

Post tratamiento de un lodo proveniente de la co-digestión anaeróbica psicrófila de lactosuero y estiércol bovino mediante un humedal aireado

Joiner Hernando Abaunza Alvarez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Humberto Escalante Hernández

PhD en Ingeniería Química

Codirectores

Liliana del Pilar Castro Molano

PhD en Ingeniería Química

Juan Guillermo Jaramillo Arango

Ingeniero Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Gracias a Dios, a mis padres Adelaida y Hernando por su paciencia y apoyo incondicional y por enseñarme el valor de la perseverancia, este logro es tan suyo como mío.

A mi familia, mis tios, Francisco, Clemencia, Fernando, Wilson y Nubia por sus lindas palabras de ánimo y acompañamiento a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mi pareja Diana, quien me apoyó en los momentos difíciles. Gracias por tu paciencia y comprensión.

A mis amigos y compañeros del laboratorio, Yely Cruz, Cirley Borrero, Juan Jaramillo, Alex Muñoz, Diego Cristancho por su amistad y compañerismo.

A mi tesis, por ser un dolor de cabeza... ¡pero un dolor de cabeza que valió la pena!

A mí mismo por nunca rendirme y por luchar por mis sueños.

Dedico este trabajo a todas las personas que de alguna manera me han ayudado a alcanzar este logro.

"Disfruta del proceso, ríe de tus errores y aprende de ellos."

Joiner Hernando Abaunza Alvarez

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander, por darme la oportunidad y los espacios para formarme como profesional.

A la escuela de Ingeniería Química a los docentes, secretarias, conserjes y personal de aseo por compartirme sus conocimientos y vivencias.

A Liliana y Humberto por confiar y creer en mis capacidades para afrontar este proyecto además de tratarme como un integrante de su familia.

A Juan Guillermo, por sus ideas y compromiso para sacar adelante esta tesis.

A Tatiana y Sebastián de la Universidad Militar Nueva Granada por su guía ya apoyo

A Eduardo, Wilson, Guillermo y Mauricio, por su disposición total en el desarrollo de este proyecto.

<b>Tabla de contenido</b>	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1.Objetivos .....	13
1.1Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
2. Marco referencial .....	14
2.1 Digerido .....	14
2.3 Humedales Construidos .....	14
2.4 Clasificación .....	16
2.5 Aireación en humedales construidos .....	16
2.5.1 Difusores de aire .....	17
2.5.2 <i>Las turbinas de aireación</i> .....	17
2.6 Tiempo de retención hidráulico .....	17
3. Metodología .....	19
3.1 Construcción y puesta en marcha del humedal.....	19
3.1.1 <i>Proceso de digestión anaeróbica y características del digerido</i> .....	19
3.1.3 <i>Construcción del humedalvertical aireado</i> .....	20
3.1.4 <i>Puesta en marcha del sistema humedal</i> .....	23
3.1.5 <i>Carga orgánica superficial en el humedal vertical aireado</i> .....	24
3.1.6 <i>Análisis de carga del humedal vertical aireado</i> .....	24
3.2 Monitoreo de la calidad del digerido con y sin postratamiento .....	27
3.3 Selección de la mejor condición de operación.....	28
4. Resultados .....	28

4.1 Puesta en marcha del humedal vertical aireado .....	28
4.2 Monitoreo de las propiedades fisicoquímicas del efluente .....	28
4.2.1 Variación de los sólidos totales a diferentes cargas orgánicas superficiales .....	28
4.2.2 Variación de la materia orgánica a diferentes cargas orgánicas superficiales.....	30
4.2.3 Variación del ion amonio a diferentes cargas orgánicas superficiales .....	31
4.2.4 Variación de fosfatos a diferentes cargas orgánicas superficiales .....	32
4.3 Monitoreo de las propiedades microbiológicas del efluente.....	34
4.3.1 Coliformes Totales .....	34
4.4 Determinación de la calidad del digerido con post tratamiento.....	35
4.4.1 Matriz de evaluación de la calidad del digerido .....	35
5.Conclusiones .....	39
6.Socialización de resultados .....	40
7.Recomendaciones .....	42
Referencias bibliográficas.....	43

<b>Lista de tablas</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Caracterización del digerido después de la sedimentación	24
Tabla 2: Parámetros de operación	31
Tabla 3: Métodos analíticos para la determinación de nutrientes en el digerido	32
Tabla 4: Características fisicoquímicas y microbiológicas de los efluentes de cada COS	41
Tabla 5: Evaluación de la calidad de los efluentes para cada COS	42

<b>Lista de figuras</b>	<b>Pág.</b>
Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología	23
Figura 2: Diagrama del sistema biodigestor humedal	27
Figura 3: Porcentaje de reducción de ST para cada COS	34
Figura 4: Porcentaje de reducción de DQO y SV para cada COS	36
Figura 5: Porcentaje de reducción del ion amonio en los efluentes de cada COS	38
Figura 6: Porcentaje de reducción de fosfatos en los efluentes de cada COS	39
Figura 7: Concentración de coliformes totales en los efluentes de cada COS	40

### Glosario

**AGV:** Ácidos grasos volátiles

**BDG:** Biodigestor

**CoDA:** Co-digestión Anaeróbica

**DA:** Digestión anaeróbica

**DQO:** Demanda química de oxígeno

**EB:** Excreta bovina

**HC:** Humedal construido

**LS:** Lactosuero

**ST:** Sólidos totales

**SV:** Sólidos volátiles

## Resumen

**Título:** Post tratamiento de un digerido proveniente de la co-digestión anaeróbica de lactosuero y estiércol bovino mediante un humedal aireado

**Autor:** Joiner Hernando Abaunza Alvarez

**Palabras Clave:** Digestión anaeróbica; Carga orgánica superficial; Remoción de DQO.

### Descripción

El digerido que proviene de la Co-digestión Anaeróbica psicrófila de estiércol bovino y lactosuero contiene principalmente los nutrientes: nitrógeno, potasio, fósforo, sodio y calcio, este residuo se compone de materia orgánica en proceso de biodegradación, población microbiana y demás compuestos inorgánicos. Uno de los usos más comunes de este efluente se da en la agricultura donde se aprovechan sus nutrientes para mejorar la composición química del suelo, mejorar el crecimiento de los cultivos, sin embargo, debe ser usado parcialmente por la inestabilidad de la materia orgánica y población bacteriana. El objetivo de esta investigación fue evaluar a escala de banco un humedal aireado como estrategia de postratamiento de un digerido, monitoreando sus características fisicoquímicas, microbiológicas y de nutrientes del efluente usando diferente carga orgánica superficial (COS). La evaluación de las características fisicoquímicas informa que se removió hasta el 93% de la demanda química de oxígeno. Los afluentes de los digeridos se caracterizan por tener una concentración de coliformes totales más altas (9300-37200 UFC/ml) con respecto a los efluentes (87-5350 UFC/ml), la evaluación de los efluentes indicó que el efluente de la COS 60 gDQO/m<sup>2</sup>d es el más apto para ser usado en la agricultura.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Humberto Escalante. Co-directora Liliana Castro. Co-director Juan Jaramillo.

### Abstract

**Title:** Post-treatment of a digestate from the anaerobic co-digestion of whey and bovine manure through aerated wetland.

**Author:** Joiner Hernando Abaunza Alvarez

**Keywords:** Anaerobic digestion; Surface organic load; COD removal.

### Description

The digestate that comes from the anaerobic psychrophilic co-digestion of cattle manure and whey contains mainly the nutrients nitrogen, potassium, phosphorus, sodium and calcium, this residue is composed of organic matter in the process of biodegradation, microbial population and other inorganic compounds. One of the most common uses of this effluent is in agriculture, where its nutrients are used to improve the chemical composition of the soil and improve crop growth; however, it must be used partially due to the instability of the organic matter and bacterial population. The objective of this research was to evaluate at bench scale an aerated wetland as a post-treatment strategy of a digestate, monitoring its physicochemical, microbiological and nutrient characteristics of the effluent using different surface organic load (COS). The evaluation of the physicochemical characteristics reports that up to 93% of the chemical oxygen demand was removed. The digestate influent was characterized by having higher total coliform concentration (9300-37200 UFC/ml) with respect to the effluent (87-5350 UFC/ml) the effluent evaluation indicated that the COS 60 gCOD/m<sup>2</sup>d effluent is the most suitable to be used in agriculture.

---

\*Degree thesis

\*\*Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Humberto Escalante. Co-director Liliana Castro. Co-director Juan Jaramillo.

