



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**UNIVERSIDAD DEL AZUAY  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE UNA SOLUCIÓN DESCENTRALIZADA  
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTORES:**

JUAN DIEGO ESTRELLA CALLE

EMILIO JOSÉ PACHECO JARAMILLO

**DIRECTORA:**

ING. MARÍA BELÉN ARÉVALO DURAZNO

**CUENCA - ECUADOR**

**2026**

## DEDICATORIA

A mis padres, Liuba y Marcelo, por haberme apoyado en mis decisiones de mi vida y así lograr esta meta, debido a su amor constante e incondicional para enseñarme que con esfuerzo y sacrificio todo es posible en la vida. A mis hermanas, Marcela y Elisa, gracias por su compañía constante, sin importar lo lejos que estemos siempre les agradeceré con sus consejos y apoyo constante. A mi sobrino, Agustín, porque eres una persona muy especial para mí y mi inspiración para poder construir un mundo mejor. A mis amigos Nathaly y Bryam, por haber estado presentes en mi vida y haberme apoyado en cada momento que los necesitaba. Especialmente dedico este logro a mi abuela materna, Edna, por ser una mujer luchadora y valiente que ha ayudado a toda su familia. Finalmente, dedico este logro a mi tía Fati, aunque ya no se encuentre presente su amor y sus enseñanzas siempre estarán conmigo para cumplir mis metas.

Emilio José Pacheco Jaramillo

Dedico este trabajo principalmente a mis padres, Pablo y Daniela, quienes con su esfuerzo, amor y sacrificio han sido mi mayor apoyo para alcanzar cada una de mis metas. Gracias por creer en mí y acompañarme en cada etapa de mi vida.

A mi abuela, Josefina, por su cariño, paciencia y palabras de aliento en cada momento, recordándome siempre la importancia de perseverar.

A todas las personas que han formado parte de mi camino académico y personal, y que con su apoyo y enseñanzas han contribuido a mi crecimiento.

Este logro también es para mí mismo, como reflejo del esfuerzo, la constancia y la dedicación invertidos para culminar esta importante etapa académica.

Juan Diego Estrella Calle

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad del Azuay, por ser el hogar de nuestro crecimiento personal y por brindarnos una formación integral basada en la experiencia y en la reflexión. Un agradecimiento profundo y especial a nuestra directora de titulación, la Ing. María Belén Arévalo, por su invaluable guía, su paciencia y por la confianza desde el primer día. Gracias, ingeniera, por sus conocimientos y su apoyo en cada momento que se le necesitaba para lograr la calidad académica que este trabajo requería. A nuestros profesores, quienes con su apoyo me ayudaron a superarnos y guiarnos para lograr ser un buen profesional en el futuro. A nuestros compañeros y amigos, gracias por transformar las largas horas de clases en risas, por el apoyo mutuo en los momentos más difíciles y por las anécdotas que hoy guardamos como una de las mejores experiencias de vida.

Emilio José Pacheco Jaramillo y Juan Diego Estrella Calle

## **Resumen**

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el uso de humedales construidos como una alternativa descentralizada para el tratamiento de aguas residuales. La investigación se realizó debido a la necesidad de disponer de sistema de saneamiento más accesible y sostenible para sectores rurales y periurbanos donde los sistemas convencionales presentan limitaciones técnicas y económicas. El estudio se basó en un análisis cuantitativo y experimental, considerando el monitoreo hidráulico del sistema y el análisis fisicoquímico y microbiológico del agua residual en el afluente y efluente de los humedales. Se realizó un proceso de toma de muestras para evaluar parámetros como sólidos, conductividad, nutrientes, DQO y coliformes, además del análisis hidráulico mediante la calibración de los vertederos triangulares instalados en cada humedal. Los resultados evidenciaron un funcionamiento hidráulico estable y una reducción significativa de contaminantes, especialmente en DQO y nutrientes. Aunque algunos parámetros microbiológicos y de sólidos suspendidos presentaron limitaciones respecto al cumplimiento normativo, los resultados obtenidos demostraron que el sistema posee potencial técnico, ambiental y económico como alternativa sostenible para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en zonas rurales y periurbanas de Cuenca.

*Palabras clave:* humedales construidos, saneamiento, tratamiento, sostenibilidad, hidráulica.

## **Abstract**

The present study aimed to evaluate the use of constructed wetlands as a decentralized alternative for wastewater treatment. The research was conducted due to the need for more accessible and sustainable sanitation systems for rural and peri-urban areas where conventional systems face technical and economic limitations. The study was based on a quantitative and experimental approach, considering the hydraulic monitoring of the system and the physicochemical and microbiological analysis of wastewater in the influent and effluent of the wetlands. A sampling process was carried out to evaluate parameters such as solids, conductivity, nutrients, chemical oxygen demand (COD), and coliforms, in addition to hydraulic analysis through the calibration of the triangular weirs installed in each wetland. The results showed stable hydraulic performance and a significant reduction of contaminants, especially in COD and nutrients. Although some microbiological parameters and suspended solids presented limitations regarding regulatory compliance, the results demonstrated that the system has technical, environmental, and economic potential as a sustainable alternative for decentralized wastewater treatment in rural and peri-urban areas of Cuenca.

*Keywords:* Constructed wetlands, sanitation, treatment, sustainability, hydraulics.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1:</b> Descripción y configuración de la estación experimental de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba. ....	8
1.1. <b>Introducción</b> .....	8
1.2. <b>Ubicación geográfica</b> .....	11
1.3. <b>Funcionamiento de los humedales construidos y el mecanismo de puesta en marcha</b>	13
1.4. <b>Estructura estratificada del humedal construido</b> .....	14
1.5. <b>Régimen de alimentación del sistema piloto</b> .....	15
<b>CAPÍTULO 2:</b> Metodología.....	18
2.1. <b>Sistema de monitoreo hidráulico y control de caudales</b> .....	18
2.2. <b>Procedimiento de muestreo y análisis de aguas residuales</b> .....	19
<b>CAPÍTULO 3:</b> Eficiencia operativa de los Humedales Construidos. ....	24
3.1. <b>Calibración hidráulica de los vertederos</b> .....	24
3.2. <b>Eficiencia de remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos</b> .....	26
3.2.1. <b>Sólidos Totales, Sólidos totales disueltos y Sólidos suspendidos</b> .....	28
3.2.2. <b>Sólidos volátiles y sólidos fijos</b> .....	29
3.2.3. <b>Conductividad</b> .....	30
3.2.4. <b>Fósforo y Amoníaco</b> .....	31
3.2.5. <b>DQO</b> .....	32
3.2.6. <b>Coliformes fecales y Coliformes totales</b> .....	32
3.3. <b>Comparación con estándares de calidad ambiental nacionales</b> .....	33
<b>CAPÍTULO 4:</b> Viabilidad del sistema. ....	38
4.1. <b>Viabilidad técnica e institucional del sistema</b> .....	38
4.2. <b>Viabilidad económica del sistema</b> .....	39
4.3. <b>Viabilidad ambiental del sistema</b> .....	40
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	42
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	43
<b>ANEXOS</b> .....	46
<b>Anexo A.</b> Calendario de Toma de Muestras .....	46

