubo PVC de ½ pulgada para la conexión con el siguiente módulo, y a su vez este tiene un tubo adicional que permite tomar la muestra de agua para su respectivo análisis.

Ilustración 3. Humedal subsuperficial de flujo vertical.



Fuente: Autores

- **Módulo 2 -Humedal subsuperficial de flujo horizontal (HSSFH):** Esta unidad (Ver **Ilustración 4**) se construyó de igual manera con láminas de vidrio de un grosor de 5 mm, en este sistema el agua circula horizontalmente entre el medio granular y por las raíces de las plantas. Para este caso se usó arcilla dando le una pendiente de 15% aproximadamente y variando la altura de esta a lo largo del prototipo. El agua ingresa por medio de los tubos conectados al módulo 1 y el flujo es controlado con la ayuda de un grifo, adicionalmente tiene una salida al lado derecho de la estructura donde se toman las muestras finales del tratamiento.

Ilustración 4. Humedal subsuperficial de flujo vertical.



Fuente: Autores

5.1.6. Configuración de los ensayos experimentales

Teniendo en cuenta que se realizaron 4 ensayos experimentales en la **Tabla 4** se identifica cada una de las configuraciones según la vegetación utilizada.

Tabla 4. *Ensayos Experimentales.*

No. Ensayo	Humedal Vertical (Módulo 1)	Humedal Horizontal (Módulo 2)
1	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> (Sombrilla de Agua)	<i>Juncus sp.</i> (Junco)
2	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> (Sombrilla de Agua)	<i>Juncus sp.</i> (Junco)
3	<i>Juncus sp.</i> (Junco)	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> (Sombrilla de Agua)
4	<i>Juncus sp.</i> (Junco)	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> (Sombrilla de Agua)

Fuente: Autores

Es importante mencionar que la malla de polipropileno fue implementada en cada uno de los ensayos teniendo como función ser soporte y evitar que las hojas de la Sombrilla de Agua se sumergieran en el agua a tratar.

5.2. Análisis de la efectividad del prototipo de humedal artificial híbrido.

A continuación, se presenta las secciones que hacen referencia a los resultados arrojados de este proyecto, dando respuesta al objetivo específico dos donde se plantea verificar el buen funcionamiento y efectividad del prototipo de humedal artificial por medio del análisis de pruebas fisicoquímicas y microbiológicas de laboratorio.

Los análisis van correlacionados con los cuatro ensayos realizados en el prototipo de humedal artificial, agua de escorrentía agrícola con alta concentración de nutrientes (nitrógeno y fosforo). Los ensayos estuvieron diferenciados por la macrófita utilizada en cada módulo, en el primer y segundo ensayo se utilizó sombrilla de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) en el módulo 1 y junco (*Juncus sp.*) en el módulo 2 y para el tercer y cuarto ensayo se utilizó junco (*Juncus sp.*) en el módulo 1 y sombrilla de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) en el módulo 2.

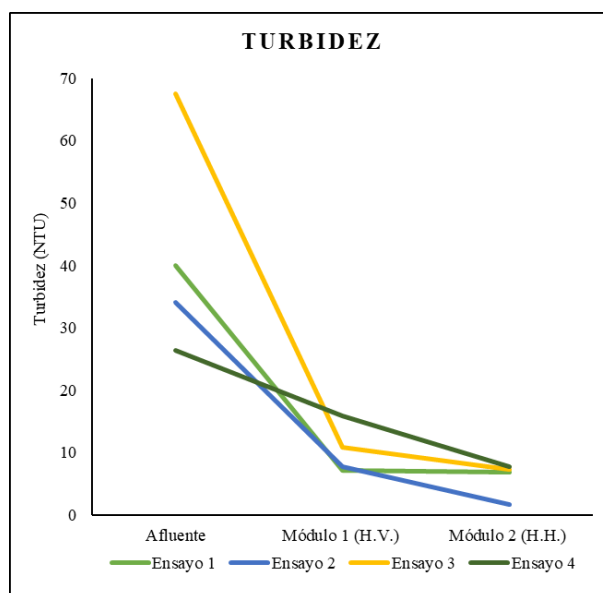
5.2.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos.

5.2.1.1. Turbidez

En los cuatro ensayos realizados se obtuvieron resultados de turbidez presentes en la Gráfica 1. Este parámetro disminuyó de manera significativa en los cuatro ensayos realizados en el prototipo de HA, gracias al sustrato implementado, debido a que posee la capacidad de retener sólidos disueltos y suspendidos que se encuentran en el afluente permitiendo que esta mejore su transparencia y las plantas acuáticas y el zooplankton tengan una mayor capacidad fotosintética (Badillo Guevara et al., 2017). Los porcentajes de remoción para este parámetro evaluado fueron del 83%; 95%; 89%; 70% respectivamente.

Se identifica que la relación existente entre la vegetación y la disminución de turbidez fue la siguiente: en el módulo 1 (humedal vertical) el porcentaje de remoción fue de 80% en presencia de sombrilla de agua y 62% con junco (*Juncus sp.*), para el módulo 2 (humedal horizontal) se presentó una remoción del 42% con sombrilla de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) y con el junco (*Juncus sp.*) la remoción fue del 41%. La sombrilla de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) con una mejor distribución radicular a comparación del junco, constituye un medio eficiente en filtración y absorción de sólidos suspendidos (Martelo & Lara, 2012).

Gráfica 1. Comportamiento de la turbidez

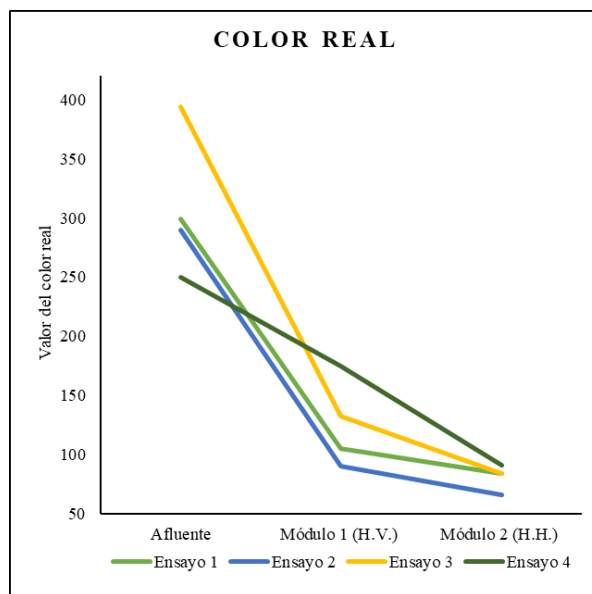


Fuente: Autores

5.2.1.2. *Color real*

El color se puede llegar a presentar en un tipo de agua residual con longitudes de 380 y 490 nm, derivado de sustancias húmicas disueltas y en suspensión. La eliminación de sustancias suspendidas por medio de filtros sintéticos con una porosidad de 0.45µm, deja como resultado el color real o verdadero (APHA et al., 1999). La implementación en el prototipo HA de grava con un diámetro entre 5 a 32 mm y una porosidad de 0.40 fue eficiente en la remoción de color para cada uno de los ensayos como se muestra en la **Gráfica 2**. Los porcentajes de remoción para los ensayos 1 al 4 fueron de 71,9%, 77,2%, 78,7% y 63,6%. Adicionalmente, se analiza el comportamiento de la vegetación en relación a los porcentajes remoción obtenidos, para el caso del módulo (humedal vertical) fueron de 67% en presencia de la sombrilla de agua y 48% en presencia de junco y para el caso del módulo 2 (humedal horizontal) el porcentaje de remoción con sombrilla de agua fue del 42% y 23% en presencia del junco. La remoción de color se ve principalmente relacionada por la presencia de raíces bien desarrolladas en el caso de la sombrilla de agua (Gallego, 2015).

Gráfica 2. *Color real*



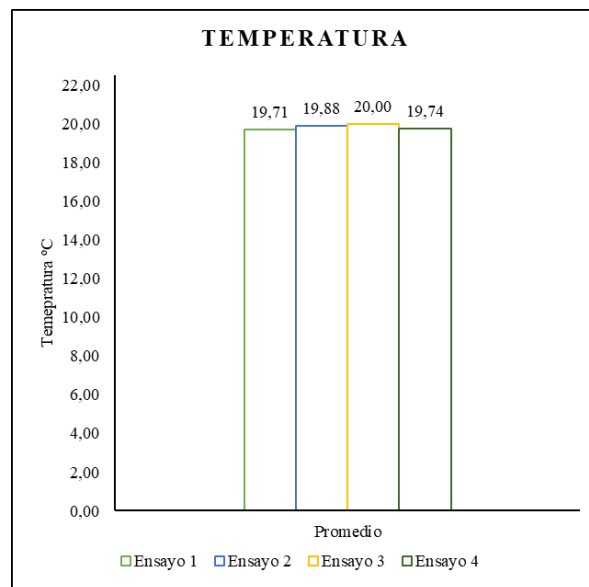
Fuente: Autores

5.2.1.3. *Temperatura*

Teniendo en cuenta los valores registrados de temperatura para los ensayos realizados se evidencia que en promedio se obtuvo un valor de 18,09 °C para el caso del ensayo experimental 1,

para el caso de los otros tres ensayos realizados se evidencio un valor promedio de 19,88 – 20 – 19,74 °C respectivamente. Estas variaciones pueden estar sujetas a que las condiciones ambientales presentes en el sistema incidieron en la alteración térmica del mismo en el momento en que se realizaron las mediciones de este parámetro (Ver la **Gráfica 2**). Adicionalmente esta variable tiene influencia en el comportamiento de la actividad biológica y bacteriana, entre otros (Angarita Vargas, 2004).

Gráfica 3. Valores promedio de temperatura para los ensayos realizados.