## Introducción

En la Digestión Anaeróbica (DA) un consorcio microbiano valoriza residuos orgánicos al transformarlos en un biogás rico en metano y un digerido con propiedades fertilizantes. En Colombia, esta tecnología se ha mostrado útil para satisfacer la demanda energética en las zonas sin cobertura de la red nacional de gas combustible. Por esto, el país cuenta con 5700 registros de biodigestores (BDG) ante el Ministerio del Ambiente, con volúmenes de operación en el orden de 1 a 1000 m<sup>3</sup> (Tavera-Ruiz et al., 2023).

Los biodigestores más comunes en Colombia son los tubulares de bajo costo. Debido a las condiciones ambientales del país, estos reactores operan con tiempos de retención hidráulico menores a los 75 días. El digerido producto de la digestión anaerobia corresponde al 90% de la alimentación del biodigestor (Lamolinara et al., 2022), por lo que se infiere que en el país se producen entre 25 millones y 25000 millones de litros de digerido al año.

El digerido está compuesto por dos fracciones: líquida y sólida. En la fracción líquida se encuentra principalmente nitrógeno (N) y potasio (K), mientras que la fracción sólida contiene fósforo (P), calcio (Ca) y magnesio (Mg) (Liedl et al., 2006). Por su composición, es común su aplicación directa al suelo con el fin de mejorar sus propiedades y aumentar los rendimientos de cultivos, pastos y forrajes. (Goel et al., 2005).

Sin embargo, el vertido sin control del digerido presenta riesgos debido a la descarga masiva de nutrientes y patógenos. El uso repetitivo de esta práctica puede provocar sobrefertilización del suelo, eutrofización de aguas y malos olores, por lo que se requieren soluciones para una gestión sostenible del digerido (Pérez, J., 2023)

En este trabajo de grado se hace referencia como caso particular al sistema de digestión anaerobia ubicado en el Instituto Técnico Agropecuario de Cáchira (ITAC), en el municipio de Cáchira, Norte de Santander. El ITAC ha implementado un biodigestor tubular de bajo costo que valoriza lactosuero y excretas bovinas, en una estrategia denominada codigestión anaeróbica (CoDA). La estrategia de la CoDA les ha permitido alcanzar una producción diaria de biogás de  $0,54 \text{ m}^3_{\text{biogás}} / \text{m}^3_{\text{digestor}}$ , con una calidad de 59%  $\text{CH}_4$  y 41%  $\text{CO}_2$ , bajo condiciones ambientales psicrófilas  $17,5 \pm 4,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (Cucina et al., 2021). A su vez, el biodigestor del ITAC produce 63 L/d de digerido, el cual al ser sedimentado presenta una concentración de materia orgánica de 3,51 gDQO/L, Coliformes Totales (CT) de 3450 UFC/g y presencia de *salmonella spp* (Cucina et al., 2021). Por sus características, este digerido requiere de un postratamiento para alcanzar los límites ambientales permitidos ( $<0,2 \text{ gDQO/L}$ ) (Resolución 631 de 2015 del MINISTERIO DE AMBIENTE COLOMBIANO). Una estrategia para el tratamiento del digerido es el humedal aireado, el cual combina la capacidad filtrante de la grava y las plantas con un flujo ascendente de aire. La adición de oxígeno facilita la degradación de patógenos y compuestos nitrogenados del digerido anaeróbico (Bonmatí & Flotats 2003). En la presente investigación se estudió, a escala de banco, el humedal aireado como estrategia para el tratamiento del digerido producido en el ITAC. Se determinó la viabilidad de la unión BDG-Humedal aireado a través de la remoción de materia orgánica, patógenos y concentración de nutrientes.

## **1.Objetivos**

### **1.1Objetivo general**

Evaluar a escala de banco un humedal aireado como estrategia de postratamiento de un digerido proveniente de un digestor alimentado con lactosuero y estiércol bovino.

### **1.2 Objetivos específicos**

Construir y poner en marcha un humedal para el post tratamiento de un digerido obtenido de la Co-DA de lactosuero y estiércol bovino.

Monitorear la calidad del digerido con y sin postratamiento (humedal) mediante su caracterización fisicoquímica, microbiológica y de nutrientes.

Determinar la mejor condición de operación del humedal a partir de las características fisicoquímicas, microbiológicas y nutrientes del digerido tratado.

## **2. Marco referencial**

### **2.1 Digerido**

El digerido es el material residual que queda después de la digestión anaeróbica de la materia orgánica (Buendía & Perea 2010). Este proceso descompone la materia orgánica en un ambiente sin oxígeno, gracias a la acción de microorganismos (Angelidaki & Sanders 2004). El resultado es un líquido marrón o negro con una textura espesa y un olor ligeramente desagradable.

La composición del digerido depende de la materia prima (Appels et al., 2011), la temperatura (De la Rubia et al., 2014), el pH (Fdez-Güelfo et al., 2013) y el tiempo de retención en el biodigestor (Mata-Álvarez et al., 2014). El agua es el componente mayoritario (70-90%) (Chynoweth & Isaacson, 1986), seguida de la materia orgánica particulada (10-30%) y los nutrientes minerales como nitrógeno, fósforo y potasio (Buendía & Perea, 2010). También puede contener ácidos grasos volátiles, alcalinidad y metales pesados (Hidalgo et al., 2012).

La composición varía según el tipo de materia prima, la temperatura, el pH y el tiempo de retención. La digestión anaeróbica de residuos agrícolas, ganaderos o urbanos produce un digerido con diferentes características. La temperatura óptima para la producción de biogás está entre 30 y 38 °C (De la Rubia et al., 2014). El pH debe mantenerse entre 6.5 y 8.0 (Fdez-Güelfo et al., 2013). Un tiempo de retención adecuado permite la digestión completa de la materia orgánica (Mata-Álvarez et al., 2014).

### **2.3 Humedales Construidos**

Los humedales construidos (HC) son ecosistemas artificiales que imitan las funciones de los humedales naturales. Los HC ofrecen una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales, la recuperación de nutrientes y la creación de hábitats para la fauna y flora. Su

funcionamiento se basa en la acción de plantas, microorganismos y sustratos específicos para filtrar y descomponer contaminantes presentes en el agua (Kadlec & Wallace, 2009). A través de procesos físicos, químicos y biológicos, los HC eliminan patógenos, materia orgánica y nutrientes, mejorando la calidad del agua de forma natural y eficiente (Brix & Arias, 2005).

Los HC son sumideros de carbono, capturando y almacenando CO<sub>2</sub> de la atmósfera (Mitsch & Gosselink, 2007). Estos sistemas están compuestos por cuatro elementos principales: medio filtrante, microorganismos, vegetación y agua a tratar (Kadlec & Wallace, 2009). El medio filtrante en un HC puede estar compuesto por una variedad de materiales, incluyendo grava, roca y arena (Hammer, 1992). También puede incluir sedimentos o restos de vegetación (Brix, 1994). El medio filtrante desempeña un papel fundamental en el funcionamiento del HC, ya que proporciona soporte a una gran variedad de organismos (Cooper & Findlater, 1995) y facilita la acumulación de materia orgánica, que a su vez sirve como fuente de carbono para los microorganismos (Kadlec & Knight, 1996).

Los microorganismos son un componente vital de los HC, ya que descomponen la materia orgánica presente en el agua residual, transformándola en formas menos nocivas (Vymazal, 2010). Los microorganismos presentes en un HC realizan funciones de nitrificación, desnitrificación y descomposición.

Por otra parte, las macrófitas como las plantas acuáticas vasculares, son esenciales para los humedales (Kadlec & Wallace, 2009). Brindan hábitat y refugio a diversas especies (Brix, 1994), depuran el agua absorbiendo nutrientes y contaminantes (Vymazal, 2010), producen oxígeno, controlan la erosión y regulan el flujo del agua (Cooper & Findlater, 1995). Además, participan en el ciclo de nutrientes y secuestran carbono (Hammer, 1992). Las macrófitas no solo impactan positivamente el ecosistema, sino que también tienen valor estético y económico.

El *Cyperus Papyrus* (un tipo de junco acuático) se caracteriza por su absorción de metales pesados, en un estudio realizado en Cosa Rica mostró una eficiencia de remoción de carga orgánica en porcentajes promedio del 91% para el caso de DBO y 72% para el caso del DQO, así mismo en cuanto a nutrientes, se obtuvo una remoción promedio del 75% para el fósforo soluble y un 73% en sólidos totales (ST) (Izaguirre 2006).