<b>Anexo B.</b> Hojas de campo de las muestras .....	47
<b>Anexo C.</b> Cálculos de la curva de calibración .....	50
<b>Anexo D.</b> Resultados de los parámetros fisicoquímicos.....	51
<b>Anexo E.</b> Resultados de los parámetros microbiológicos.....	54
<b>Anexo F.</b> Síntesis de entrevista a exfuncionaria de ETAPA EP. ....	64
<b>Anexo G.</b> Cálculos de los costos de prefactibilidad de los sistemas analizados. ....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tipos de humedales construidos y sus principales características. ....	9
<b>Tabla 2.</b> Características generales de la estación experimental de Ucubamba.....	17
<b>Tabla 3.</b> Parámetros con su respectivo método de análisis. ....	20
<b>Tabla 4.</b> Resumen estadístico de las concentraciones por unidad de tratamiento. ....	27
<b>Tabla 5.</b> Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce de la TULSMA. ....	34
<b>Tabla 6.</b> Comparación de resultados de los parámetros con distintas normativas.....	35
<b>Tabla 7.</b> Comparación referencial de indicadores económicos entre sistemas de tratamiento descentralizado.....	39
<b>Tabla 8.</b> Valoración comparativa de viabilidad ambiental entre HC Y FS+FA.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de la ciudad de Cuenca con la localización de la PTAR de Ucubamba. ....	12
<b>Figura 2.</b> Humedal construido piloto durante la operación inicial. ....	13
<b>Figura 3.</b> Estructura de las capas del humedal construido. ....	15
<b>Figura 4.</b> Sistema de alimentación de los humedales construidos.....	16
<b>Figura 5.</b> Proceso de la toma de muestra del humedal construido. ....	22
<b>Figura 6.</b> Curva de calibración del vertedero del Humedal 1.....	24
<b>Figura 7.</b> Curva de calibración del vertedero del Humedal 2.....	24
<b>Figura 8.</b> Curva de calibración del vertedero del Humedal 3.....	25
<b>Figura 9.</b> Gráfica de la eficiencia de remoción de ST, STD y SS. ....	28
<b>Figura 10.</b> Gráfica de la eficiencia de remoción de SV y SF.....	29
<b>Figura 11.</b> Gráfica de la eficiencia de remoción de la conductividad.....	30
<b>Figura 12.</b> Gráfica de la eficiencia de remoción de Fósforo/Amoníaco. ....	31
<b>Figura 13.</b> Gráfica de la eficiencia de remoción de DQO.....	32
<b>Figura 14.</b> Gráfica de la eficiencia de remoción de Coliformes.....	33

**CAPÍTULO 1:** Descripción y configuración de la estación experimental de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba.

### 1.1. Introducción

Hacer referencia a las aguas residuales significa entender que dichas aguas son aquellas que han sido utilizadas en actividades domésticas, comerciales o institucionales y que contienen materia orgánica, nutrientes, sólidos suspendidos y microorganismos que pueden generar impactos negativos en los ecosistemas y la salud humana si no reciben un tratamiento adecuado. Tradicionalmente, su gestión se ha basado en sistemas centralizados de saneamiento, los cuales recolectan grandes volúmenes de agua y los conducen hacia plantas de tratamiento convencionales. No obstante, estos sistemas presentan limitaciones en zonas rurales y periurbanas, principalmente por sus elevados costos de inversión, operación y mantenimiento, así como por la necesidad de personal técnico especializado (David, 1995).

En contextos rurales, estas limitaciones se intensifican debido a la migración de las poblaciones, la baja densidad poblacional y las condiciones topográficas complejas, como la presencia de pendientes pronunciadas y zonas de difícil acceso. Estas características dificultan la implementación y sostenibilidad de sistemas centralizados, haciendo necesario el desarrollo de alternativas descentralizadas que se adapten a las condiciones locales y reduzcan los costos asociados a infraestructura y operación.

En este contexto, los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales han surgido como alternativas técnicamente viables y adaptables a contextos rurales y periurbanos, debido a su menor requerimiento de infraestructura, consumo energético y operación especializada. Entre estas tecnologías, los humedales construidos destacan por su capacidad de reproducir, bajo condiciones controladas, los procesos fisicoquímicos y biológicos presentes en humedales naturales, permitiendo la remoción de materia orgánica, sólidos, nutrientes y microorganismos patógenos por medio de la interacción existente entre el medio filtrante, la capa vegetal y la comunidad microbiana (Kadlec & Wallace, 2009). Además, este sistema de ingeniería presenta su propia clasificación con sus características y aplicaciones respectivas como se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Tipos de humedales construidos y sus principales características.

<b>Tipo de humedal construido</b>	<b>Características principales</b>	<b>Aplicación común</b>
Flujo superficial	El agua circula sobre el sustrato y entre la vegetación emergente	Tratamiento secundario y control paisajístico
Flujo subsuperficial horizontal	El agua fluye horizontalmente a través de un sustrato saturado	Remoción de materia orgánica y sólidos
Flujo subsuperficial vertical	El agua se aplica de forma intermitente desde la superficie	Alta aireación y remoción de nutrientes
Sistema francés	Combina humedales verticales y horizontales; recibe aguas residuales crudas	Zonas rurales con bajo mantenimiento

Fuente: Kadlec & Wallace (2009).