Fuente: Autores

5.2.1.4. Conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT)

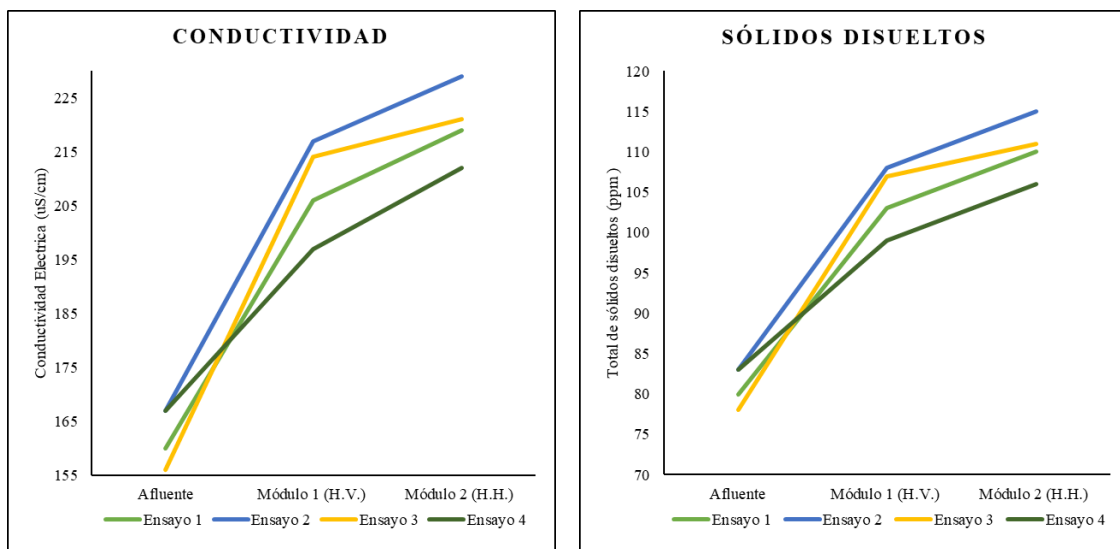
La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad que tiene el agua para transportar la corriente eléctrica, relacionada con la concentración de las sales en disolución las cuales producen iones cargados positivamente y negativamente que se relacionada de manera directa con la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) (Solís-Castro et al., 2018).

Como se puede evidenciar en la gráfica 3 los parámetros de conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales en los ensayos realizados presentaron un aumento debido a que para el caso del afluente los valores fueron de 162,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 81 ppm, y para el efluente, en el módulo 1 correspondiente al humedal de flujo vertical en promedio se obtuvo una conductividad de 208,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 104,25 ppm y en el módulo 2 se presentó un valor promedio de 220,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 110,5 ppm. Este aumento pudo darse por las propiedades de porosidad y permeabilidad presentes en el

medio filtrante implementado (grava y arcilla), la cantidad de raíces, y la distribución de los sustratos, entre otros (Alzate Amariles, 2015). Dichos factores en conjunto dieron paso a la generación de espacios muertos en el prototipo y por dicha razón se registró un aumento en la conductividad eléctrica y los SDT.

Sin embargo, en la Resolución 1207 de 2014 el valor máximo permisible para la conductividad eléctrica es de 1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por ende, el prototipo de humedal artificial estaría cumpliendo con la normatividad vigente y el agua podría ser usada en el riego de cultivos. Se utilizó esta resolución debido a que en la Resolución 631 de 2015 no se encontraba este parámetro.

Gráfica 2. Conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT).



Fuente: Autores

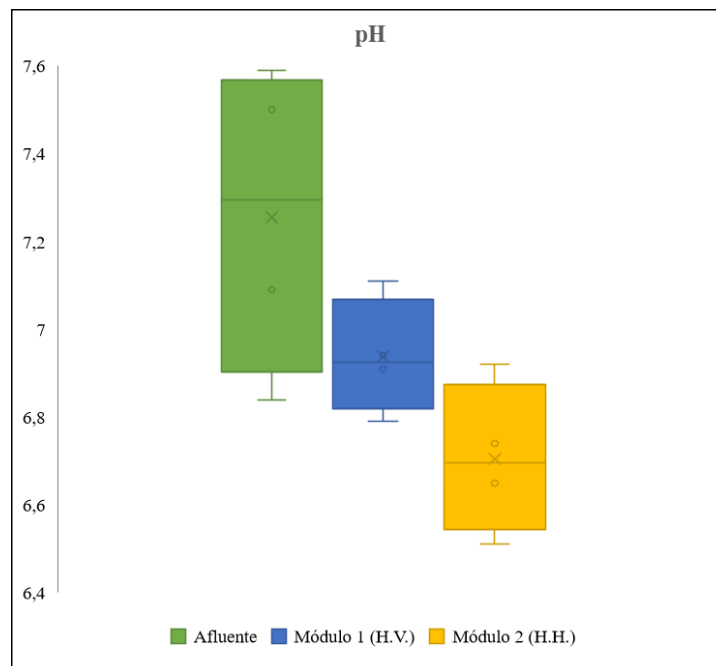
5.2.1.5. pH

El pH se mantuvo alrededor de 7, teniendo en cuenta que se obtuvo un valor 7,3 en el afluente, 6,9 en el módulo 1 y de 6,7 en el efluente registró en el módulo 2. Estos valores corresponden al promedio obtenido de los cuatro ensayos realizados e indican que este parámetro disminuyó levemente en el agua tratada en el prototipo de HA, permitiendo que se desarrolle de manera adecuada la eliminación de contaminantes presentes en el agua residual, debido a que permite una buena reproducción y crecimiento de los microorganismos encargados del tratamiento del agua, dando paso a que se presenten procesos como la nitrificación (Bedoya et al., 2006; Hernández et al., 2015).

Teniendo en cuenta el valor máximo permisible de pH que va desde 6 a 9 consignado en la resolución 631 de 2015, se identifica que para los cuatro ensayos realizados se cumple con este rango, por ende, para este parámetro se estaría cumpliendo con lo establecido en la norma.

Gracias a la oxidación bioquímica y la pérdida de sales de ácidos orgánicos se disminuye el pH, pero cuando por cada mol nitrificador de amonio se liberan dos moles de iones hidronio (H^+) se aumenta el pH y aumenta la alcalinidad presente en el agua, perjudicando de esta manera los procesos presentes en el sistema. Por esta razón la estabilidad del pH está relacionada directamente por la capacidad del humedal para mitigar las variación de carga orgánica (Romero, 2010; Vymazal, 2007).

Gráfica 3. Valores promedio de pH.



Fuente: Autores

5.2.1.6. Oxígeno disuelto y potencial de óxido reducción (ORP)

Como se observa en la gráfica 5 en los cuatro ensayos experimentales, hay variaciones en el valor del potencial de oxido reducción. Para el caso de los ensayos 1, 2, y 4 en los dos módulos que conforman al prototipo este parámetro disminuyó, lo que está relacionado con disminución del oxígeno disuelto en el sistema lo largo de los ensayos. Esta disminución se debe al metabolismo

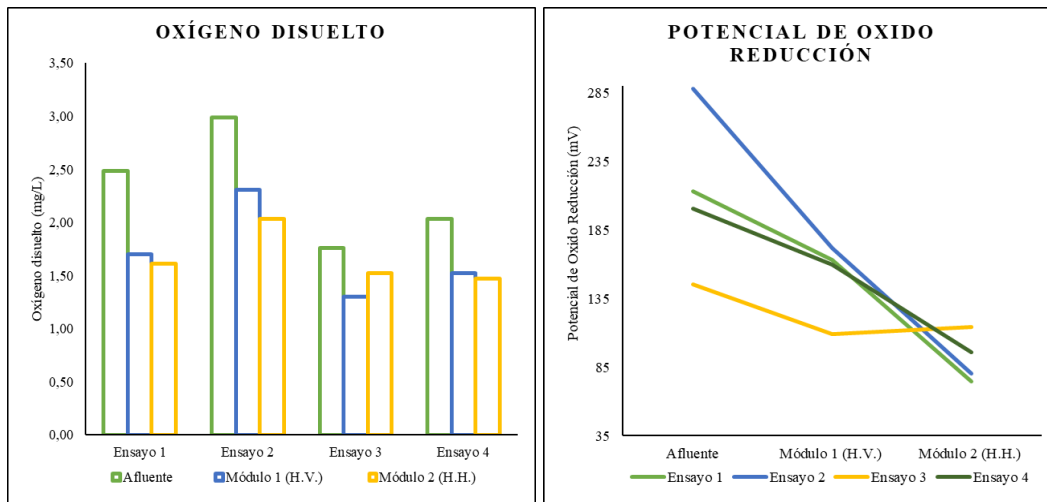
realizado por los microorganismos aeróbicos los que al consumir la materia orgánica y a la oxidación química de sustancias reducidas (Kadlec et al., 2000).

A pesar que el prototipo de HA el agua no está en movimiento lo cual impide un buen aporte del oxígeno en el sistema, las plantas transportan el oxígeno que se genera gracias a la fotosíntesis o por la propagación por medio de sus tejidos, permitiendo la oxigenar de la rizosfera en el humedal. Dicho oxígeno escapa de las plantas mediante las raíces, generando situaciones oxidantes las cuales estimulan la degradación aerobia de la materia orgánica, permitiendo el desarrollo de bacterias nitrificantes (Brix. H, 1993).

Por otra parte, en el ensayo 3 se evidenció que el ORP y el OD aumentaron en módulo 2, este cambio en estos parámetros puede estar ligado a la macrófita usada para este ensayo que fue la *Hydrocotyle ranunculoides*, debido a que su efecto en la oxigenación de la parte radicular de este sistema durante el día. Para este caso se puede decir que el estado fisiológico del material vegetal utilizado se encontraba en mejores condiciones permitiendo de esta manera registrar un aumento del potencial de oxido reducción en este ensayo (Guido, 2006).

Por otro lado, en la gráfica 5 se observa que para el caso del oxígeno disuelto hubo un consumo significativo en los 4 ensayos experimentales realizados debido a que para el caso el ensayo 1 se registró un consumo de 0,87 mg/L, para el caso del ensayo 2 fue de 0,95 mg/L, en el ensayo 3 fue de 0,24 mg/L y para el último ensayo se registró una disminución de 0,56 mg/L. Gracias a estos valores arrojados se identifica que para el caso del OD y el ORP existe una relación directamente proporcional.