## **2.4 Clasificación**

Los humedales construidos se han clasificado tradicionalmente en dos tipologías atendiendo a si la circulación del agua es de tipo subterránea o superficial (Moreno y Col, 2003) y la dirección de flujo del agua.

- Humedales de flujo superficial
- Humedales de flujo subsuperficial

Dirección del flujo del agua

- Humedales verticales
- Humedales horizontales

## **2.5 Aireación en humedales construidos**

La aireación artificial en humedales construidos (HC) es una técnica vital para optimizar el tratamiento de aguas residuales, como lo corroboran estudios de autores como Brix (1994), Kadlec & Wallace (2009) y Vymazal (2010). Entre los métodos de aireación más utilizados se encuentran:

### **2.5.1 Difusores de aire**

Tuberías perforadas en el fondo del humedal que liberan aire en pequeñas burbujas, mejorando la descomposición de materia orgánica y la nitrificación (Brix, 1994).

### **2.5.2 Las turbinas de aireación**

Dispositivos mecánicos en la superficie que agitan el agua y aumentan el intercambio gaseoso con la atmósfera, intensificando la oxigenación del agua (Kadlec & Wallace, 2009). La aireación artificial en humedales construidos (HC) mejora significativamente el tratamiento de aguas residuales, como lo confirman estudios de autores como (Kadlec & Wallace, 2009) y (Vymazal, 2010).

La aireación incrementa la concentración de oxígeno disuelto (OD), estimulando la actividad microbiana aerobia responsable de la descomposición de materia orgánica, logrando un aumento de hasta un 50% (Kadlec & Wallace, 2009). Favorece la nitrificación, es un proceso esencial para convertir el amonio en nitrato, una forma de nitrógeno menos tóxica para los organismos acuáticos (Cooper & Findlater, 1995). La aireación puede aumentar la eliminación de nitrógeno en un 10-30% y la eliminación de fósforo en un 5-20% (Vymazal, 2010). Adicionalmente reduce la producción de gases de efecto invernadero, como el metano, un importante contribuyente al calentamiento global (Hammer, 1992).

## **2.6 Tiempo de retención hidráulico**

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es un parámetro fundamental en el diseño y operación de humedales verticales aireados (HVA) este determina el tiempo que el agua permanece en el sistema, impactando directamente en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales y la calidad del efluente final. Se calcula como el volumen total del humedal dividido

por el caudal de entrada, y se ve afectado por la geometría del HVA, la porosidad del medio, la presencia de biopelícula y la temperatura.

Un TRH adecuado es crucial para el éxito del HVA. Permite el desarrollo y maduración de la biopelícula, una capa de microorganismos que se adhiere al material de relleno y es responsable de la eliminación de contaminantes, además permite la nitrificación completa del amonio, un proceso biológico en dos etapas que convierte el amonio en nitrato, una forma menos tóxica para el medio ambiente (Kadlec & Knight, 2009).

Diversos estudios han demostrado la importancia del TRH en HVA. (Kadlec & Knight, 2009) encontraron que un TRH de 3 días era necesario para la nitrificación completa del amonio en HVA. (Saeed & Sun, 2012) reportaron que un TRH de 3 días era suficiente para la eliminación de patógenos en HVA. (Vymazal, 2015) mencionó que un TRH de 3 días es un buen equilibrio entre la eficiencia del tratamiento y el uso del agua en HVA.

### 3. Metodología

El desarrollo de este estudio se realizó en tres etapas metodológicas. La primera etapa consistió en la construcción y puesta en marcha del humedal. En la segunda etapa se operó el humedal, alimentado con digerido generado en el BDG del ITAC. Se monitorearon las variables DQO, ST, Sólidos Volátiles (SV), pH,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4\text{-P}$ . Finalmente, tras evaluar la calidad del efluente del humedal, se seleccionó la carga orgánica ideal para su aplicación en la agricultura, respetando los límites ambientales establecidos.

#### 3.1 Construcción y puesta en marcha del humedal

##### *3.1.1 Proceso de digestión anaeróbica y características del digerido*

El digerido utilizado proveniente de un BDG implementado en el ITAC. El biodigestor cuenta con una estructura de geomembrana oscura de alta densidad y un volumen total de  $8 \text{ m}^3$ . Con el objetivo de optimizar la estabilización del proceso de DA y maximizar la producción de biogás, se implementó una Co-DA con una mezcla en volumen de 30% de estiércol bovino (EB) y 70% de lactosuero (LS) (Jaimes-Estévez et al., 2022). La Co-DA se llevó a cabo bajo condiciones psicrófilas ( $17.5 \pm 4.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 75 días (Cucina et al., 2021). El BDG tiene una producción de biogás de  $2.05 \text{ Nm}^3/\text{d}$  con una calidad de 59%  $\text{CH}_4$  y 41%  $\text{CO}_2$  y aproximadamente 63 litros de digerido por día. El biogás es usado para alimentar la cocina del restaurante escolar y el digerido se emplea para fertilizar la pradera y las huertas del ITAC.

El digerido no es un fluido homogéneo, contiene una alta concentración de sólidos en suspensión (6-15g/L), incluyendo partículas de materia orgánica no digerida, bacterias y otros microorganismos. Por lo anterior, el digerido fue sedimentado durante 2 horas antes de ingresar al humedal. En la tabla 1 se presenta la caracterización del digerido sedimentado.

**Tabla 1***Caracterización del digerido después de la sedimentación*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Método analítico</b>
DQO	gDQO/L	3,51	APHA (2017)
pH	-	7,7	APHA (2017)
Conductividad eléctrica	dS/m	5,43	APHA (2017)
Sólidos totales	g/kg	3,8	APHA (2017)
Sólidos volátiles	g/kg	1,9	APHA (2017)
Amonios	mg/L	210	APHA (2017)
Fosfatos	mg/L	40	APHA (2017)
Carbono Orgánico Total Oxidable	mg/L	0,39	Espectrofotométrico/ NTC 5167
N total	mg/L	316	Digestión Kjeldahl- Titrimétrico/NTC370
K total (K <sub>2</sub> O)	mg/L	986,37	Absorción Atómica/ NTC 5167
Ca total (CaO)	mg/L	354,91	Absorción Atómica/ NTC 5167
Mg total (MgO)	mg/L	263,92	Absorción Atómica/ NTC 5167
Na total	mg/L	58,75	Absorción Atómica/ NTC 5167

**3.1.3 Construcción del humedal vertical aireado**

Para la construcción del humedal se emplearon los siguientes materiales y mecanismos de bombeo.

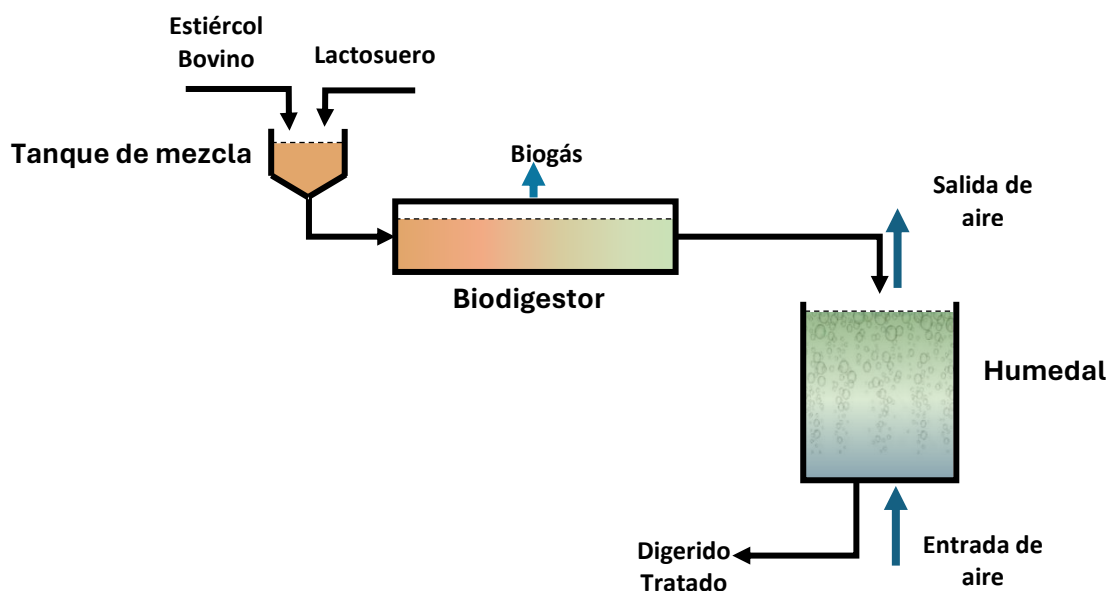
- Tanque cilíndrico: Se utilizó un recipiente de plástico resistente a la corrosión y a las condiciones climáticas adversas. Las dimensiones son 36 cm de diámetro y 70 cm de altura.
- Base metálica: Se ubica en la parte inferior del tanque cilíndrico.
- Grava de río: Es el medio filtrante, la grava fue tamizada para obtener diámetros entre 3,75-4,25 mm, tamaño de grava más utilizado en este tipo de humedales debido a su eficiencia en la remoción de materia orgánica y nutrientes. (Vymazal, et al., 2007). Con este sustrato se llenó el tanque cilíndrico hasta alcanzar 60 cm.
- Papiro enano: Macrófita esencial para el microcosmos del humedal, se plantó a 80 mm de profundidad de la superficie. Actúa como un filtro natural, absorbiendo contaminantes y nutrientes del agua, mejorando su calidad (Mitsch & Gosselink, 2007).
- Difusor de aire: Manguera con perforaciones de 1 mm de diámetro en forma de espiral ubicada al fondo del tanque.
- Difusor de digerido: Consta de una estructura en PVC en forma cuadrada con perforaciones equidistantes (1mm de diámetro) ubicado en la superficie de la grava.
- Tanque de mezcla: Este tanque se utiliza para almacenar el afluente del sistema.
- Bomba peristáltica: Es la encargada de bombear dosificadamente el volumen de digerido a tratar.
- Bomba de diafragma: Envía el caudal de aire a través de una manguera de ¼ de pulgada hacia el difusor de aire.
- Timer: Interrumpe la energía de la bomba peristáltica en periodos de tiempo determinados.