Los humedales construidos son considerados Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), debido a que aprovechan procesos ecológicos naturales para contribuir al tratamiento de aguas residuales y la protección ambiental. Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, las SbN corresponden a acciones orientadas a proteger, gestionar y restaurar ecosistemas naturales o modificados para afrontar desafíos sociales de manera eficiente y resiliente, generando simultáneamente beneficios ambientales y sociales (Cohen-Shacham et al., 2016). Por este motivo, los humedales construidos representan una alternativa de saneamiento con menor complejidad tecnológica y requerimientos energéticos mínimos en comparación con los sistemas centralizados convencionales.

Aunque este tipo de sistemas requiere un alcantarillado condominal para conducir las aguas residuales hacia la unidad de tratamiento, su implementación presenta diferencias importantes frente a las plantas convencionales. Mientras los sistemas tradicionales demandan estructuras de hormigón, equipos electromecánicos y mayores costos de operación, los humedales construidos se basan principalmente en excavaciones acondicionadas con materiales impermeabilizantes, medios filtrantes y vegetación local. Además, pueden integrarse de mejor manera al paisaje del lugar y fomentar la participación comunitaria en las actividades tanto de operación como de mantenimiento, debido a su menor complejidad tecnológica.

Para evaluar el comportamiento de esta tecnología bajo condiciones locales, el estudio se desarrolló en la estación experimental de Ucubamba, en el cantón Cuenca, donde se implementó y monitoreó una planta piloto de humedales construidos. Este espacio permitió analizar la eficiencia de remoción y el desempeño hidráulico del sistema, considerando características representativas de las aguas residuales y del contexto rural y periurbano de la ciudad de Cuenca.

En este contexto, la estación experimental de humedales construidos en Ucubamba constituye un espacio clave para evaluar el desempeño hidráulico, operativo y ambiental de estos sistemas bajo condiciones controladas, aportando información relevante para su posible implementación como alternativa descentralizada de tratamiento de aguas residuales en el cantón Cuenca. Aunque se trata de una instalación experimental, sus características de operación permiten analizar procesos representativos de escenarios rurales, especialmente en relación con la distribución intermitente del caudal, la estabilidad hidráulica del sistema y la eficiencia de remoción de contaminantes.

En sistemas experimentales, como el implementado en Ucubamba, el monitoreo hidráulico constituye un componente fundamental, debido a que el desempeño del tratamiento depende directamente de variables como el caudal aplicado, la carga hidráulica, el tiempo de retención y la distribución uniforme del flujo dentro del lecho filtrante. Por esta razón, a la salida de cada unidad se ha colocado un vertedero triangular de 90° con un sensor de nivel, lo que permite medir el caudal de salida. La calibración de los vertederos utilizados para medir los caudales resulta esencial para garantizar mediciones confiables y reducir incertidumbres durante el monitoreo experimental. Una medición hidráulica inadecuada podría generar errores de interpretación de la eficiencia del sistema y en la evaluación de su comportamiento operativo. Por lo tanto, la calibración hidráulica permite relacionar de manera precisa la altura de agua registrada en el vertedero con el caudal real descargado, constituyendo una herramienta necesaria para el análisis técnico del funcionamiento de los humedales construidos (Arévalo-Durazno et al., 2023).

Con base en estas consideraciones, la presente investigación se orienta a evaluar el desempeño hidráulico y operativo de los humedales construidos de flujo vertical subsuperficial de tipo francés mediante la calibración de los vertederos ubicados en la salida de las unidades y el análisis fisicoquímico y microbiológico del agua residual tratada. De esta manera, el estudio busca generar información técnica que contribuye a la evaluación de alternativas descentralizadas de saneamiento aplicables a contextos rurales y periurbanos del cantón Cuenca.

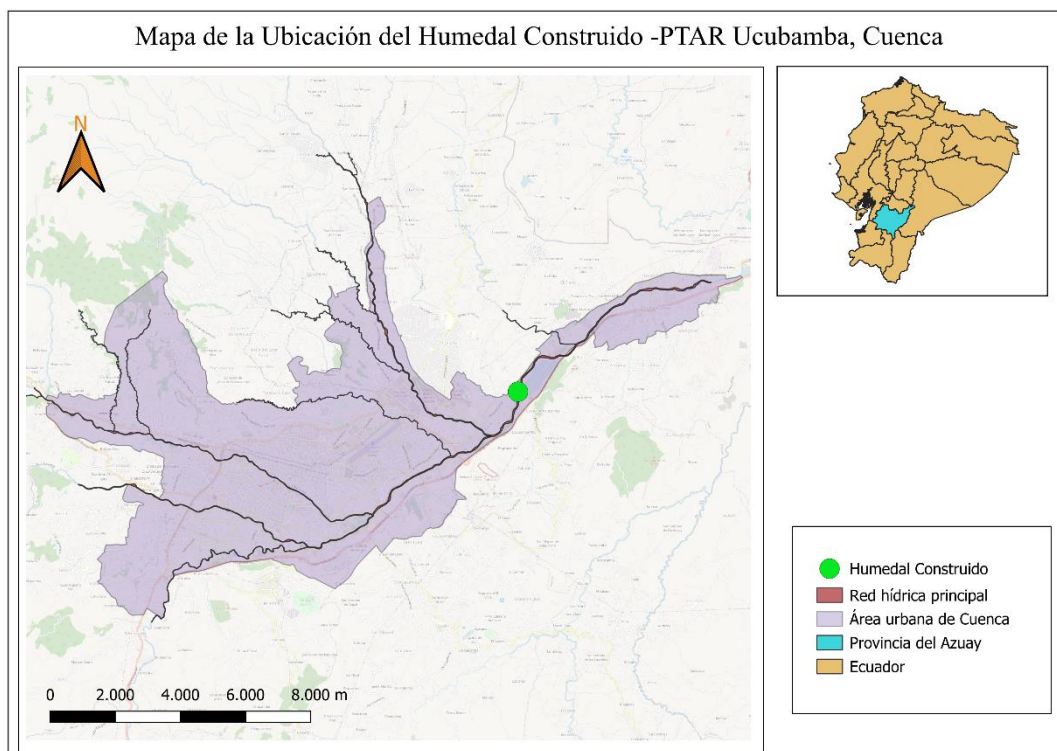
Para efectos de esta investigación, la viabilidad del sistema no se limita al cumplimiento estricto de todos los parámetros normativos durante la etapa experimental, sino que también considera su capacidad para operar de manera estable, mantener un funcionamiento hidráulico adecuado, alcanzar niveles de remoción consistentes bajo condiciones controladas y representar una alternativa con potencial de sostenibilidad económica y ambiental. Bajo este enfoque, la evaluación de la viabilidad

integra criterios técnicos, económicos y ambientales, a partir del análisis de las fortalezas y limitaciones evidenciadas durante la fase experimental. Estos aspectos serán abordados y discutidos con mayor profundidad en el último capítulo.