Gráfica 4. *Oxígeno disuelto y potencial de óxido reducción (ORP).*



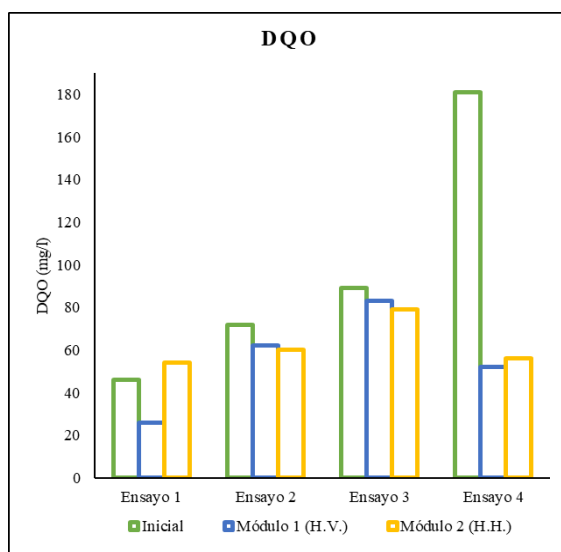
Fuente: Autores

5.2.1.7. *Demanda química de oxígeno (DQO)*

La remoción de DQO en los ensayos fue satisfactorias teniendo en cuenta que los valores finales cumplen con las normas de vertimiento, específicamente la Resolución 631 de 2015. Sin embargo, en el primer ensayo se presentó un aumento de la DQO de 46 a 54 mg/L. Esto se debió que la planta sombrilla de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) se estaba degradando rápidamente y sus hojas no estaban en una posición erecta y emergente, por este motivo se implementó una malla de polipropileno la cual permito darle soporte a la planta evitando alteración de DQO para los ensayos posteriores.

En la **Gráfica 6** se muestran los resultados. En el primer ensayo se tuvo un porcentaje de remoción del 43,5%, en el segundo de 16,7%, en el tercer ensayo de 11,2% y en el cuarto de 69,1%, siendo la remoción más alta de todas. La disminución de DQO se debe esencialmente a la acción realizada por los procesos físicos como lo es la sedimentación y la filtración realizada por el material granulométrico (Brix. H, 1993). Adicionalmente se establece que en relación a la DBO como un 60% del DQO los valores finales obtenidos por cada ensayo cumplieron con la condición de vertimiento de 50mg/L (DQO). En el ensayo uno se obtuvo un valor final de 15,6mg/L, 36mg/L en el ensayo dos, 47,4mg/L ensayo tres y para el ensayo cuatro 33,6mg/L.

Gráfica 5. Comportamiento del DQO.



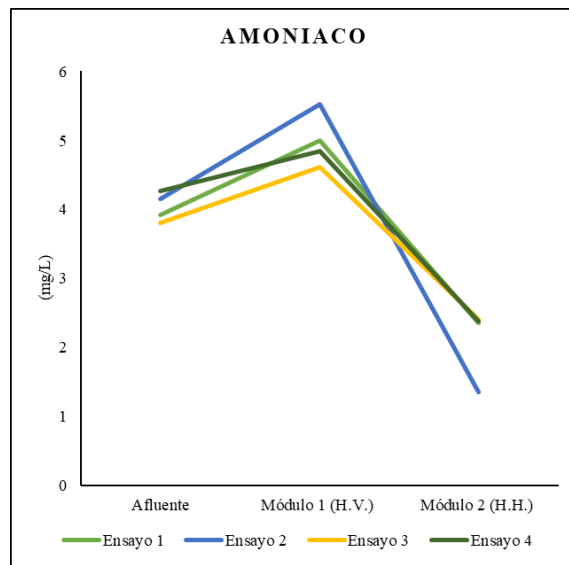
Fuente: Autores

5.2.2. Análisis de contaminantes de control

5.2.2.1. Amoníaco

En la **Gráfica 7** se representa el comportamiento del nitrógeno en forma de amoníaco. En el módulo 1 (humedal de flujo vertical) para todos los ensayos, se presentó un incremento en los valores de su concentración. Esto puede deberse a la reacción de descomposición de materia orgánica y por la alta concentración de fertilizantes de composición nitrogenada (Chen et al., 2007). No obstante, en el proceso de desnitrificación presente en el humedal continuo (modulo 2) se presentó una disminución considerable en la concentración de amoníaco por la reacción de intercambio catiónico con la arcilla fijándose a sus poroso, adicionalmente el amoníaco presenta oxidación en nitritos y nitratos (Lee et al., 2009). La eficiencia de remoción de amoníaco fue del 40%, 67%, 37% y 44%, para los 4 ensayos, en su orden.

Gráfica 6. Valores registrados de Amoníaco



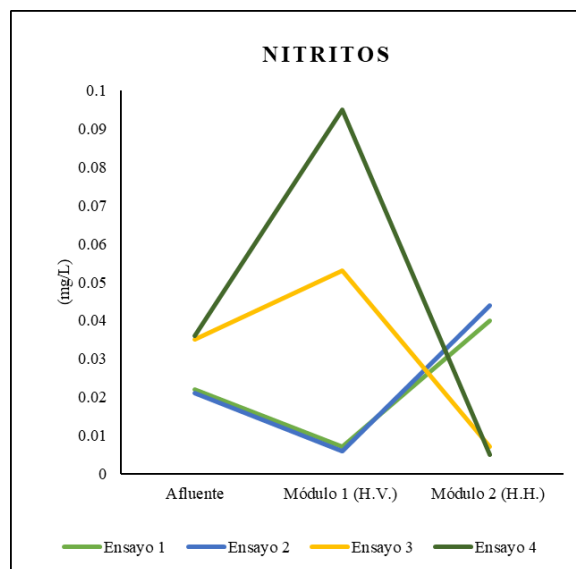
Fuente: Autores

5.2.2.2. Nitritos

Uno de los parámetros más relevantes en cuanto a su impacto negativo sobre la salud humana son los nitritos, teniendo como valor máximo permisible 0,2 mg/L, según el decreto 475 de 1998 (Lasso, 2009). De acuerdo con los datos registrados en los cuatro ensayos realizados, el valor más alto fue de 0,095 mg/L, esto significa que la concentración de nitritos no supero el máximo que permite la normatividad.

A pesar de que los valores finales de la concentración de nitritos no superaron el límite máximo, se identifica que en el primer y segundo ensayo los nitritos tuvieron un aumento en el módulo dos con un concentración de 0,04 y 0,044 mg/L y en el tercer y cuarto ensayo se presentó un incremento en la concentración nitritos con valores de 0,053 y 0,095 en el módulo (HSSV), la variación de este parámetro va en relación al proceso de oxidación del amoníaco, sin embargo, es importante resaltar que, a pesar del incremento de nitritos, se mantiene un comportamiento estable esto determina que el valor máximo permitido en vertimientos no es superado en ninguno de los ensayos realizados. Los valores finales obtenidos para cada uno de los ensayos fueron los siguiente, primer ensayo 0,04 mg/L, segundo ensayo 0,044 mg/L, tercer ensayo 0,007mg/L y cuarto ensayo 0,005 mg/L.

Gráfica 7. Valores registrados de Nitritos



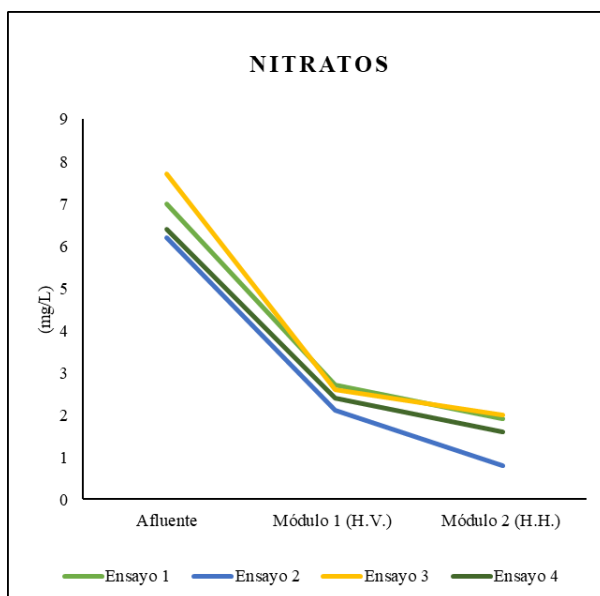
Fuente: Autores

5.2.2.3. Nitratos

La concentración de nitratos presentó una disminución considerable, gracias al proceso de nitrificación, donde el amoníaco en presencia de oxígeno se transforma en nitrito y posteriormente se convierte en nitrato, permitiendo que las plantas tengan una mayor disponibilidad del nutriente para que este sea aprovechado y eliminado del agua residual (Zaman et al., 2008). Teniendo en cuenta los resultados de nitratos obtenidos considerable para cada uno de los ensayos mostrados en **Gráfica 9** se obtiene un porcentaje de remoción, en el caso del primer ensayo el porcentaje fue de 72,9%, para el segundo ensayo el 87,1%, para el ensayo tres fue un 74% y para el ensayo cuatro fue de un 75%, esto representa que el proceso realizado tiene un gran efecto en la eliminación de compuestos derivados del nitrógeno.

Los resultados obtenidos en cuanto a remoción de nitratos permiten reconocer que en el módulo 1 con la sombrilla de agua se removió en promedio 4,2 mg/L y el con el junco se removieron 4,55 mg/L de nitratos, para el módulo 2 en presencia de la sombrilla de la remoción fue de 0,70 mg/L en promedio y con junco se removió 1,05 mg/L. Se reconoce que el junco tiene una mayor eficiencia en la remoción de nitrato debido a la alta capacidad de asimilación de nutrientes que utilizan para su crecimiento (Frers, 2009).

Gráfica 8. Valores registrados de Nitratos



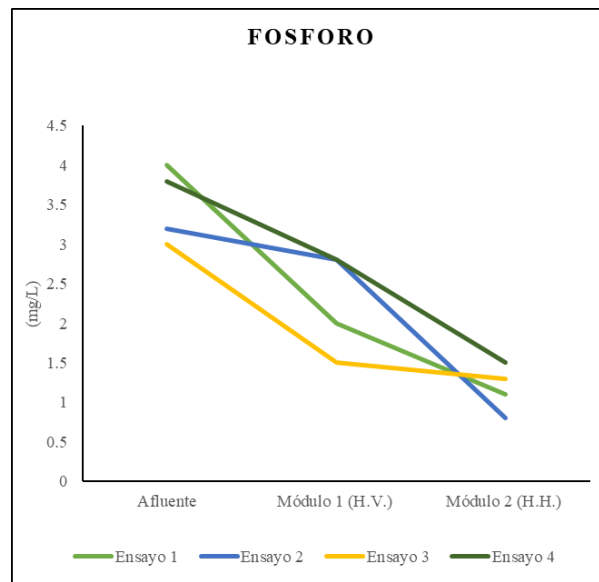
Fuente: Autores

5.2.2.4. Fósforo

La remoción de fósforo en los humedales artificiales varía entre un 40 a un 60% dependiendo de la carga de entrada, esta remoción en primera instancia depende de la acción de los microorganismos tomando parte del fósforo para fijarlo y luego ser asimilado por las raíces de las plantas (Vymazal, 2007). En la **Gráfica 10** se muestra el comportamiento de remoción para cada uno de los ensayos realizados en el prototipo de HA. Los porcentajes de remoción analizados por cada uno de los ensayos fueron los siguientes: 72,5%, 75%, 56,7% y 60,5%, estos valores determinan una gran efectividad por parte del proceso que realizan los microorganismos y las macrófitas en la remoción de fósforo.