- Mangueras: Estas conectan el tanque de almacenamiento con la bomba peristáltica y hacia el difusor de digerido, fueron necesarias 8 m con un diámetro de ¼ de pulgada.
- Tanque de salida: Se ubica en la salida del sifón, es el encargado de recoger el efluente del humedal.
- Mesa de madera: En ella se ubicaron el tanque de mezcla, la bomba peristáltica y la bomba de pulmón.
- Accesorios: Se instalaron 2 llaves de bola, 3 uniones de 90° de ½ pulgada, 1 T de ½ pulgada y segmentos de tubería en PVC de ½ pulgada, el primer codo se ubica en el centro de la base del tanque, este conecta con la primera válvula con un segmento de tubería, con la T se hace un sifón que llega los 65 cm de altura con referencia la base del tanque, la otra salida de la T se conecta con la segunda válvula de bola.

En la figura 5 se presenta el diagrama del sistema biodigestor humedal y la fotografía del sistema HVA experimental.

### Figura 5

*Diagrama del sistema biodigestor humedal*



### Sistema humedal vertical aireado



#### *3.1.4 Puesta en marcha del sistema humedal*

El arranque del humedal ocurrió en 3 etapas

- Limpieza del medio: Se bombeó agua a un caudal de 0,5 L/min durante 7 días utilizando la bomba peristáltica. Las válvulas de salida del humedal estuvieron abiertas durante todo el proceso. No se realizó aireación durante la limpieza. Esto elimina gran parte de los sedimentos presentes en el sustrato (arena, tierra).
- Inoculación: La inoculación se realizó con agua de un reactor de lodos activados aerobio proveniente de una PTAR, el agua se alimentó de forma constante durante 48 horas en un caudal de 0,1 L/min y aireación constante de 12 L/min, es indispensable la recirculación del efluente para la proliferación y crecimiento microbiano.
- Alimentación: En esta etapa se inició la alimentación del humedal con el digerido proveniente del reactor anaerobio. Cuando las cargas orgánicas y los sólidos son muy altos (entre 6 y 15

g/L) es necesario empezar con una alimentación gradual. Esta alimentación se realizó por pulsos, de acuerdo con (Arias & Brix., 2003) se recomiendan 6 pulsos diarios de 30 min cada uno.

### ***3.1.5 Carga orgánica superficial en el humedal vertical aireado***

Para el cálculo de la carga orgánica superficial es necesario fijar el tiempo de retención hidráulico. Se determinó que un TRH de 3 días junto con una aireación adecuada era la mejor combinación para obtener una alta eficiencia de tratamiento. (Vila, C., & García, et al., 2010). El cálculo de la carga orgánica superficial se calculó de acuerdo con la Ecuación 1:

$$COS = \frac{Q S_o}{A} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde

*COS*: Carga orgánica superficial [*gDQO*/(*m*<sup>2</sup> \* *d*)]

*Q*: Caudal de entrada [*L*/*d*]

*So*: Concentración del digerido [*gDQO*/*L*]

*A*: Área superficial del humedal [*m*<sup>2</sup>]

### ***3.1.6 Análisis de carga del humedal vertical aireado***

Partiendo de las dimensiones cilíndricas del humedal se calcula el área superficial y el volumen efectivo (espacio poroso del tanque) de acuerdo con la Ecuación 2

$$A = \pi r^2$$

$$V = A \cdot h$$

$$V_{ef} = V - V_{Le} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde

A: Área superficial del humedal [m<sup>2</sup>]

r: Radio del tanque [m]

V: Volumen del tanque [m<sup>3</sup>]

h: Altura del lecho [m]

V<sub>Le</sub>: Volumen de la grava (calculado experimentalmente) [m<sup>3</sup>]

V<sub>ef</sub>: Volumen efectivo [m<sup>3</sup>]

La concentración de materia orgánica en la entrada del humedal ( $f_v$ ) es otra variable importante, con esta se obtienen los volúmenes de digerido y diluyente (agua) a la entrada. Variando la concentración de entrada ( $f_v$ ) manteniendo fijo el TRH (1 TRH = 3 días), la carga orgánica superficial se calcula usando la Ecuación 3:

$$f_v = \frac{V_D}{V_D + V_{H_2O}}$$

$$V_D = \frac{V_{ef} * f_v}{TRH}$$

$$V_{H_2O} = \frac{V_D}{f_v - V_D}$$

$$COS = \frac{S_o * V_D * 1000}{A} \quad (Ec.3)$$

Donde

$f_v$ : Factor de dilución [L/L]

V<sub>D</sub>: Volumen de digerido [m<sup>3</sup>]

V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>: Volumen de agua [m<sup>3</sup>]

TRH: Tiempo de retención hidráulico [d]

$S_o$ : Concentración del digerido [ $gDQO/L$ ]

A: Área superficial del humedal [ $m^2$ ]

COS: Carga orgánica superficial [ $gDQO/(m^2 * d)$ ]

(Kadlec y Wallace 2009) indican que los humedales verticales aireados (HVA) con sustratos de grava pueden tratar cargas orgánicas de hasta 80 gDQO/m<sup>2</sup>día. Tomando en cuenta esta información, se establecieron 4 diferentes cargas orgánicas para el estudio, cada una con una duración de 4 TRH. Los parámetros de alimentación y pulsos se definieron previamente.

En la tabla 2 se presentan los parámetros que se usaron en la fase experimental del humedal vertical aireado.

**Tabla 2**

*Parámetros de operación del humedal vertical aireado*

Parámetro	Unidades	Valor
		20
		40
Carga orgánica superficial (COS)	gDQO/m <sup>2</sup> d	60
		80
Pulsos	D	6
Volumen por pulso	L	1,133
Duración del pulso	Min	30
Volumen total alimento	L/d	6,8
Volumen de aire alimentado	Nm <sup>3</sup> /d	8,3

Tiempo de retención hidráulico (TRH)	D	3
---	---	---

---

### 3.2 Monitoreo de la calidad del digerido con y sin postratamiento

La eficiencia del humedal se determinó en función del monitoreo de las características fisicoquímicas y microbiológicas al inicio y al final de cada carga. La DQO, ST, SV,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4\text{-P}$  se determinaron según los protocolos propuestos por la APHA (2017). El pH y la conductividad eléctrica (CE) se midieron utilizando un electrodo de vidrio y una sonda de conductividad. Los métodos analíticos para determinar el contenido de nutrientes y análisis microbiológico se presentan en las siguientes tablas.