## **1.2. Ubicación geográfica**

La estación experimental de humedales construidos se localiza en la parte suroeste de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Ucubamba, situada en la parroquia de Nulti, cantón Cuenca, provincia del Azuay. Se encuentra aproximadamente en las coordenadas 2°52'36" S y 78°56'47" W, a una altitud cercana a los 2430 m s. n. m como se observa en la Fig 1. Su emplazamiento corresponde a un entorno de transición entre zonas periurbanas y rurales, lo que permite evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones climáticas y topográficas representativas del contexto local del cantón Cuenca. Asimismo, la estación experimental se ubica en las cercanías del río Cuenca, estableciendo una relación directa con un cuerpo de agua receptor potencial.

Si bien la estación experimental opera bajo condiciones controladas y cuenta con infraestructura técnica para el monitoreo y seguimiento del sistema, su localización permite evaluar aspectos relevantes relacionados con el funcionamiento hidráulico, la respuesta del sistema frente a variaciones operativas y las condiciones ambientales características de sectores rurales andinos. En este sentido, la evaluación del desempeño de los humedales construidos permite determinar su capacidad de remoción de contaminantes antes de una descarga, contribuyendo a la generación de información técnica relacionada con la protección de la calidad del agua y la mitigación de los impactos ambientales. Por ende, la estación forma un espacio experimental eficaz para futuras implementaciones descentralizadas en contextos similares, reconociendo que las condiciones operativas y de control del sistema deberán adaptarse para aplicaciones rurales reales.



**Figura 1.** Mapa de la ciudad de Cuenca con la localización de la PTAR de Ucubamba.

Fuente: Elaboración propia.

En materia de clima, la ciudad de Cuenca presenta un clima templado andino, con una temperatura media anual de 14°C y una precipitación promedio anual aproximada de 800 a 900 mm, distribuida de manera irregular a lo largo del año. Estas condiciones climáticas influyen directamente en los procesos biológicos que ocurren en los humedales construidos, particularmente en la descomposición orgánica microbiana responsable de la degradación de la materia orgánica y en el desarrollo de la vegetación macrófitas. La estabilidad térmica relativa del clima andino favorece el funcionamiento continuo del sistema, mientras que los eventos de precipitación pueden incidir en los caudales y cargas hidráulicas que ingresan a los humedales.

La localización de la estación experimental, junto con sus características topográficas y climáticas, facilita el acceso para actividades de operación, mantenimiento y monitoreo, aspectos fundamentales para el seguimiento técnico del sistema. Esta accesibilidad permite realizar campañas periódicas de muestreo, observaciones de campo y ajustes operativos, garantizando la obtención de información confiable sobre el desempeño de los humedales construidos bajo condiciones reales de operación. En conjunto, estas características hacen de la estación experimental de Ucubamba un espacio idóneo para el análisis y evaluación del tratamiento de aguas residuales en el contexto regional.

### 1.3. Funcionamiento de los humedales construidos y el mecanismo de puesta en marcha

Los humedales construidos piloto instalados en la estación experimental de Ucubamba corresponden a sistemas de flujo vertical, que imitan bajo condiciones controladas, la autodepuración propia en los humedales naturales. En este tipo de sistemas, el agua residual se distribuye de forma superficial y percola verticalmente a través de un lecho filtrante estratificado, donde se desarrollan procesos simultáneos de filtración física, adsorción en el sustrato y degradación biológica de la materia orgánica. La interacción entre el sustrato granular, la biopelícula microbiana y la vegetación permite la remoción progresiva de contaminantes, tal como señalan Vera et al. (2016), quienes destacan que estos sistemas se sustentan en la acción conjunta de vegetación, suelos y bacterias. La Figura 2 muestra uno de los humedales piloto durante su fase de operación.



**Figura 2.** Humedal construido piloto durante la operación inicial.

Fuente: Elaboración propia.

Como lo menciona Arévalo-Durazno et al., (2023) estos sistemas presentan un desempeño estable bajo cargas variables, siempre que se mantenga una adecuada aireación del lecho y una operación controlada de los ciclos de carga y descanso. Este principio es coherente con el diseño del sistema piloto de Ucubamba, el cual adopta criterios operativos similares a los del sistema francés, caracterizado por la aplicación de cargas hidráulicas intermitentes que favorecen condiciones aerobias en el sustrato y reducen el riesgo de colmatación (Santos et al., 2024).

La puesta en marcha del humedal construido se realizó de manera gradual y controlada durante el periodo inicial de operación, debido a que el sistema se encontraba en una fase experimental orientada

a la estabilización hidráulica y biológica del medio filtrante. Durante esta etapa, el sistema fue alimentado con un volumen de 0.098 m<sup>3</sup> por ciclo, aplicando en aproximadamente 30s, generando un caudal instantáneo de 11.76 m<sup>3</sup>/h. Considerando un área superficial de 9.81 m<sup>2</sup>, se obtuvo una carga hidráulica instantánea de 1.19 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h, mientras que el caudal diario estimado fue de 2.6 m<sup>3</sup>/d, equivalente a una carga hidráulica de 0.24 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d.

Como lo mencionan Torres & Vanegas, (2022) una sobrecarga temprana puede afectar negativamente la conductividad hidráulica del lecho y retrasar la estabilización microbiológica del sistema, especialmente en climas andinos donde la temperatura influye en la actividad microbiana. Por ello, en Ucubamba se ajustaron cuidadosamente los tiempos de carga y reposo, verificando la distribución uniforme del flujo y la acumulación de sólidos, antes de iniciar formalmente el programa de monitoreo del desempeño del humedal.

No obstante, es importante señalar que este nivel de control operativo corresponde principalmente a las condiciones de investigación y calibración propias de una estación experimental. En aplicaciones rurales reales, donde generalmente no se dispone de condiciones tan controladas para la puesta en marcha y operación del sistema, los humedales construidos suelen funcionar bajo esquemas más simples de alimentación y mantenimiento, con menores requerimientos técnicos y energéticos que los sistemas centralizados convencionales. En estos casos, es común que la regulación de las cargas hidráulicas durante el arranque del sistema se realice de manera gradual mediante sifones, los cuales permiten ajustar el caudal de ingreso hasta alcanzar progresivamente la carga de diseño. En este sentido, los valores de cargas hidráulicas, y tiempos de operación y descanso obtenidos en la estación experimental permiten aplicar criterios de operación y diseño para que los humedales construidos puedan ser adaptados a condiciones menos controladas.