La remoción de fosforo en relación a las plantas utilizadas fue la siguiente: En el módulo 1 con sombrilla de agua se removi6 en promedio 1,2 mg/L y en presencia de junco se removi6 1,25 mg/L, para el módulo 2 implementado sombrilla de agua se removi6 en promedio 0,75 mg/L y 1,45 mg/L con junco, este habitualmente tiene un tama6o promedio de 90cm, sin embargo, en el prototipo del humedal artificial se implementaron plantas con un tama6o entre 50 y 60cm, esto permite determinar que por su tama6o las plantas tuvieron absorci6n considerable de fosforo debido que este aporta al crecimiento y desarrollo de la planta (Maine M. Hadad H. 2007).

Gráfica 9. Comportamiento del Fósforo



Fuente: Autores

5.2.3. Análisis microbiológico

5.2.3.1. Número más probable (NMP)

La detección y enumeración de coliformes totales y *Escherichia coli* permitió un análisis a partir de la aplicación del método número más probable (NMP) y determinar la remoción en cada uno de los ensayos, estos valores se muestran en la **Tabla 5**, permitiendo reconocer que la remoción más significativa fue en el primer ensayo donde se eliminó un 100% de *Escherichia coli*, y un 58% coliformes totales. En el segundo ensayo se removieron un 16% de los coliformes totales, en el tercero un 92% y en el cuarto un 50%. El efecto de las plantas acuáticas presentes en el prototipo de HA (junco y sombrilla de agua) tienen la capacidad de neutralizar o eliminar agentes patógenos (León et al., 2018). Adicionalmente, se establece que el material con el cual se construyó el humedal artificial en este caso vidrio de 5 mm, permite la entrada de radiación solar provocando la inactivación de bacterias y otros patógenos (Márquez-bravo, 2000).

Tabla 5. Resultados obtenidos para coliformes totales y fecales en los ensayos realizados.

No Ensayo	Coliformes Totales (NMP)		No	Coliformes Fecales (NMP)	
	Inicial	Final		Inicial	Final
1	23590	9880	1	100	0
2	72093,6	60490	2	-	-

3	88377,9	7272,5	3	-	-
4	123399,6	61368,3	4	-	-

Fuente: Autores

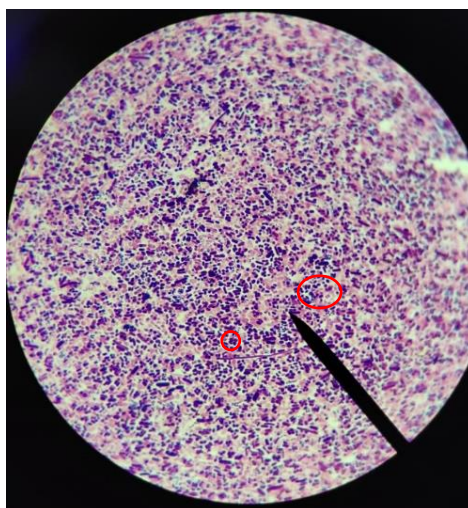
5.2.3.2. Tinción de Gram

Para las muestras obtenidas del proceso de incubación microbiana en agar se realizó la tinción de Gram, por medio de este método se logró identificar la presencia de cocos y bacilos Gram positivos y Gram negativos en los dos módulos del prototipo de HA.

En las **Ilustraciones 5,6,7** se pueden observar la posible presencia de:

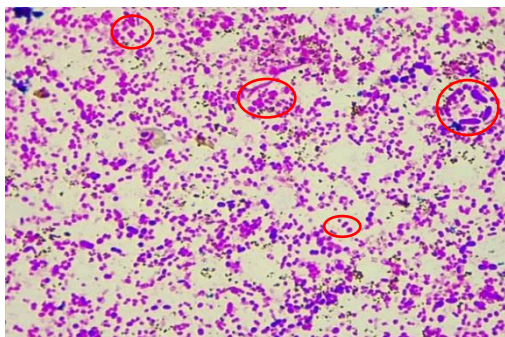
- *Pseudomona*- corresponden al género de bacilos aerobios Gram negativos, son de las más comunes y poseen bajos requerimientos nutricionales (Apella, María; Araujo, 2005).
- *Flavobacterium*- Se encuentran en gran proporción en aguas y suelos, estos bacilos poseen poca movilidad (Apella, María; Araujo, 2005).
- *Cocos*- los cuales poseen una forma esférica, estos se presentaron de diversas formas las cuales fueron: Diplococos, estreptococos, tétradas.

Ilustración 5. Muestra inicial (afluente)- Ensayo 1.



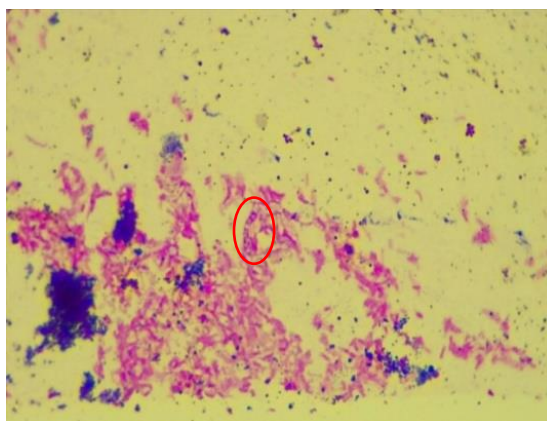
Fuente: Autores

Ilustración 6. *Muestra inicial (afluente)- Ensayo 3*



Fuente: Autores

Ilustración 7. *Muestra inicial (afluente)- Ensayo 4.*



Fuente: Autores

Los microorganismos son de suma importancia en el sistema del prototipo HA debido a que permiten la transformación del nitrógeno en diversas formas biológicamente útiles. Por ejemplo intervienen en la presencia de distintas especies nitrógeno y estas influyen a su vez en el metabolismo del material vegetal. Además para que se registre una adecuada asimilación de nutrientes por parte de las plantas se transforma el fósforo insoluble en una sustancia soluble que se encuentra presente en la estructura; de igual manera los microorganismos procesan los compuestos orgánicos y liberan dióxido de carbono y otros gases en zonas aeróbicas y anaeróbicas presentes en el prototipo de HA (Estrada, 2010). Por otro parte se determina que las bacterias rizosféricas localizadas en el sistema radicular de las plantas utilizadas en el prototipo de HA, poseen la capacidad de degradación y eliminación de contaminantes (Chaudhry et al., 2005).

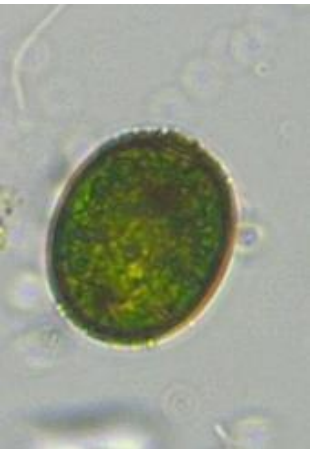
5.2.3.3. Observación directa de la muestra

El análisis realizado a partir de la observación directa de la muestra de agua con presencia de sedimentos permitió identificar microorganismos (fitoplancton y zooplancton) presentes en el prototipo de humedal artificial (ver **Tabla 6**).

Tabla 6. Identificación de zooplancton y fitoplancton

Especie	Tipo	Descripción	Fotografía
<i>Closterium acutum</i>	Fitoplancton	Su morfología de cono doble permite que este microorganismo tenga fuente considerable de carbono utilizado en la fotosíntesis (Muñoz-López et al., 2017).	
<i>Phacus pleuronectes</i>	Fitoplancton	Células de 29 a 46 µm de largo y 31 a 32 µm de ancho; con apéndice. Su morfología y tamaño se relacionan directamente con la gran capacidad fotosintética que tiene esta especie (Salazar, 2004).	

<i>Philodina roseola</i>	Zooplankton	Estos rotíferos son relevantes y de gran importancia en los ciclos biogeoquímicos y en la productividad orgánica de los humedales como consecuencia de su alta capacidad metabólica. Consumen la materia orgánica en degradación presente en los sedimentos (Moreira et al., 2016).	
<i>Philodina bdelloidea</i>	Zooplankton	Este rotífero tiene una longevidad de 48 días en promedio y el intervalo de una generación a otra es de cuatro días, esto representa una gran tasa de reproducción. Estos microorganismos aprovechan la materia orgánica en descomposición	

		(Quintero et al., 2009).	
<i>Cyanothece aeruginosa</i>	Fitoplancton	Células unicelulares ovals, de color verde oliva y de tamaño entre 4.5 a 8.1 μm largo y 4.5 a 6.0 μm de ancho. Estos microorganismos tienen la particularidad de formar biopelículas fotosintéticas (Galindo-Alcázar et al., 2018).	
<i>Leptolyngbya sp</i>	Fitoplancton	Son cianobacterias procariontes fotoautótrofas presentes en gran variedad de hábitats esto permite determinar su gran importancia como indicador del buen estado del cuerpo hídrico donde se llegan a encontrar (Alcántara et al., 2020).	
Fuente: Autores			

5.3.Estrategia de educación ambiental.

En el siguiente apartado se exponen los resultados que hacen referencia al objetivo específico número tres cuyo fin está encaminado a establecer una estrategia de educación ambiental basada en los resultados obtenidos en el funcionamiento del prototipo de humedal artificial híbrido.