#### Tabla 3

*Métodos analíticos para la determinación de nutrientes y caracterización microbiológica en el digerido*

Parámetro	Método
Carbono Orgánico Total Oxidable	Espectrofotométrico/ NTC 5167
Nitrógeno Total	Digestión Kjeldahl-Titrimétrico/NTC370
Potasio Total	Absorción Atómica/ NTC 5167
Sodio Total	Absorción Atómica/ NTC 5167
Calcio Total	Absorción Atómica/ NTC 5167
Magnesio Total	Absorción Atómica/ NTC 5167
Fósforo Total	Gravimétrico- Titrimétrico/ NTC 234

Coliformes totales	NTC4458
Coliformes fecales	NTC4458
E. coli	NTC4458

---

### 3.3 Selección de la mejor condición de operación

Para garantizar el uso seguro en el riego de cultivos, se analizaron las características fisicoquímicas, microbiológicas y de nutrientes de los digeridos con postratamiento. Los resultados se compararon con dos marcos normativos: la Resolución 1207 (2014) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente), que establece los criterios de calidad para el uso de aguas residuales en cultivos agrícolas, y la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 (2022), que define los requisitos para el agua residual tratada en el riego de áreas verdes y campos deportivos. De esta manera, se verificó el cumplimiento de las normas para el uso seguro y responsable de los digeridos con postratamiento en el riego de diferentes tipos de vegetación.

## 4. Resultados

### 4.1 Puesta en marcha del humedal vertical aireado

La puesta en marcha del HVA, se llevó a cabo en operación continua durante 48 días con una alimentación constante de 6,8 L/día de digerido diluido.

### 4.2 Monitoreo de las propiedades fisicoquímicas del efluente

#### 4.2.1 Variación de los sólidos totales a diferentes cargas orgánicas superficiales

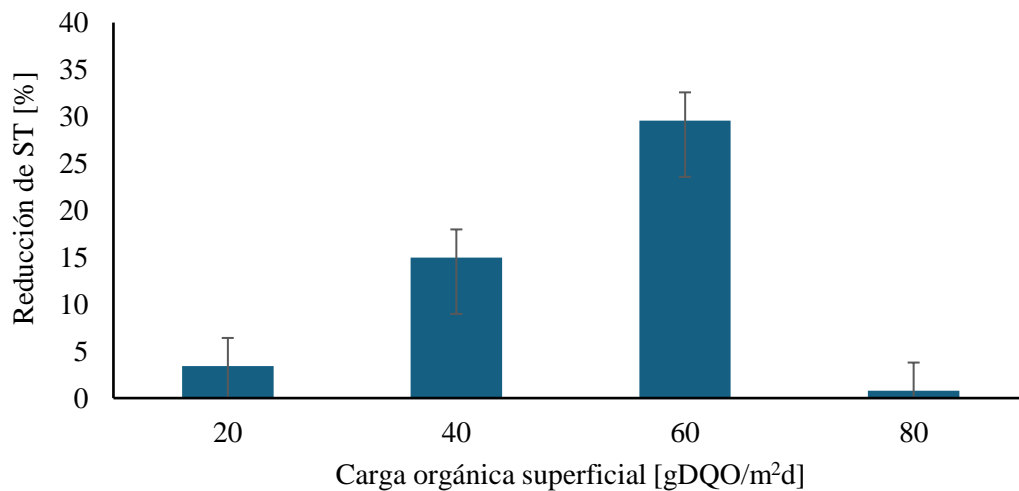
La Figura 6 ilustra el comportamiento de la remoción de sólidos totales (ST) en relación con la carga orgánica superficial (COS). Durante las tres primeras COS (20, 40 y 60 gDQO/m<sup>2</sup>d), se observa un aumento gradual en la eficiencia de la remoción, alcanzando un máximo de 30% a

60 gDQO/m<sup>2</sup>d. Este comportamiento indica que la población microbiana del humedal vertical aireado (HVA) presenta su máxima capacidad de degradación de materia orgánica a esta carga. Sin embargo, al aumentar la COS a 80 gDQO/m<sup>2</sup>d, se observa una caída abrupta en la eficiencia de remoción, con un valor de solo 2%. Este resultado evidencia que la carga orgánica de 80 gDQO/m<sup>2</sup>d supera la capacidad de tratamiento del HVA en su configuración actual. Esta tendencia coincide con lo reportado por Kadlec y Wallace (2009), quienes señalan que cargas orgánicas superiores a 80 gDQO/m<sup>2</sup>d pueden generar una disminución en el rendimiento del proceso debido a la sobrecarga del sistema.

$$\%Reduccion = (Concentración\ afluente - Concentración\ efluente) * 100$$

**Figura 6**

*Porcentaje de reducción de ST para cada COS*



Los resultados experimentales mostraron que la eficiencia en la reducción de sólidos totales (ST) varió según la carga orgánica superficial (COS). Se obtuvieron reducciones de 3%, 15%, 30% y 2% para COS de 20, 40, 60 y 80 gDQO/m<sup>2</sup>d, respectivamente. Estas remociones de ST se

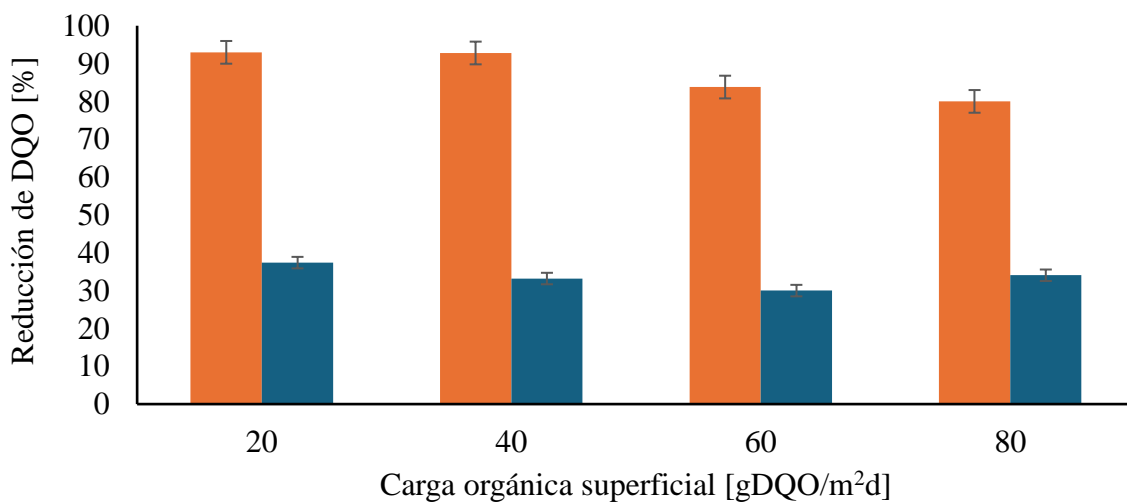
encuentran dentro del rango promedio de 16% reportado por Chaparro (2005). Sin embargo, son inferiores a los resultados encontrados por Vymazal (2010), quien mencionó eficiencias entre 50% y 80%. Las variaciones observadas se pueden atribuir a varios factores, principalmente a las diferencias en los parámetros del proceso de los HVA y la calidad del digerido tratado.

#### 4.2.2 Variación de la materia orgánica a diferentes cargas orgánicas superficiales

La concentración de materia orgánica contenida en una muestra es representada en términos de DQO y SV. La Figura 7 ilustra el dinamismo en la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y SV para las COS trabajadas. El comportamiento en la reducción de SV se mantuvo constante durante toda la experimentación, se observa una eficiencia de remoción de materia orgánica del 93%, 93%, 84% y 80% para COS de 20, 40, 60 y 80 gDQO/m<sup>2</sup>d, respectivamente.

#### Figura 7

Porcentaje de reducción de DQO y SV para cada COS



Estos resultados son ligeramente superiores a los reportados por Kadlec & Wallace (2009), quienes mencionan un rango de eficiencia entre 60% y 90% para humedales. Esta diferencia se puede atribuir a las altas diluciones del digerido esto genero una distribución homogénea de la materia orgánica dentro del humedal maximizando la degradación por parte de los microorganismos.

La degradación de la materia orgánica se sustenta de acuerdo con los bioprocesos que ocurren en este tipo de humedales. Los procesos biológicos varían según la posición dentro del HVA. En la zona superior del HVA, las bacterias aeróbicas descomponen la materia orgánica con oxígeno, liberando  $\text{CO}_2$ , agua y nitratos (Vymazal, 2010). En la zona inferior, las bacterias anaeróbicas descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, liberando metano, sulfuro de hidrógeno y amonio (Kadlec & Wallace, 2009).