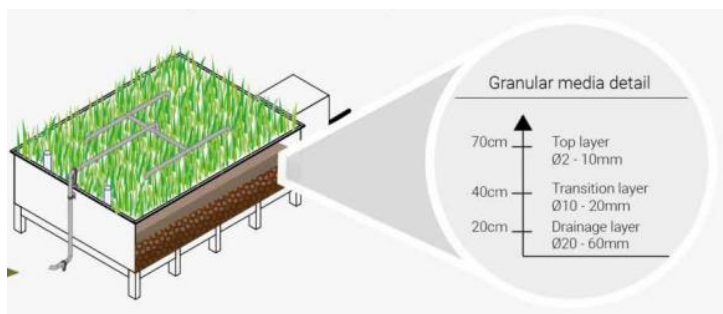
#### **1.4. Estructura estratificada del humedal construido**

El desempeño de los humedales construidos de flujo vertical depende en gran medida de la configuración del medio filtrante, el cual cumple funciones hidráulicas y biológicas dentro del sistema. De acuerdo con Arias y Brix (2003), el sustrato proporciona soporte para la vegetación y constituye el medio donde se desarrollan los microorganismos mediadores en la mineralización de residuos y reciclaje de nutrientes. A su vez, la retención de sólidos y la aireación del lecho durante los periodos de descanso característicos de estos sistemas (Suaza, 2016).

En el caso de los humedales piloto implementados en la PTAR de Ucubamba, el medio filtrante fue seleccionado siguiendo la configuración del sistema francés de humedales de flujo vertical, con algunas adaptaciones relacionadas con la disponibilidad de materiales en el contexto local. Según el diseño reportado para estos sistemas, el lecho filtrante presenta una profundidad de 0.7m y está conformado

por tres capas de grava con diferentes granulometrías, dispuestas de forma estratificada para garantizar una adecuada conductividad hidráulica y el correcto funcionamiento del sistema (Arévalo-Durazno et al., 2023).

La estructura del sustrato utilizada en los humedales piloto se compone de una capa superior de grava fina (2-10 mm) con un espesor aproximado de 30 cm, seguida de una capa intermedia de grava de tamaño medio (10-20 mm) con un espesor de 20 cm, y finalmente una capa inferior de grava gruesa (20-60 mm) de 20 cm, que funciona como capa de drenaje del sistema. La disposición de estas capas y los principales componentes del humedal construido se muestra en la Figura 3, donde se presenta el esquema de la estructura estratificada del medio filtrante adoptado para los humedales piloto de Ucubamba basado en el diseño descrito por Arévalo-Durazno et al. (2023).



**Figura 3.** Estructura de las capas del humedal construido.

Fuente: Arévalo-Durazno et al. (2023).

### 1.5. Régimen de alimentación del sistema piloto

Los humedales piloto se alimentan del agua residual proveniente del alcantarillado combinado de la ciudad de Cuenca. Mediante una bomba sumergida se lleva agua residual cruda que ha pasado el tratamiento preliminar (cribado y desarenado) hacia los tanques de alimentación de los humedales piloto. El agua residual se aplica de manera intermitente sobre los humedales dispuestos en paralelo y operados de forma alternada, lo que permite combinar periodos de carga hidráulica con periodos de reposo. Este esquema operativo favorece la aireación natural del sustrato y el establecimiento de condiciones aerobias, estimulando la actividad microbológica responsable de la degradación de materia orgánica y la nitrificación. Además, el propio humedal cumple funciones de retención y estabilización progresiva de los sólidos en la superficie del lecho, lo que simplifica la operación y el mantenimiento del sistema, especialmente en esquemas de saneamiento descentralizado (Molle et al., 2005).

La vegetación utilizada en los humedales piloto corresponde a macrófitas emergentes, específicamente kikuyo (*Lolium Perenne*), especie adaptada a las condiciones locales del área de estudio. Esta especie favorece la oxigenación de la rizosfera, promueven la actividad biológica y contribuyen a la degradación de la materia orgánica presente en el afluente. Investigaciones recientes destacan que la interacción entre sustrato, biopelícula microbiana y vegetación incrementa la capacidad depuradora de los humedales, especialmente en sistemas de flujo vertical con cargas intermitentes (Arévalo-Durazno et al., 2023). Resultados similares han sido documentados en estudios desarrollados en la región andina, donde se evidencia que una adecuada combinación de materiales y plantas mejora el desempeño hidráulico y la estabilidad operativa de humedales construidos piloto (Torres & Vanegas, 2022).

El régimen de alimentación de los humedales piloto se basa en un esquema de carga intermitente controlada, inspirado en principios operativos del sistema francés. El afluente es almacenado en tanques de 2 500 L equipados con sensores de nivel y electroválvulas automatizadas, lo que permite una distribución independiente y programada hacia cada humedal como se lo demuestra en la Figura 4, donde se observa el sistema de alimentación y control de flujo implementado en la estación experimental. Cada unidad recibe alimentación cada tres días, seguida de periodos de descanso que favorecen la aireación del sustrato y reducen el riesgo de saturación hidráulica. La carga hidráulica inicial fue de  $0.24 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ , en función de la estabilización de los procesos biológicos. El control del caudal de salida se realiza mediante vertederos triangulares, técnica ampliamente utilizada en sistemas piloto por su precisión y facilidad de calibración (Arévalo-Durazno et al., 2023). Las principales características técnicas y operativas del sistema se presentan de forma sintética en la Tabla 2.



**Figura 4.** Sistema de alimentación de los humedales construidos: a) Tanques y electroválvulas; b) Sistema de control automatizado.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.** Características generales de la estación experimental de Ucubamba.

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de sistema	Sistema francés modificado
Configuración	Tres humedales operados de manera independiente
Tipo de flujo	Flujo vertical con carga intermitente
Régimen de alimentación y descanso	Intermitente con 3 días de alimentación y 6 días de descanso
Volumen de tanques	2 500 L
Sistema de control	Electroválvulas con sensores de nivel
Sustrato	Capa superior: grava 2–10 mm (30 cm); capa intermedia: grava 10–20 mm (20 cm); capa inferior: grava 20–60 mm (20 cm)
Vegetación	Kikuyo ( <i>Lolium Perenne</i> )
Carga hidráulica inicial	0.24 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d
Medición de caudal de salida	Vertederos triangulares de 90°

Fuente: Adaptado de Arévalo-Durazno et al. (2023).