5.3.1. Material suministrado a los estudiantes como recurso informativo.

En los anexo 9 se encuentran la portada de una de las guías informativas realizadas para las asignaturas de introducción a la ingeniería ambiental (Guía 1), técnicas de campo (Guía 2), microbiología (Guía 3), ecología (Guía 4) y tratamiento de agua residual (Guía 5). En las cuales se presenta información acerca de la definición de humedales naturales y artificiales, su importancia, por qué se consideran una tecnología eficiente para el tratamiento del agua, el rango de aplicaciones, los componentes que hacen parte del sistema y los parámetros que se deben medir en campo y laboratorio para evaluar su eficiencia. Antes de iniciar las respectivas capacitaciones se realizaron preguntas de manera oral a los estudiantes sobre los humedales artificiales y se evidenció que existía falta de información en la implementación, funcionamiento, mantenimiento y eficiencia para el tratamiento del agua residual, en todos los niveles

5.3.2. Desempeño de los estudiantes participes en la estrategia de educación ambiental.

Para los cinco módulos implementados los estudiantes desarrollaron un cuestionario sobre la temática presentada la cual estaba dirigida hacia la implementación y funcionamiento del prototipo de humedal artificial. En la **Tabla 7** se presentan las calificaciones obtenidas por los estudiantes, con una nota promedio de 4.4 para la asignatura introducción a la ingeniería ambiental, 3.9 para técnicas de campo, 4.9 en microbiología ambiental, para ecología fue de 4.0 y por último para tratamiento de agua residual la cual correspondió a 3.4. Se identifica que en general se obtuvieron buenos resultados (superior a 3.0) los cuales permiten afirmar que las actividades teórico- prácticas llevadas a cabo dieron paso a que los estudiantes conocieran acerca de esta tecnología sostenible no convencional, la importancia de su implementación y funcionamiento (Ver **Anexo 8**).

Tabla 7. Resultados obtenidos de los cuestionarios aplicados a los estudiantes

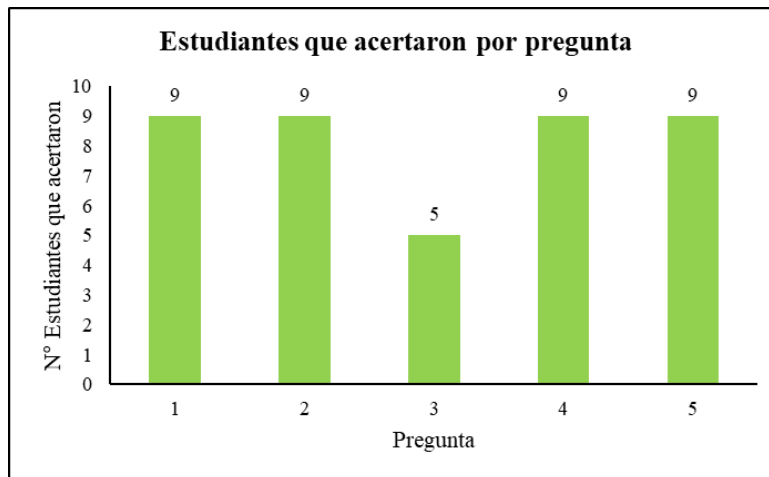
Calificación de 1 a 5	Guía 1	Guía 2	Guía 3	Guía 4	Guía 5
1	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	1
3	0	2	0	2	2
4	5	7	2	2	1
5	4	5	12	2	1
N ° estudiantes	9	15	14	6	5
Promedio de calificación	4.4	3.9	4.9	4.0	3.4

Fuente: Autores

5.3.2.1. Guía 1: Humedales naturales y artificiales:

El desempeño que tuvieron los estudiantes de la asignatura introducción a la ingeniería ambiental fue muy bueno con una nota promedio de 4.4, se reconoce que en las preguntas 1, 2, 4 y 5 los nueve estudiantes participantes contestaron correctamente, sin embargo, en la pregunta 3 de los nueve estudiantes, cuatro contestaron de forma incorrecta (ver **Grafica 12**). Esta pregunta tenía como tema central “¿Cuáles de los siguientes ejemplos corresponden a humedales artificiales?” se infiere sobre la falencia que pueden tener los estudiantes al reconocer la función de los humedales artificiales en un campo de aplicación que no solamente se relacione directamente en tratamiento de agua residuales, si no de igual forma en la aplicación como sistemas de captación, almacenamiento y posterior tratamiento como por ejemplo: estanques, reservorios y zonas inundables estacionalmente.

Gráfica 10. *Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 1.*

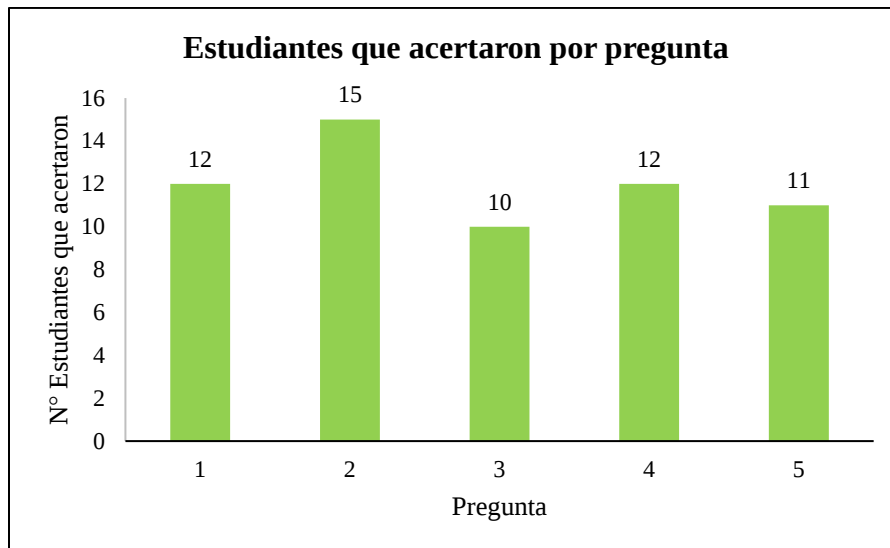


Fuente: Autores

5.3.2.2. Guía 2: Protocolo de muestreo de agua y medición de parámetros.

Los estudiantes de la asignatura de técnicas de campo con una nota promedio de 3.9, tuvieron un buen desempeño. En este caso las preguntas tenían como tema central el protocolo de muestreo de agua, medición de parámetros fisicoquímicos y su respectivo análisis. Como se muestra en la **Grafica 13** la mayor parte de los estudiantes contestaron correctamente las preguntas 1, 2 y 4, para el caso de las preguntas 3 y 5 se identifica que menos de 11 estudiantes contestaron correctamente. Esto permite reconocer que la dificultad de estas dos preguntas se reflejó en el reconocimiento y análisis de parámetros químicos como lo son amoníaco, nitritos, nitratos y fósforo. Esta falencia posiblemente radica en la poca intervención y análisis de este tipo de contaminantes de control, debido a que estos son los que principalmente se buscan remover del agua de escorrentía de una zona agrícola a partir del tratamiento realizado en el humedal artificial.

Gráfica 11. *Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 2.*

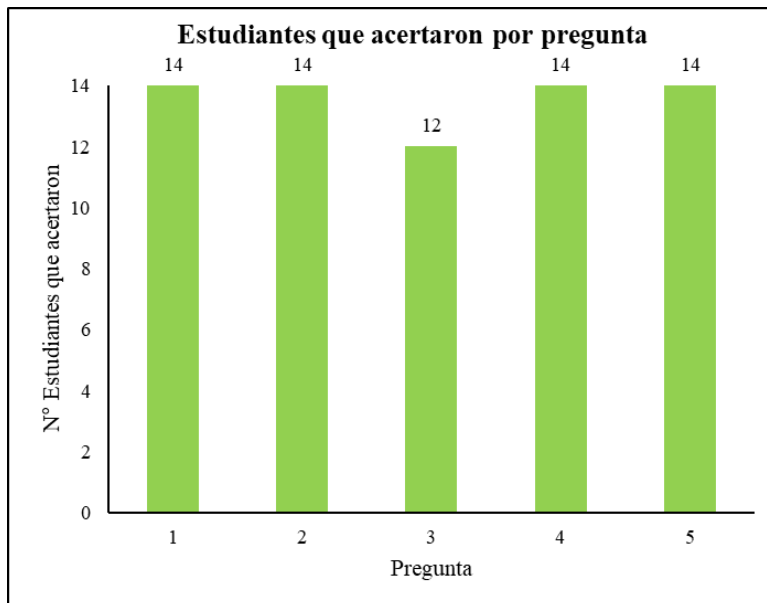


Fuente: Autores

5.3.2.3. Guía 3: Microorganismos presentes en los humedales artificiales.

El grupo con mejor desempeño en el cuestionario fue el de microbiología con una nota promedio de 4.9, se logra identificar que casi todos los estudiantes contestaron de forma correcta la totalidad del cuestionario como se muestra en la **Grafica 14**. Este buen desempeño posiblemente se ve relacionado con la actividad desarrollada en laboratorio donde los mismos estudiantes tomaron la muestra del agua a analizar y la llevaron a observación al microscopio, esto les permitió tener una noción más amplia de la identificación de zooplancton y fitoplancton y sus respectivas funciones, temas centrales que se presentaron en el cuestionario.

Gráfica 12. *Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 3.*

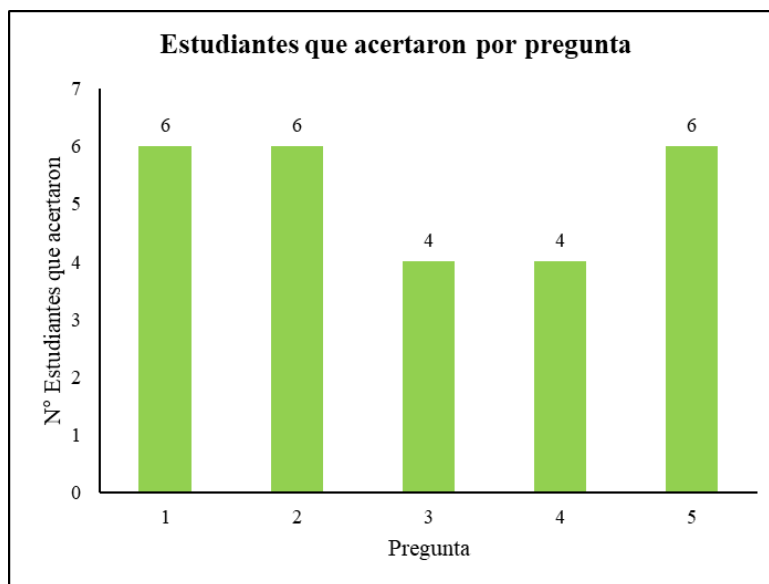


Fuente: Autores

5.3.2.4. Guía 4: Componentes ecológicos de los humedales naturales y artificiales.

Los resultados del cuestionario desarrollado para la asignatura de ecología determinan que el desempeño fue bueno con una nota promedio de 4.0. En el caso de las preguntas 1, 2 y 5 se identifica que los 6 estudiantes contestaron correctamente (ver **Gráfica 15**), sin embargo, se reconoce que en las preguntas 3 y 4 no todos los estudiantes contestaron correctamente, esto permite deducir que el nivel de dificultad está relacionado con la función de los componentes de los humedales artificiales, debido a que cada componente tiene su función en específico.