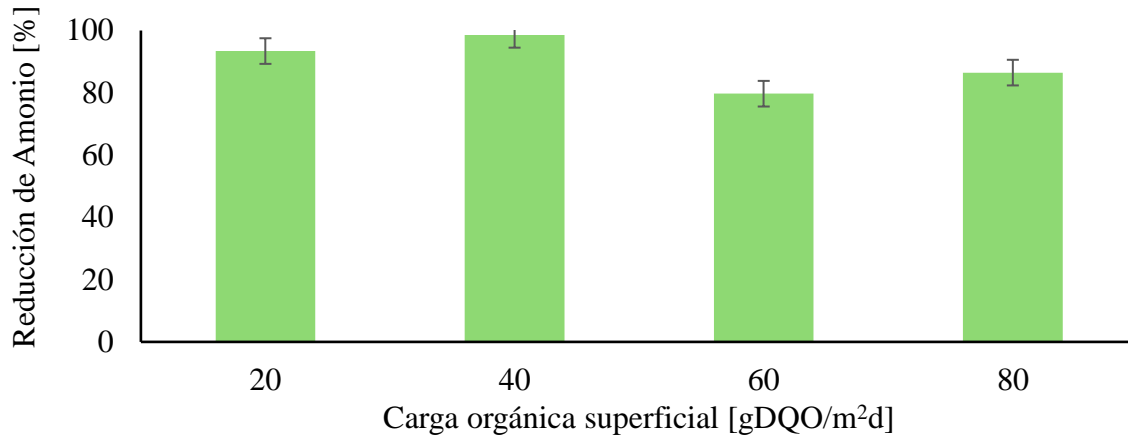
#### ***4.2.3 Variación del ion amonio a diferentes cargas orgánicas superficiales***

Los Humedales Verticales Aireados (HVA) son una alternativa viable para eliminar el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) de las aguas residuales. Este proceso se basa en dos mecanismos principales: la nitrificación y la asimilación por las plantas. La nitrificación consiste en la conversión de  $\text{NH}_4^+$  en nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) por bacterias nitrosomonas y luego en nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) por bacterias nitrobacter. Por otro lado, la asimilación por las plantas implica la absorción  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  para su crecimiento, siendo las macrófitas como la totora y el carrizo especialmente eficientes en este proceso. La absorción puede ser activa (requiere energía) o pasiva (no requiere energía) y se ve influenciada por la especie de planta, la edad de la planta, la disponibilidad de luz y la concentración de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . Los HVA han demostrado ser una alternativa eficiente y sostenible para la eliminación de amonio, con una eficiencia de hasta el 90% y ventajas como bajo costo, bajo impacto ambiental y

facilidad de operación. La Figura 8 muestra la eficiencia de los sistemas de humedales en la reducción del ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en los efluentes.

### Figura 8

*Porcentaje de reducción del ion amonio en los efluentes de cada COS*



Durante la experimentación, se observó un alto rendimiento en la eliminación de  $\text{NH}_4^+$ , con reducciones entre el 80% y el 99%. La desnitrificación, que ocurre en zonas anóxicas de sedimentos o en micrositos anóxicos dentro de biofilms adheridos a las plantas o sustratos, junto con el caudal de aire de  $8,3 \text{ Nm}^3/\text{d}$  utilizado, favorecen este proceso y contribuyen a la alta eficiencia en la eliminación de  $\text{NH}_4^+$ . En resumen, la Figura 8 demuestra el gran potencial de los humedales como una alternativa eficaz para la eliminación de  $\text{NH}_4^+$  en aguas residuales.

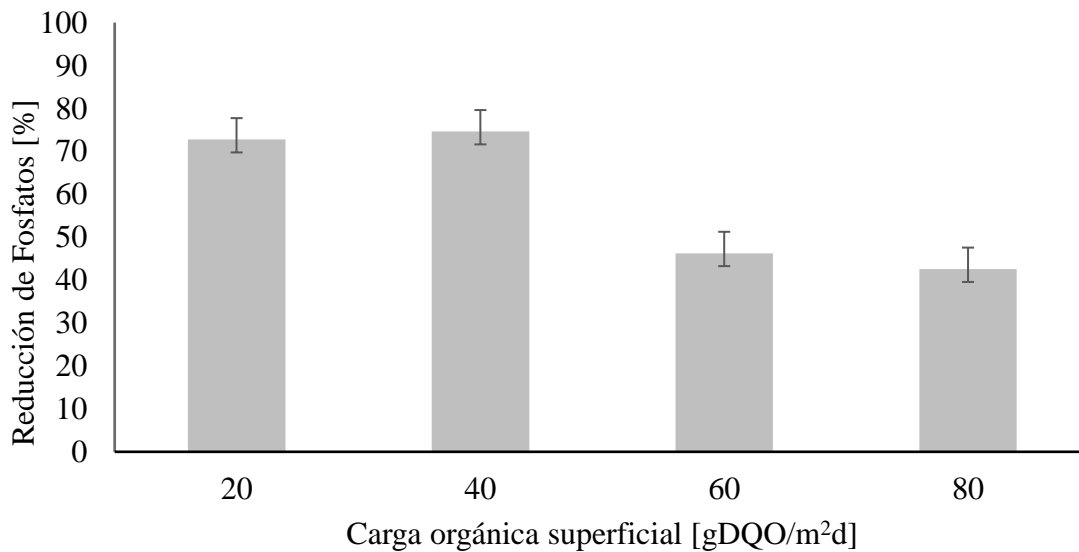
#### ***4.2.4 Variación de fosfatos a diferentes cargas orgánicas superficiales***

La disminución de los fosfatos en aguas residuales se lleva a cabo a través de diversos mecanismos. Los fosfatos pueden precipitarse con cationes como calcio, magnesio y hierro, formando compuestos insolubles que se fijan en el sustrato del HVA (Vymazal, 2010; Kadlec & Wallace, 2009). Las plantas absorben los fosfatos del agua para su crecimiento, almacenándolos

en sus tejidos (Brix & Arias, 2005). Por otro lado los fosfatos se pueden adsorber a la superficie de las partículas del sustrato del HVA (Saeed & Sun, 2012). Además, algunas bacterias y microorganismos pueden utilizar los fosfatos como fuente de fósforo para su metabolismo (Greenway & Woolley, 2006). La figura 9 muestra la remoción de fosfatos.

### Figura 9

*Porcentaje de reducción de fosfatos en los efluentes de cada COS*



En términos de porcentaje de remoción se registran valores de 73%, 75%, 46% y 43% para cada COS. Estos resultados son bajos en comparación con los reportados por Kadlec & Wallace, (2009) quienes informan una reducción del 70-90%. Esto puede estar influenciado por las propiedades del digerido y los parámetros de diseño usados en este trabajo.

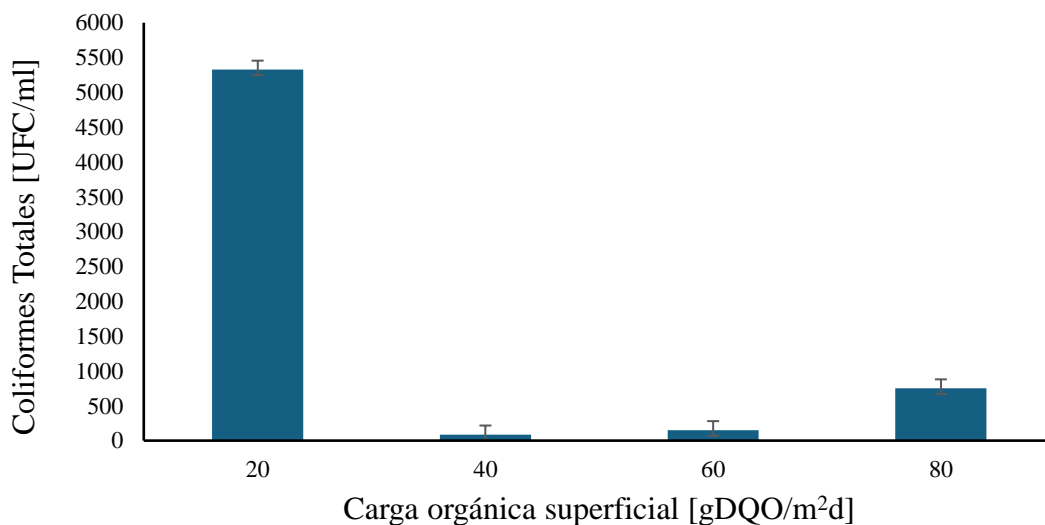
### 4.3 Monitoreo de las propiedades microbiológicas del efluente

#### 4.3.1 Coliformes Totales

Los microorganismos presentes en el medio filtrante del humedal degradan la materia orgánica, lo que puede incluir bacterias coliformes, ayudando así a reducir su concentración, los protozoos y otros microorganismos depredan las bacterias coliformes. (Hammer & Hammer, 2008). En la figura 10 se observa que los efluentes de las COS de 40, 60 y 80 gDQO/m<sup>2</sup>d cumplen con la norma NTC 5167, 2022 la cual indica una concentración <1000 UFC/ml para su uso como remediador agrícola. Sin embargo en términos de remoción el balance en la COS de 20 gDQO/m<sup>2</sup>d es negativo. Este resultado puede explicarse, infiriendo que en el humedal se creó una biopelícula que acumula la materia orgánica la cual sirve como fuente de alimento para este tipo de bacterias coliformes (Mitsch & Gosselink, 2007).