## **CAPÍTULO 2: Metodología**

### **2.1. Sistema de monitoreo hidráulico y control de caudales**

El monitoreo hidráulico forma parte primordial dentro de los pasos para el análisis de eficiencia de los sistemas de aguas servidas, especialmente en instalaciones experimentales o piloto, como es este caso, donde es necesario controlar con precisión el caudal afluente y efluente. La medición precisa del caudal permite determinar parámetros operacionales clave, como el tiempo de retención hidráulica, la carga hidráulica aplicada y la distribución del flujo dentro del medio filtrante, los cuales influyen directamente en la eficiencia de remoción de contaminantes. En este sentido, el control hidráulico permite establecer un balance de agua en el sistema, considerando el caudal de entrada, el volumen almacenado en el lecho y el caudal de salida, lo que permite evaluar el comportamiento hidráulico del humedal y detectar posibles pérdidas, acumulaciones o cortocircuitos hidráulicos que puedan afectar su desempeño. En sistemas descentralizados o de pequeña escala, el control hidráulico es especialmente relevante debido a que pequeñas variaciones en el caudal pueden generar cambios significativos en las condiciones de operación y en el rendimiento del tratamiento. De igual forma, diferentes investigaciones como la de Abbassi et al., 2018 señalan la importancia de operar y evaluar los sistemas de tratamiento bajo condiciones hidráulicas controladas para determinar su desempeño real en escenarios descentralizados de tratamiento de aguas residuales, ya sean humedales, pozos sépticos, etc. En este contexto, los dispositivos de medición de caudal mediante vertederos representan una de las técnicas más utilizadas debido a su simplicidad operativa, bajo costo y confiabilidad en condiciones de flujo libre.

En el caso de los humedales construidos se utilizan vertederos triangulares de 90° en la salida de humedales. En general los vertederos son estructuras hidráulicas diseñadas para medir caudales en canales abiertos a partir de la relación entre la altura del agua sobre el vertedero y el caudal que lo atraviesa. De acuerdo con la norma internacional ISO 1438, el principio de medición se basa en la relación hidráulica entre la carga aguas arriba del vertedero y el flujo descargado, la cual puede determinarse mediante ecuaciones empíricas calibradas para distintos tipos de vertederos (ISO, 2017). Entre los diferentes tipos de vertederos, los vertederos triangulares o de V-notch son particularmente adecuados para medir caudales pequeños, según el Water Measurement Manual del U.S. Bureau of Reclamation, lo que vuelve a estos vertederos ampliamente utilizados en laboratorios, canales experimentales y plantas piloto debido a su capacidad para medir con precisión caudales bajos y su facilidad de calibración.

La calibración de los vertederos constituye un paso esencial para asegurar la precisión de las mediciones hidráulicas. Este proceso se realiza con el fin de establecer la relación entre la altura de la lámina de agua sobre el vértice del vertedero y el caudal real que circula por nuestro sistema. La norma ISO 1438

establece que para garantizar resultados confiables es necesario cumplir condiciones hidráulicas específicas, como flujo libre, adecuada distancia entre el punto de medición y el vertedero, y correcta instalación geométrica del dispositivo (ISO, 2017). En sistemas experimentales de tratamiento de aguas residuales, la calibración adecuada de los dispositivos de medición hidráulica resulta fundamental para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos durante el monitoreo del sistema.

El proceso de medición se realizó en campo mediante el uso del método volumétrico. Para ello se utilizó el sistema automatizado de electroválvulas controlado por sensores de nivel instalados en el tanque de almacenamiento de 2 500L. Durante el procedimiento se activó cada electroválvula de forma individual durante un minuto, permitiendo una descarga controlada y estable, mientras la válvula de salida se mantuvo parcialmente abierta y totalmente abierta, con el fin de regular el caudal y garantizar condiciones de flujo libre en el vertedero, necesarias para las correctas mediciones posteriores. El caudal se determinó recolectando el agua descargada en una probeta graduada de 2 000 mL y registrando el tiempo mediante un cronómetro. Las mediciones se realizaron cada 5 segundos hasta completar 8 registros consecutivos por cada humedal según la apertura de la válvula de salida. Durante cada medición se registró el volumen recolectado y el tiempo correspondiente, así como el valor de la altura hidráulica (H) obtenido a partir del sensor del nivel, información que posteriormente fue utilizada para el proceso de calibración del sistema.

## **2.2. Procedimiento de muestreo y análisis de aguas residuales**

Como elemento de la metodología del estudio el proceso de muestreo constituye una etapa crítica dentro de la evaluación del desempeño del sistema descentralizado, ya que de su correcta ejecución depende la validez de los resultados analíticos obtenidos. Por lo tanto, el muestreo de aguas residuales debe desarrollarse bajo criterios técnicos estandarizados para que generen representatividad y confiabilidad en el análisis. En humedales construidos, las muestras se recolectan tanto en el punto de ingreso, como en el de salida, lo cual permite determinar la eficiencia de remoción del sistema bajo condiciones reales de operación. De acuerdo con Lipps et al., (2023), las muestras deben tomarse en recipientes previamente acondicionados según el parámetro a analizar, evitando contaminación cruzada y aplicando preservación inmediata mediante refrigeración a aproximadamente 4 °C hasta su procesamiento como se lo menciona en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Asimismo, Kadlec & Wallace (2009) recomiendan que, en sistemas con alimentación intermitente, se consideren muestreos puntuales estratégicos o compuestos temporales, dependiendo del régimen hidráulico, a fin de captar adecuadamente las variaciones de carga orgánica y nutrientes. Por ende, el traslado al laboratorio debe efectuarse en el menor tiempo posible para evitar cambios fisicoquímicos o biológicos que puedan alterar parámetros sensibles como el amoníaco y la DQO.