Gráfica 13. *Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 4.*

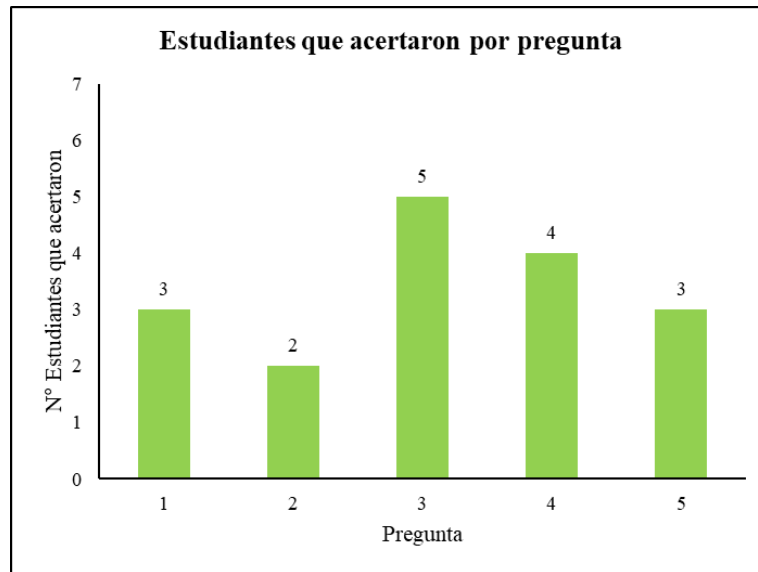


Fuente: Autores

5.3.2.5. Guía 5: Humedales artificiales en el tratamiento del agua residual.

El grupo de tratamiento de agua residual obtuvo un anota promedio de 3.4, presentando la menor nota promedio en comparación a los otros grupos. Sin embargo, se cumple el rango de aprobación que es superior a 3.0. Este desempeño va correlacionado al desarrollo de esta guía, teniendo en cuenta que se manejaron temas como: función de los humedales artificiales, cálculos de diseño y análisis del comportamiento de los contaminantes de control. Es importante resaltar que los temas en esta guía tuvieron cierto grado de dificultad debido a que la cantidad de información que se manejó fue amplia, por consiguiente, el desempeño de los estudiantes indica la necesidad de implementar nuevas estrategias que permitan instruir y capacitar a los estudiantes con temas específicos y con un porcentaje de información sesgada con mayor relevancia en el aprendizaje.

Gráfica 14. *Estudiantes que acertaron en las preguntas de la guía 5.*



Fuente: Autores

6. Impacto social y humanístico del proyecto

El desarrollo del proyecto tiene impacto relevante en dos pilares, la investigación y la educación, en primera instancia se establece que la implementación de tratamientos de agua no convencionales como por ejemplo humedales artificiales son alternativas sostenibles de gran relevancia a nivel ambiental y social, adicionalmente la oportunidad de suministrar información de análisis permite que las investigaciones sobre estas estrategias se consoliden y creen un mayor interés en la aplicación de este tipo de tratamientos de agua. No obstante, la importancia en enfatizar y enfocar la investigación en la etapa de análisis de laboratorio permite tener resultados de efectividad en la remoción de contaminantes.

Evalutando el campo de la educación ambiental se establece que la implementación de estrategias que permitan capacitar a las nuevas generaciones sobre alternativas sostenibles en base al tratamiento de agua refuerza el conocimiento en esta disciplina. La oportunidad de conocer el funcionamiento de un HA a escala piloto, permite tener como experiencia la utilización de la estructura hidráulica, adicionalmente por medio de análisis fisicoquímicos y microbiológicos se tiene noción sobre la efectividad del tratamiento por medio de las pruebas de laboratorio, evaluando los contaminantes y agentes patógenos. Esta estrategia de educación impulsa el interés por implementar alternativas sostenibles en el tratamiento de agua residual.

7. Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación se puede concluir que la implementación del prototipo permitió que los estudiantes conocieran más a cerca de esta tecnología de tratamiento sostenible, en cuanto al funcionamiento, operación y mantenimiento de las estructuras que conforman al sistema propuesto en el proyecto. Adicionalmente, la construcción de este prototipo permite que más estudiantes tengan la posibilidad de llevar a cabo nuevas investigaciones que tengan como propósito generar un impacto positivo sobre el tratamiento de agua residual.

La construcción del prototipo permitió identificar los aspectos operativos que se deben considerar a la hora de ensamblar todos los materiales que hacen parte de la estructura, debido a que es de suma importancia un adecuado acoplamiento de estos para que esta cumpla con su función de remoción de contaminantes presentes en el agua residual. Además, se reconoce que por medio de la definición de parámetros de diseño se determina la capacidad y dimensionamiento del prototipo de humedal artificial, evaluando su eficiencia en la remoción de contaminantes que están presentes en agua de escorrentía agrícola.

Los resultados arrojados referente a los contaminantes considerados en el desarrollo de este proyecto permitieron concluir que el segundo ensayo fue el más eficiente, debido a que se obtuvo remoción de amoníaco en un 67%, 87% en nitratos y 75% en fósforo, en el caso de los nitritos la mayor eficiencia en remoción fue en el cuarto ensayo con un porcentaje de remoción de 86%. Para este caso experimental los parámetros permiten comprobar la eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en aguas de escorrentía agrícola, debido a que el nitrógeno y fósforo son removidos en gran proporción, evitando un proceso eutrofización que perjudica la dinámica del humedal artificial.

Se determina que la eficiencia en remoción de contaminantes está directamente correlacionada con los componentes de cada humedal. En el caso del humedal de flujo vertical se evidencia una mayor eficiencia en la remoción de parámetros físicos con la implementación de la sombrilla de agua y la grava como sustrato, disminuyendo la turbidez en un 80% y en un 67% el color, esto a causa del tamaño de las raíces y la capacidad de filtración realizado por la grava. También, se reconoce que en el humedal de flujo horizontal los componentes que tuvieron mejor desempeño fue el junco y la arcilla presentando una remoción de 1,45 mg/L de fósforo y 1,05mg/L de nitratos,

debido a la alta capacidad de asimilación de nutrientes por parte del junco y a la acción de intercambio catiónico realizado por la arcilla. Esto permite inferir que el sistema de humedal artificial híbrido con mayor eficiencia debe estar estructurado de la siguiente manera: En primera instancia el módulo 1 debe estar compuesto por la planta sombrilla de agua y grava, encargados de la disminución de parámetros físicos, continuo un módulo 2 compuesto por junco y arcilla que principalmente atribuyen a la remoción y disminución de parámetros químicos.

Se identificó que la estrategia de educación ambiental funcionó como apoyo para que los estudiantes reforzarán sus conocimientos sobre el tratamiento de agua residual con sistemas no convencionales, gracias a que las actividades desarrolladas permitieron identificar los componentes y características propios del prototipo de humedal artificial híbrido. Sin embargo, se destaca que se debe complementar la estrategia propuesta con el fin de reforzar algunos aspectos relacionados a los diferentes tipos de humedales implementados en otros campos de aplicación.

En el desarrollo del proyecto se evidencia que la capacidad de solucionar un problema como es la contaminación hídrica, permite que la aplicación del conocimiento técnico en el diseño y construcción tenga un aporte significativo en la búsqueda de promover la implementación de sistemas sostenibles en el tratamiento de agua por medio de la enseñanza y capacitación a nuevas generaciones, que a futuro van a tener la responsabilidad de velar por el cuidado del recurso hídrico y proponer nuevas alternativas de tratamiento eficientes y eficaces.

8. Recomendaciones

Se recomienda el tratamiento de otro tipo de agua en el prototipo de humedal artificial, con el fin de comprobar su efectividad, en el cual se tengan en cuenta las mismas variables consideradas en esta investigación, para realizar una comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y así analizar el funcionamiento y la eficiencia del sistema propuesto.

Se sugiere la creación de un curso MOOC, el cual reúna la información suministrada en las cinco guías implementadas, este curso como material de suministro para docentes y estudiantes que a futuro estén interesados en la ejecución de proyectos relacionados con la temática tratada en la presente investigación.

Para el aprovechamiento del agua tratada en el prototipo de humedal artificial se recomienda que sea utilizada en la limpieza y adaptación de las plantas que pretenden ser implementadas en el sistema tratamiento, esto con el objetivo de eliminar contaminantes provenientes de la zona de extracción que puedan alterar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Referencias

- Alcántara, M., Jiménez, J., & Úrizar, E. (2020). Aspectos ecológicos, taxonómicos y de distribución de cianobacterias bentónicas en cinco ríos de la región central de México. *Acta Botanica Mexicana*, 127. <https://doi.org/10.21829/ABM127.2020.1639>
- Alzate Amariles, E. Y. (2015). *Influencia del pH y el tipo de macrofitas en la remoción de materia orgánica y cadmio de un drenaje sintético de minería de carbón, por medio de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto*. Universidad de Antioquia.
- Angarita Vargas, S. M. (2004). *Humedales artificiales de flujo sub-superficial en el tratamiento de agua residual urbana. estado del arte y diseño*. 131.
- Angarita Vargas, S. M., & Rodríguez Susa, M. S. (2006). *Hipótesis de optimización en humedales de flujo subsuperficial en el tratamiento de agua residual urbana – énfasis en la retención de metales – Estructplan* [Universidad de Los Andes]. <https://estrucplan.com.ar/hipotesis-de-optimizacion-en-humedales-de-flujo-subsuperficial-en-el-tratamiento-de-agua-residual-urbana-enfasis-en-la-retencion-de-metales/>
- Apella, María; Araujo, P. (2005). *Microbiología de agua. Conceptos básicos* (pp. 33–50). Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua.
- APHA, A. P. H. A., AWWA, A. W. W. A., & WEF, W. E. F. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- Arboleda, C. ., Arismendi, L. ., Sepúlveda, M., Rodríguez, M., & Betancur, J. (2016). Verificación de la metodología Colilert para la determinación y cuantificación de Coliformes totales y *Escherichia coli* en una matriz de agua natural. *Revista Politécnica*, 12(22), 105–112.
- Arias, C., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17–24.
- Arteaga Cortez, V. M., Quevedo Nolasco, A., Valle Paniagua, D. H. del, Castro Popoca, M., Bravo Vinaja, Á., & Ramírez Zierold, J. A. (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. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2019-05-12>
- Baquerizo, M., Acuña, M., & Solís Castro, M. (2019). Contaminación de los ríos: caso río Guayas y sus afluentes. *Manglar*, 16(1), 63–70. <https://doi.org/10.17268/MANGLAR.2019.009>
- Bedoy, V., Barba, G., Sales, C., Soto, R., Angulo, M., Carrera, E., & Fuente, G. (2010). *Guía de actividades didácticas para educadores ambientales de los humedales del Altiplano Central Mexicano*. Universidad de Guadalajara.
- Bedoya, O., Montoya, D., & Castrillón, O. (2006). Efecto del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost. *Producción + Limpia*, 1(2), 87–98.
- Belmont, M. A., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sánchez, A., & Metcalfe, C. D. (2004). Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico. *Ecological Engineering*, 23(4–5), 299–311.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.003>