#### Figura 10

*Concentración de coliformes totales en los efluentes de cada COS*



Los resultados obtenidos están por debajo de los reportados de (Charris & Caselles, 2016) quien informó una reducción del 99,9 % de coliformes en humedales artificiales experimentales.

La tabla 4 muestra un resumen de los resultados obtenidos en esta fase de experimentación.

**Tabla 4**

*Características fisicoquímicas y microbiológicas de los efluentes de cada COS*

Parámetro		Efluente COS			
		20	40	60	80
		Reducción			
Fisicoquímicos	ST	3%	15%	30%	1%
	SV	37%	33%	30%	34%
	DQO	93%	93%	84%	80%
	NH4+	93%	99%	80%	86%
	PO4-P	73%	75%	46%	43%
Microbiológicos	CT	5350 UFC/ml	87 UFC/ml	150 UFC/ml	750 UFC/ml

#### 4.4 Determinación de la calidad del digerido con post tratamiento

##### 4.4.1 Matriz de evaluación de la calidad del digerido

En la tabla 5 se presenta la matriz utilizada para evaluar la calidad de los efluentes de cada COS usando como criterio su empleabilidad como fertilizante. La evaluación se realizó comparando los resultados obtenidos con la NTC 5167 (2022).

Sin embargo, los digeridos producidos en biodigestores que operan bajo condiciones psicrófilas presentan problemas como la producción residual de metano y emisiones de gases de efecto invernadero debido al contenido de materia orgánica no estabilizada, efectos fitotóxicos en el suelo como el retraso de la germinación de las semillas, efectos nocivos en la salud humana puesto que aumenta el riesgo de transferencia de patógenos a la cadena alimentaria cuando estos se aplican directamente al cultivo (Cucina et al., 2021).

**Tabla 5**

*Evaluación de la calidad de los efluentes para cada COS*

Parámetro	Unidad	Rango recomendado	Digerido	Evaluación	Efluente COS 20	Evaluación	Efluente COS 40	Evaluación	Efluente COS 60	Evaluación	Efluente COS 80	Evaluación	
Fisicoquímicos	DQO	mg/L	<200*	3870	NA	43	A	79	A	182	A	323	NA
	pH	-	6.0-9.0	7,7	A	7,4	A	7,7	A	7,6	A	7,9	A
	CE	μS/cm	<1500	4511	NA	1023	A	1 233	A	1458	A	2321	NA
Microbiológicos	CT	UFC/mL	<1000	93000	NA	5350	NA	87	A	150	A	57500	NA
	CF	NMP/100 mL	Ausente	Ausencia	Ausencia	Ausencia	A	Ausencia	A	Ausencia	A	Ausencia	A
	<i>E. coli</i>	UFC/mL	Ausente	Ausencia	Ausencia	Ausencia	A	Ausencia	A	Ausencia	A	Ausencia	A

A: Aplica

NA: No aplica

\* Resolución 631 de 2015 del ministerio de ambiente colombiano

Parámetro	Unidad	Rango recomendado	Digerido	Evaluación	Efluente COS 20	Evaluación	Efluente COS 40	Evaluación	Efluente COS 60	Evaluación	Efluente COS 80	Evaluación	
Micronutrientes	N total	mg/L	>15	316,1	A	3,6	NA	7,2	NA	14,4	NA	35,4	A
	P total (P2O5)	mg/L	>15	0,5	NA	0,4	NA	0,2	NA	0,2	NA	3,4	NA
	K total (K2O)	mg/L	>15	986,5	A	58,8	A	145,5	A	373,7	A	327,7	A
	C orgánico total	mg/L	>20	0,4	NA	<0,5	NA	0,28	NA	0,3	NA	<0,5	NA
	Ca total (CaO)	mg/L	>10	354,9	A	46,7	A	95,1	A	100,3	A	179,5	A
Mg total (MgO)	mg/L	>10	262,9	A	44,6	A	47,8	A	77,9	A	145,1	A	
Na total	mg/L	<0.2	58,75	NA	23,9	NA	30,2	NA	27,9	NA	102,5	NA	

A: Aplica

NA: No aplica

\* Resolución 631 de 2015 del ministerio de ambiente colombiano

En cuanto a las características fisicoquímicas, los efluentes de las COS 20, 40 y 60 cumplen con la mayoría de los requisitos establecidos en la norma NTC 1207 (2019) (Pérez et al., 2023). La Tabla 6 evidencia que los efluentes con la carga más concentrada (80 gDQO/m<sup>2</sup>d) y la más diluida (20 gDQO/m<sup>2</sup>d) no cumplen con los requisitos microbiológicos para ser usados como fertilizante en la agricultura. Sus concentraciones de coliformes totales (CT) superan ampliamente los umbrales permitidos (NTC 5167, 2022). Solo los efluentes de las COS de 40 gDQO/m<sup>2</sup>d y 60 gDQO/m<sup>2</sup>d se ajustan a esta regulación.

Ninguno de los efluentes cumple con los requerimientos mínimos de concentración de micro y macronutrientes establecidos en la norma (NTC 5167, 2022) para ser considerados fertilizantes orgánicos (ICA, 2022). Esto indica que, si bien son aptos para ser utilizados en actividades agrícolas como el fertirriego, no pueden ser clasificados como tales. La alta dilución del digerido para su tratamiento en el humedal reduce considerablemente la concentración de nutrientes (Pérez et al., 2023).

Es importante considerar la carga orgánica del efluente al analizar su potencial como fertilizante. Los efluentes más diluidos pueden tener un menor impacto ambiental, pero también una menor concentración de nutrientes. La dilución del digerido puede ser una estrategia viable para cumplir con la normativa microbiológica, pero a expensas de la concentración de nutrientes.

## 5. Conclusiones

Se llevó a cabo la implementación a escala de banco (0,063m<sup>3</sup>) de un sistema de humedal vertical aireado con un tiempo de operación de 48 días, para el post tratamiento de 6,8 l/d de digerido de estiércol bovino y lactosuero producido en el digestor anaerobio del Instituto Técnico Agrícola de Cáchira- Norte de Santander.

Las mejores condiciones para la operación del humedal aireado vertical fueron la carga orgánica superficial de 40 gDQO/m<sup>2</sup>d y 60 gDQO/m<sup>2</sup>d, permitiendo la remoción del 93% y 84% de DQO, 99% y 80% de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, la menor presencia de coliformes 87 UFC/mL y 150 UFC/mL y concentraciones de K total, Ca y Mg totales óptimas para ser usadas en la agricultura.

El digerido en condiciones psicrflicas, proveniente de la co-digestión anaeróbica de lactosuero y estiércol bovino sin tratamiento presenta problemas de baja calidad por el contenido de materia orgánica sin estabilizar y los efectos fitotóxicos en el suelo. En este trabajo se demostró que la combinación del proceso anaerobio con el humedal vertical aireado como post tratamiento a una carga orgánica superficial de 60 gDQO/m<sup>2</sup>d, mejora la calidad del efluente producido en términos de remoción de DQO permitiendo que este digerido pueda ser usado como agua de riego.