El proceso de muestreo que se realizó fue previamente planificado con el propósito de garantizar un control adecuado para la toma de muestras de los humedales construidos. Previo al trabajo de campo se elaboró un calendario de muestreo (ver Anexo A) y una hoja de campo para registrar la fecha, condiciones climáticas, estado del entorno y características organolépticas del agua residual domestica proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, analizando tanto del afluente como del efluente del humedal construido (ver Anexo B). En cuanto a los materiales, se utilizaron dos baldes para la recolección directa del agua residual, embudos para el trasvase hacia dos botellas plásticas transparentes de un litro destinadas al análisis fisicoquímico; paralelamente, se colocaron en dos envases estériles para las muestras microbiológicas (ver la Figura 5). Debido a que el sistema opera de manera intermitente, las muestras se tomaron puntualmente cada hora durante el periodo de carga hidráulica. Finalmente, se recolectaron 4 muestras en total por cada humedal y fueron conservadas respectivamente en un cooler. Y luego transportadas oportunamente al laboratorio para su análisis.

Desde una perspectiva lógica, la caracterización integral del agua residual requiere la determinación sistemática de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que permitan interpretar el comportamiento de los humedales como se observa en la Tabla 3. En primer lugar, la fracción sólida se evalúa mediante la cuantificación de todos los sólidos que son sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos (SF) y sólidos sedimentables, aplicando métodos gravimétricos y de filtración establecidos en el Standard Methods (Lipps et al., 2023).

De manera complementaria, el pH y la conductividad eléctrica se determinan mediante medición electrométrica con equipos previamente calibrados garantizando precisión instrumental. A su vez, la demanda química de oxígeno (DQO) se analiza mediante el método del dicromato de digestión cerrada, mientras que el fósforo total y el amoníaco se cuantifican a través de técnicas colorimétricas o espectrofotometría específicas. En el aspecto del análisis microbiológico, la determinación de coliformes fecales y totales se realiza mediante filtración por membrana o el método del número más probable, conforme a los lineamientos de la EPA (EPA, 2002).

**Tabla 3.** Parámetros con su respectivo método de análisis.

<b>Parámetros</b>	<b>Método de análisis</b>
Sólidos Totales	Gravimétrico

Sólidos Suspendidos Totales	Filtración y secado
Sólidos Volátiles	Calcinación
Sólidos Fijos	Gravimétrico por calcinación.
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Gravimétrico o instrumental
Sólidos Sedimentables	Volumétrico (Cono Imhoff)
pH	Potenciométrico
Conductividad	Electrométrico
DQO	Dicromato, digestión cerrada
Fósforo	Método ácido ascórbico
Amoníaco	Método fenato
Coliformes totales y fecales	Filtración por membrana

Fuente: Lipps et al. (2023).



**Figura 5.** Proceso de la toma de muestra del humedal construido.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al análisis microbiológico se determinó la presencia de coliformes totales y fecales mediante el método del Número más Probable (NMP), siguiendo los lineamientos de Standard Methods. Para ello se emplearon medios de cultivo como Lauril Sulfato, Caldo Brilla, EC y Peptona para proceder a la siembra en tubos de ensayo con campanas Durham, y así permitiendo la detección de producción de gas y la posterior estimación de la concentración bacteriana.

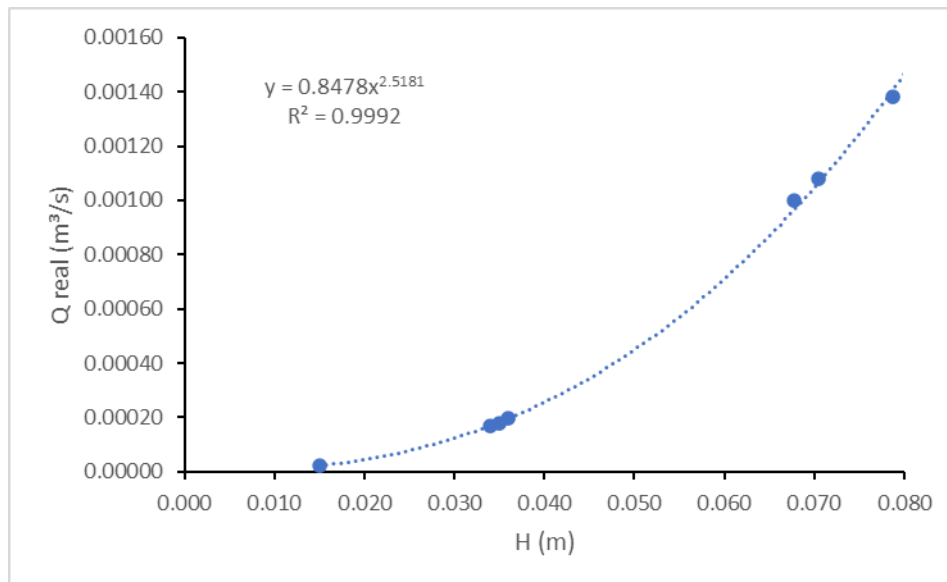
Por su parte, el análisis fisicoquímico incluyó la determinación de sólidos totales y volátiles se determinaron mediante métodos gravimétricos con secado en estufa e incineración en la mufla, aplicando diferencia de masas mediante el uso de crisoles y una alícuota de 50 mL de las muestras para el análisis. Los sólidos sedimentables se determinaron con el cono Imhoff cuando se evidenció presencia de sedimentos. Por otro lado, los sólidos disueltos totales, el pH y la conductividad se midieron con equipos multiparamétrico previamente calibrados y enjuagados con agua desionizada, registrando tres lecturas por cada muestra. A su vez, los sólidos suspendidos se realizaron mediante un cálculo diferencial entre los sólidos totales y los sólidos totales disueltos, y los sólidos fijos de la misma forma una diferencia entre los sólidos totales y los sólidos volátiles. La DQO se determinó mediante el uso de kits de digestión rápida con su respectiva curva de calibración. Por ende, el análisis de fósforo y amoníaco se obtuvieron mediante el uso de curvas de calibración empleando muestras previamente filtradas, el uso de patrones que son colocados en balones de aforo previamente aforados y homogeneizados, y así pasarlos a sus respectivos erlenmeyers al igual que las muestras, e incluyendo para ambos análisis el uso de un blanco analítico para realizar el respectivo análisis.