- Bernal González, M. (2012). Contaminación del agua por plaguicidas. In R. H. Pérez Espejo & A. Aguilar Ibarra (Eds.), *Agricultura y contaminación del agua* (Primera edición, pp. 79–105). UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas. <http://ru.iiec.unam.mx/1885/1/AGRIContAgua-IMPRESIÓN-12-10-2012.pdf>
- Betancourt Aguilar, C. R., Tartabull Puñales, M. T., & Labaut Betancourt, M. Y. (2017). El manejo integrado del agua en la agricultura: necesidad de implementación y aspectos vinculados. *Revista Científica Agroecosistemas*, 5(2), 40–54. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/119>
- Brix, H. (1993). Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates. . In *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. (pp. 391–398). Lewis Publishers.
- Brown, D. ., & Reed, S. . (1994). Inventory of of constructed wetlands in the United States. In *IAWQ Water Science and Technology*, 29, 309–318.
- Chafloque, W. L., & Gómez, E. G. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 9(17), 85–96. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v9i17.699>
- Chaudhry, Q., Blom-Zandstra, M., Gupta, S., & Joner, E. J. (2005). Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 12(1), 34–48. <https://doi.org/10.1065/espr2004.08.213>
- Chen, J., Shi, H., & Lu, J. (2007). Electrochemical treatment of ammonia in wastewater by RuO₂ – IrO₂ – TiO₂ / Ti electrodes. *Applied Electrochemistry*, 37, 1137–1144. <https://doi.org/10.1007/s10800-007-9373-6>
- CONAGUA. (2012). *Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales artificiales*.
- Delgadillo López, A. E., González Ramírez, C. belardo, Prieto García, F., Villagómez Ibarra, J. R., & Acevedo Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 597–612.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Andrade, M., & Pérez, L. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*.
- EPA. (1993). *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: A technology assessment*.
- Esponda Aguilar, P. L. (2001). *Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales* [Universidad Nacional Autónoma de México]. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000295062
- Estrada, I. (2010). *Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para*

- remoción de metales pesados en aguas residuales*. Universidad tecnológica de Pereira.
- Fenoglio Limon, F. E. (2003). *Transferencia de oxígeno por convección en sistemas que simulan humedales artificiales utilizando columnas empacadas* [Universidad Nacional Autónoma de México]. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000317543
- Frers, C. (2009). Carnitine shows promise against risk factor for cardiovascular disease. In *Alternative Medicine Alert* (Vol. 12, Issue 2).
- Galindo-Alcázar, O., Medina Jaritz, N. B., Garduño-Solórzano, G., & Olvera-Ramírez, R. (2018). Cianobacterias y microalgas de biopelículas superficiales de la zona arqueológica De Malinalco, México. *Polibotánica*, 45, 131–146. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.10>
- Gallego, D. (2015). Caracterización de las macrófitas del Humedal Meandro Del Say como insumo de las herramientas de conservación. *Universidad Santo Tomas*, 79. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2543/Gallegodiana2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2543/Gallegodiana2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García de la Fuente, C. (2013). Parámetros fisicoquímicos del agua. *PV ALBEITAR*. <http://albeitar.portalveterinaria.com/imprimir-noticia.asp?noti=12664>
- Gerba, C. P., Thurston, J. A., Falabi, J. A., Watt, P. M., & Karpiscak, M. M. (1999). Optimization of artificial wetland design for removal of indicator microorganisms and pathogenic protozoa. *Water Science and Technology*, 40(4–5), 363–368. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00519-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00519-3)
- Gobierno de España. (2010). *Catálogo español de especies exóticas invasoras*.
- González Gómez, Á. J., & Perilla Gutiérrez, L. A. (2015). *El humedal artificial como un espacio para la sensibilización en torno a las prácticas de uso de los recursos hídricos y sus posibilidades de reutilización*. Universidad Pedagógica Nacional.
- González, R., Cuevas, B., Cortés, M., & Orduña, M. (2020). *Las tinciones básicas en el laboratorio de Microbiología: Un enfoque gráfico*.
- Guadarrama Tejas, R., Kido Miranda, J., Roldan Antunez, G., & Salas Salgado, M. (2016). Contaminación del agua. *Revista Deficiencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(5), 1–10. www.ecorfan.org/spain
- Guido, A. (2006). *Estudio de los potenciales de oxido - reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guido Zárate, A., & Durán de Bazúa, C. (2008). Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(1), 15–22. <https://www.redalyc.org/pdf/482/48223103.pdf>
- HANNA, I. (2011). *Manual de instrucciones- HI 98194, HI 98195, HI 98196*. https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2020/09/Manual_HI_98194.pdf
- HANNA, I. (2020). *Manual de instrucciones - HI 83399*. <https://doi.org/10.2307/j.ctvvh869w.3>
- Hernández, D., Castillo, J., Ramos, N., & Orduña, J. (2015). *Evaluación de la eficiencia de*

humedales artificiales de flujo sub-superficial utilizando Stipa ichu para el tratamiento de aguas residuales domésticas. 9, 47–59.

IDEAM, & INVEMAR. (2017). *Protocolo de monitoreo del agua.*

Jara Durán, K. A. (2012). Los fertilizantes y sus efectos ambientales . In R. H. Pérez Espejo & A. Aguilar Ibarra (Eds.), *Agricultura y contaminación del agua* (Primera edición, pp. 207–232). UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas. <http://ru.iiec.unam.mx/1885/1/AGRIContAgua-IMPRESIÓN-12-10-2012.pdf>

Kadlec, R., & Knight, R. (1996a). *Tratamiento de humedales.* (Lewis Publishers).

Kadlec, R., & Knight, R. (1996b). *Treatment wetlands.* EUA: CRC Press.

Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., & Haberl, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, performance, design and operation* (IWA Publis).

Lara, A., & Otaño, L. (2017). *Agua, cultura y educación ambiental.* September.

Lara Borrero, J. A. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales* (Issue July).

Lasso, A. (2009). *Determinación de Nitrito en Agua por Espectrofotometría.*

Lee, C., Fletcher, T. D., & Sun, G. (2009). *Nitrogen removal in constructed wetland systems.* 9(1), 11–22. <https://doi.org/10.1002/elsc.200800049>

León, R., Pernía, B., Siguencia, R., Franco, S., Noboa, A., & Cornejo, X. (2018). Potencial de plantas acuáticas para la remoción de coliformes totales y *Escherichia coli* en aguas servidas. *Enfoque UTE*, 9(4), 131–144.

León Romero, J. A. (2017). *Una mirada a la fitorremediación en Latinoamérica.* Universidad Nacional Abierta y a Distancia -UNAD.

Lima Coasaca, R. (2021). *Efecto del tiempo de retención hidráulico (TRH) sobre un sistema de humedales artificiales (flujo subsuperficial + flujo superficial) plantados con scirpus americanus, elecharis montevidensis e hydrocotyle bonariensis para tratamiento de efluentes brutos* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://190.119.145.154/handle/20.500.12773/13881>

Londoño Gaitán, O. P. (2014). *Caracterización de parámetros microbiológicos y fisicoquímicos del sistema para producir agua desionizada tipo II, en una industria cosmética.* Universidad Militar Nueva Granada. Especialización En Planeación Ambiental y Manejo Integral de Los Recursos Naturales. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/10961>

MACHEREY-NAGEL. (2015). *Nanocolor® VIS II, Nanocolor® UV/VIS II.*

Márquez-bravo, L. G. (2000). *Desinfección Solar.* http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/agua/desinfeccion_solar.pdf

Martelo, J., & Lara, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221–243. <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v8n15/v8n15a11.pdf>

- Moreira, R. A., Mansano, A. da S., & Rocha, O. (2016). Taxas de filtração e ingestão de uma microalga por philodina roseola (Rotifera: Bdelloidea). *Acta Biologica Colombiana*, 21(2), 325–334. <https://doi.org/10.15446/abc.v21n2.47837>
- Moreno, V., García, J. F., & Villalba, J. C. (2002). *Descripción general de los humedales de Bogotá, D.C.* <https://www.sogeocol.edu.co/documentos/humed.pdf>
- Muñoz-López, C. L., Aranguren-Riaño, N. J., & Duque, S. R. (2017). Morfología funcional del fitoplancton en un lago de alta montaña tropical: Lago de Tota (Boyacá-Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 65(2), 669–684. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i2.23903>
- Muñoz, C., & Novoa, S. (2018). *El humedal artificial como material educativo para la enseñanza de la fitorremediación con Buchón de Agua (Eichhornia crassipes) en sistemas acuáticos dirigido a los maestros de biología del Distrito* [Universidad Pedagógica Nacional]. <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/10509/TE-22718.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Navarro Roa, M. O. (2007). *Determinación de Coliformes totales y E. Coli de aguas mediante la técnica de sustrato definido, por el método de Numero Más Probable* (Vol. 2).
- Nivala, J., Headley, T., Wallace, S., Bernhard, K., Brix, H., van Afferden, M., & Müller, R. A. (2013). Comparative analysis of constructed wetlands: The design and construction of the ecotechnology research facility in Langenreichenbach, Germany. *Ecological Engineering*, 61, 527–543. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.035>
- Núñez, M. del R. (2017). *Evaluación De La Eficiencia En Remoción De Nitrato En Un Humedal Construido a Escala De Laboratorio*. Universidad Nacional de la Plata.
- Obón de Castro, J. M. (2014). *Análisis microbiológico del agua*. Universidad Politécnica de Cartagena. Dpto. Ingeniería Química y Ambiental. https://www.upct.es/~minaees/analisis_microbiologico_aguas.pdf
- Ors, F. (2012). *Environmental education and the role of media in environmental education in Turkey*. 46, 1339–1342. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.05.298>
- Pérez Espejo, R. H. (2012). La contaminación agrícola del agua: aspectos generales y teoría. In R. H. Pérez Espejo & A. Aguilar Ibarra (Eds.), *Agricultura y contaminación del agua* (Primera edición, pp. 23–43). UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas. <http://ru.iiec.unam.mx/1885/1/AGRIContAgua-IMPRESIÓN-12-10-2012.pdf>
- Pérez López, E. (2009). *Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango*.
- Pire; Rodríguez; Fuenmayor; Fuenmayor, Y. A. ; C. D. (2011). *Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería*. 21, 5–19.
- Puertas, D. S., & Pinilla Moscoso, C. I. (2017). Cambio climático, gestión y educación ambiental urbana: análisis geopolítico. Estudio de caso: Complejo de humedales en la localidad de 11-Suba, Bogotá. *Boletín Redipe*, 6(11), 65–75. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6275732>
- Quintero, V. E., Cardona, A. M., & Grisales, F. (2009). Producción artesanal del rotífero Philodina