## 6. Socialización de resultados

Los resultados de este trabajo de grado fueron presentados en XV Encuentro de la RedBioLac celebrado en la ciudad de Irapuato, Guanajuato, México como ponencia oral con el título: “Post tratamiento de un lodo proveniente de la co-digestión anaerobia psicrófila mediante un humedal aireado”. En la imagen se presenta la evidencia de la participación



Durante la investigación se han publicado 2 artículos en revistas de divulgación científica con resultados de esta investigación. En la revista Wetland Systems for Water Pollution Control (IWA) y la revista RedBioLAC, imágenes de evidencia

**IWA SPECIALIST GROUP ON WETLANDS  
FOR WATER POLLUTION CONTROL**

**NEWSLETTER #60**



**SOUTH AMERICA UPDATE**

**Post-treatment of whey and cattle manure anaerobic digestate through a vertical flow aerated wetland in Colombia**

**Post tratamiento de un lodo proveniente de la co-digestión anaerobia psicrófila mediante un humedal aireado**

*Artículo corto*



Joiner Abaunza Alvarez<sup>1\*</sup> ; Humberto Escalante Hernandez<sup>1</sup> ; Liliana Castro Molano<sup>1</sup> ; Sebastián Mendéz Corredor<sup>2</sup> ; Tatiana Rodriguez Chaparro<sup>2</sup> ; Carlos Alberto Arias<sup>3</sup> 

### **7.Recomendaciones**

El elevado consumo de agua pone en duda la sustentabilidad del proceso, se sugiere usar un 100% de aguas lluvias para realizar las diluciones.

El uso de compresores de aire además de una red eléctrica que suministre la energía disminuye la rentabilidad del proceso, se recomienda suprimir la aireación y hacer una comparación del rendimiento del sistema aireado/no aireado.

### Referencias bibliográficas

- Acreman, M. C., & Holden, J. (2013). Wetlands and their role in the water cycle. *Wetlands Ecology and Management*, 21(2), 193-205.
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Anaerobic digestion of livestock waste: Principles and applications. *Water Science and Technology*, 50(1), 307-314.
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2011). Anaerobic biotechnology. *En 9th European Biofuels Conference and Exhibition*.
- APHA. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23.a ed.). Washington, DC: *American Public Health Association*.
- Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2011). *Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(4), 550-567.
- Arias, C, Brix, H. (2003). Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*.
- Bonmatí, A., & Flotats, X. (2003). Concentration of pig slurry by evaporation: anaerobic digestion as the key process. *Water Science and Technology*, 48(4), 261-272.
- Brix, H. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 29(4), 71-78.
- Brix, H., & Arias, C. A. (2005). The use of constructed wetlands for wastewater treatment and reuse: A review. *Ecological Engineering*, 25(5), 441-451.
- Buendía, L., & Perea, J. (2010). Biodigestión: Una alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos. Mundi-Prensa.

- Chaparro, L. F. (2005). Constructed wetlands for the treatment of domestic wastewater in developing countries. *IWA Publishing*.
- Charris, J. C., & Caselles Osorio, A. (2016). Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(6), 93-103
- Chynoweth, D. P., & Isaacson, R. (1986). Anaerobic digestion of biomass for methane production. CRC Press.
- Cooper, P. F., & Findlater, B. C. (1995). Constructed wetlands in water pollution control. *CRC Press*.
- Cucina, M., Castro, L., Escalante, H., Ferrer, I., & Garfí, M. (2021). Benefits and risks of agricultural reuse of digestates from plastic tubular digesters in Colombia. *Waste Management*, 135.
- De la Rubia, M. A., Romero, L. I., & Sales, D. (2014). *Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste: A review*. *Bioresource Technology*, 160, 427-442.
- Escalante-Hernández, J. A., Rodríguez-Miranda, J. A., & Martínez-Téllez, M. A. (2017). Diseño y construcción de un prototipo de biodigestor anaeróbico de flujo pistón ascendente para tratamiento de aguas residuales domésticas. *Tecnología y Ciencia*, 10(1), 47-57.
- Escalante, H., Castro, L., Besson, V., & Jaimes-Estévez, J. (2017). Feasibility of the anaerobic process of Cheese Whey in a plug flow reactor (PFR). *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, VWIII.

- Fdez-Güelfo, L. A., Álvarez-Gallego, C. J., & Sierra-Martínez, R. (2013). A study of the influence of the organic loading rate on the anaerobic digestion of two-phase olive mill solid waste. *Waste Management*, 33(1), 263-271.
- Goel, J., Kadirvelu, K., Rajagopal, C., & Kumar Garg, V. (2005). Removal of lead (II) by adsorption using treated granular activated carbon: batch and column studies. *Journal of Hazardous Materials*, 125(1-3), 211-220.
- Greenway, M., & Woolley, J. T. (2006). Phosphate uptake and utilization by wetland plants. *Wetlands Ecology and Management*, 14(6), 561-571.
- Hammer, D. A. (1992). *Creating freshwater wetlands*. CRC Press.
- Hammer, D. A., & Hammer, M. J. (2008). *Water and wastewater technology*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Hidalgo, J. L., Martín-Marroquín, J. M., & López-González, J. (2012). *Assessment of the environmental impact of heavy metals in the anaerobic digestion of sewage sludge*. *Journal of Hazardous Materials*, 237-238, 118-125.
- Hospido, A., Moreira, M. T., Fernández-Couto, M. P., & Feijoo, G. (2005). Evaluación ambiental de diferentes procesos de tratamiento para lodos de depuradoras urbanas: digestión anaerobia versus procesos térmicos. *Revista Internacional de Análisis del Ciclo de Vida*, 9(4), 261-271.
- ICA. (2022). Norma Técnica Colombiana NTC 5167. *Abonos. Fertilizantes orgánicos. Requisitos*. Bogotá: Instituto Colombiano Agropecuario.
- Izaguirre, M. (2006). Eficiencia del humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista de Biología Tropical*, 54(2), 445-454.

- Jaimés-Estévez, J., Mercado, E. V., Jaramillo, J. G., Rodríguez, P., Martí-Herrero, J., Escalante, H., & Castro, L. (2022). From laboratory to farm-scale psychrophilic anaerobic codigestion of cheese whey and cattle manure. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101168.
- Jaimés-Estévez, J., Zafra, G., Martí-Herrero, J., Pelaz, G., Morán, A., Puentes, A., Gomez, C., Castro, L. del P., & Escalante Hernández, H. (2020). Psychrophilic Full Scale Tubular Digester Operating over Eight Years: Complete Performance Evaluation and Microbiological Population. *Energies*, 14(1), 151.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment wetlands. *CRC Press*.
- Lamolinara, B., Pérez-Martínez, A., Guardado-Yordi, E., Guillén Fiallos, C., Diéguez-Santana, K., & Ruiz-Mercado, G. J. (2022). Anaerobic digestate management, environmental impacts, and technoeconomic challenges. *Waste Management*, 140, 14–30.
- Liedl, B. E., Bombardiere, J., & Chatfield, J. M. (2006). Fertilizer potential of liquid and solid effluent from thermophilic anaerobic digestion of poultry waste. *Water Science and Technology*, 53(8), 69–79.
- Martí-Herrero, J., Chipana, M., Cuevas, C., Paco, G., Serrano, V., Zymła, B., ... & Borja, R. (2014). Biofilm de bajo costo para mejorar la digestión anaeróbica en regiones de clima frío con digestores tubulares. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Ambiental*, 5(1), 11-20.
- Mata-Álvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fdz-Güelfo, L. A., & Chica, A. F. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion of food waste and wastewater treatment plant sludge. *Bioresource Technology*, 163, 274-286.

- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2007). *Wetlands. (4th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Moreno, B., García, J., & Hernández, J. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales: *Diseño, construcción y operación*. Mundi-Prensa.
- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop yield. *Journal of Environmental Quality*, 41(6), 1636-1642.
- Norma Técnica Colombiana. Agricultural industry products. Organic products used as fertilizers and soil amendments., Pub. L. No. 5167 (2022).
- Pérez, J. A., Díaz, M. C., & López, A. F. (2023). Evaluación de la calidad fisicoquímica y microbiológica de efluentes de sistemas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados y humedales construidos. *Revista Ingeniería e Investigación*, 43(1), 1-12.
- Pérez, J. (2023). *Manejo sostenible del digerido: Guía para prevenir impactos ambientales y promover la eficiencia*. Editorial Eco-Soluciones.
- Ponce, O., Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), & Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe (RedBioLAC). (2020). Biodigestor para tratamiento de aguas del procesamiento del café.
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on the potential of subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment and reuse. *Journal of Environmental Management*, 112, 10-23.
- Tavera-Ruiz, C., Martí-Herrero, J., Mendieta, O., Jaimes-Estévez, J., Gauthier-Maradei, P., Azimov, U., Escalante, H., & Castro, L. (2023). Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in developing countries: Colombia case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113097.

Vila, C., García, J., Sánchez, E., & Beltrán, F. (2010). Effect of aeration and hydraulic retention time on the performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Water Science and Technology*, 61(12), 3061-3068.

Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment: *Five decades of experience*. *Environmental Science & Technology*, 44(10), 3795-3801.