- sp. y de algas para alimentación de post-larvas de bocachico. *Acta Agronómica*, 58(1), 53–56.
- RAMSAR. (2006). *Manual de la Convención de Ramsar, 4a. edición*. Guía a La Convención Sobre Los Humedales (Ramsar, Irán, 1971). https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/lib_manual2006s.pdf
- RAMSAR. (2015a). *La Convención de Ramsar: ¿de qué trata?* Convención Sobre Los Humedales. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/fs_6 Ramsar Convention Sp_0.pdf
- RAMSAR. (2015b). *Mantener las turberas húmedas para un futuro mejor*. Convención Sobre Los Humedales. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/fs_8_peatlands_es_v1.pdf
- Rengifo, B., Quitiaquez, L., & Mora, F. (2012). *La educación ambiental una estrategia pedagógica que contribuye a la solución de la problemática ambiental en Colombia*. 1–17. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40371535/LA_EDUCACION_AMBIENTAL_UNA_ESTRATEGIA_PEDAGOGICA-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1638589769&Signature=L5a~pVEnGI~CxAgcNBXpbP6Vw12D3K1PL02IMs~Ud73XvkhasfvtSW8RgUnZG~7hwoEsd0uoBzAY1bfa5wn3FSyO6wgk4lopGfzNY8ydP7B
- Rocha Gil, Z. E., Cuellar Rodríguez, L. Á., Vargas Rodríguez, J. L., & Díaz Soler, X. (2015). Bioindicadores de la calidad del agua en áreas con restauración ecológica de la quebrada la colorada, Villa de Leyva, Boyacá. *Revista I3+, Investigación, Innovación, Ingeniería*, 2(2), 10–27. <https://doi.org/10.24267/23462329.108>
- Rocha Gil, Z. E., Suárez Ramirez, E., & Cuellar Rodríguez, L. Á. (2021). Influencia de la restauración ecológica sobre la calidad fisicoquímica y biológica del agua, caso quebrada La Colorada. *Cuaderno Activa*, 9(9), 77–91. <https://doi.org/10.53995/20278101.422>
- Rodríguez Miranda, J. P., Serna Mosquera, J. A., & Sánchez Céspedes, J. M. (2016). Índices de calidad en cuerpos de agua superficiales en la planificación de los recursos hídricos. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 8(1), 159–167. <https://doi.org/10.22335/rlct.v8i1.306>
- Rolim Mendonca, S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización: Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío*. McGraw Hill. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/des-13223>
- Romero, J. (2010). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño* (Tercera Edición). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rousseau, D., Vanrolleghem, P., & De Pauw, N. (2004). Model-Based Design of Horizontal Subsurface Flow Constructed Treatment Wetlands: A Review. *Water Research*, 38, 1484–1493.
- Rubio Chinguel, J. L., & Montenegro Quiroz, A. M. (2018). *Humedal Artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la 3 ra Brigada de Fuerzas Especiales, batallón de servicios N° 300, Distrito de Rioja, Provincia de Rioja, Departamento de San Martín*. Universidad Nacional de San Martín.

- Salazar, C. (2004). Euglenophyta pigmentadas asociadas a *hymenachne amplexicaulis* en una sabana tropical inundable. *Acta Botánica Venezuelica*, 27(2), 101–125.
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 35. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- Suarez Castillo, C. R., Cuellar Rodríguez, L. A., Rodríguez Mesa, M. H., & Acosta, P. M. (2019). Uso de indicadores biológicos para determinar la calidad del agua río Chontales en el sector Finca San Luis Gambita Santander | Revista de Tecnología. *Journal Of Technology.*, 18(1), 1–14. <https://masd.unbosque.edu.co/index.php/RevTec/article/view/3765>
- Suaréz, D., & Giraldo, C. (2008). El agua y la educación ambiental en Manizales, Colombia. In J. Moscoso Cavallini, S. Oakley, & L. Egocheaga Young (Eds.), *El agua como recurso sustentable y de uso múltiple* (pp. 65–83). Catalonia. www.rimisp.org
- Tanner, C. C., & Headley, T. R. (2011). Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants. *Ecological Engineering*, 37(3), 474–486. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.12.012>
- Ubay E., Sözen S., Orhon D., and H. M. (1998). Respirometric analysis of activated sludge behaviour—I. Assessment of the readily biodegradable substrate. *Water Re*, 32(2), 461–475.
- Vera Rojas, M. del P., Chávez Arias, S., & Torres Lema, M. R. (2017). Educación ambiental: reseña de una experiencia compartida | Revista Boletín Redipe. *Revista Boletín Redipe*, 6(5), 246–260. <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/275>
- Villa Hoyos, J. F. (2020). *Reúso de las aguas residuales como alternativa al estrés hídrico en Colombia* [Universidad de Antioquia]. <http://repositorio.udea.edu.co/handle/10495/14961>
- Villadiego Lorduy, J., Huffman Schwocho, D., Guerrero Gómez, S., Méndez Nobles, Y., Rodríguez Vargas, L. J., & Sánchez Moreno, E. (2017). Modelo de educación ambiental no formal para la protección de los humedales Baño y Los Negros | Revista Luna Azul (On Line). *Revista Luna Azul*, 45, 287–38. <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/3901>
- Vymazal, J. (2007). *Removal of nutrients in various types of constructed wetlands*. 380, 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Vymazal, J., Greenway, M., Tonderski, K., Brix, H., & Mander, Ü. (2006). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Wetlands and Natural Resource Management*, 69–96. https://doi.org/10.1007/978-3-540-33187-2_5
- Wood, A. (1995). Constructed wetlands in a water pollution control: Fundamentals to their understanding. *Ater Science and Technology*, 35, 21–29.
- Zaman, M. A., Nguyen, M. L. B., Gold, A. J. C., Groffman, P. M. D., Kellogg, D. Q. C., & Wilcock, R. J. E. (2008). *Nitrous oxide generation , denitrification , and nitrate removal in a seepage wetland intercepting surface and subsurface flows from a grazed dairy catchment*. 46(7), 565–577.
- Zurita, F., Rojas, D., Carreón, A., & Gutiérrez, M. (2015). Desinfección de aguas residuales en tres

sistemas de humedales contruidos híbridos. *Interciencia*, 40(6), 409–415.
<https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2017/10/409-c-ZURITA.pdf>

Anexos

Anexo 1. *Lugar donde se recolecto la muestra de agua tratada en el prototipo de HA.*



Fuente: Autores

Anexo 2. *Medición de parámetros con el equipo Multiparámetro Hanna Instruments HI 98194*



Fuente: Autores

Anexo 3. Medición de parámetros con el equipo NANOCOLOR® VIS II



Fuente: Autores

Anexo 4. Medición de parámetros con el equipo Fotómetro Multiparámetro- HI 83399



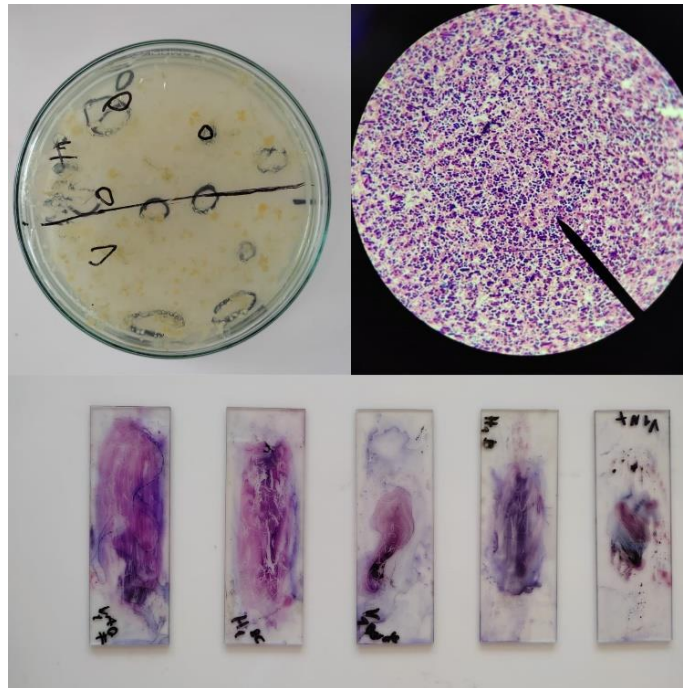
Fuente: Autores

Anexo 5. Metodología Colilert



Fuente: Autores

Anexo 6. Tinción de Gram



Fuente: Autores

Anexo 7. Observación directa de la muestra



Fuente: Autores

Anexo 8. Evidencia fotográfica de las capacitaciones realizadas a los estudiantes.



Fuente: Autores

Anexo 9. Portada de una de las guías implementadas para la estrategia de educación ambiental.



Fuente: Autores

Adicionalmente de esta investigación se está redactando un artículo con los resultados obtenidos referentes a la remoción de contaminantes de control, que se va a presentar a la revista Cuaderno Activa editada por la facultad de ingenierías del Tecnológico de Antioquia y se ha participado en diferentes eventos de carácter investigativo.

Anexo 10. Presentación de una ponencia en el Congreso Internacional: Objetivos de Desarrollo Sostenible: Esfuerzos en América Latina y El Caribe, 2020.



Fuente: Autores

Anexo 11. Participación en Tomasinos Researchers.



Fuente: Autores