En resumen, la metodología implementada en el análisis mostró concordancia con los métodos referenciales descritos en la literatura técnica estandarizada, especialmente en lo relativo a los procedimientos gravimétricos para la determinación de sólidos, la aplicación del método del Número Más Probable para el análisis microbiológico y el uso de espectrofotometría con curvas de calibración para fósforo y amoníaco. Aunque en ciertos parámetros, como la DQO, se emplearon kits comerciales en lugar del método tradicional del refluo abierto con dicromato, el principio analítico se mantuvo consistente con el estándar normativo. De igual manera, la determinación de sólidos suspendidos mediante cálculo diferencial representó una adaptación operativa basada en las fracciones previamente obtenidas, sin comprometer la base conceptual del método. Por ende, puede afirmarse que los procedimientos aplicados conservaron la esencia técnica de los métodos estandarizados, asegurando confiabilidad, coherencia metodológica y validez en la evaluación del desempeño de los humedales construidos.

### CAPÍTULO 3: Eficiencia operativa de los Humedales Construidos.

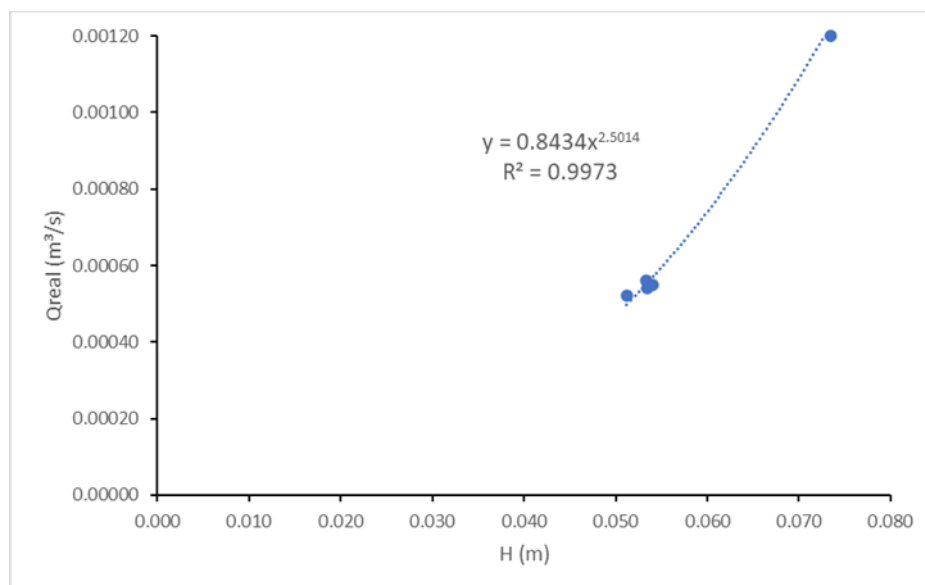
#### 3.1. Calibración hidráulica de los vertederos

Para evaluar el comportamiento hidráulico, se presentan las curvas de calibración de las Figuras 6,7 y 8. Estos gráficos relacionan el caudal y la carga hidráulica, funcionando como herramienta precisa para el monitoreo del proyecto.



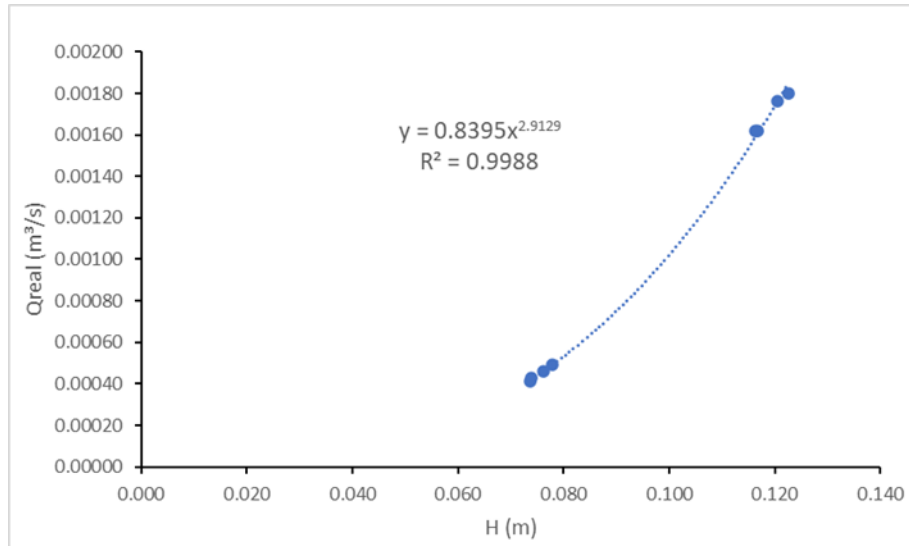
**Figura 6.** Curva de calibración del vertedero del Humedal 1.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.** Curva de calibración del vertedero del Humedal 2.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8.** Curva de calibración del vertedero del Humedal 3.

Fuente: Elaboración propia.

La calibración hidráulica de los vertederos triangulares de 90° mostró una relación claramente definida entre la carga hidráulica (H) y el caudal (Q), como se observa en las Figuras 6,7 y 8. Para determinar la carga hidráulica efectiva, se consideró HT como la distancia vertical entre la base del vertedero y el sensor, HLs como la distancia medida por el sensor hasta la lámina de agua, y la altura de la cresta del vertedero (8.5 cm). Las ecuaciones obtenidas responden a la forma  $Q = k \cdot H^n$ , con coeficientes de determinación elevados ( $R^2 > 0.99$ ), lo que evidencia una alta consistencia en los datos experimentales. El Humedal 1 presentó la ecuación  $Q = 0.8478H^{2.5181}$  y un coeficiente  $R^2 = 0.9992$ . Cabe mencionar que el primer valor registrado corresponde a una condición de carga hidráulica mínima asociada a caudales cercanos a cero; no obstante, este dato fue conservado debido a que forma parte del rango experimental evaluado. El Humedal 2 presentó la ecuación  $Q = 0.8434H^{2.5014}$  ( $R^2 = 0.9973$ ); y el Humedal 3 presentó la ecuación  $Q = 0.8395H^{2.9129}$  ( $R^2 = 0.9988$ ). Estos resultados son coherentes con la formulación teórica de vertederos triangulares de 90°, donde el exponente esperado es cercano a 2.5. En este sentido, el comportamiento observado se alinea con lo establecido en la norma ISO 1438:2017, que enfatiza la medición precisa de la carga y condiciones de flujo libre para garantizar resultados confiables (ISO, 2017) (ver Anexo C).

Desde un enfoque comparativo, la inclusión del coeficiente de descarga real (Cd) permitió interpretar con mayor precisión el comportamiento hidráulico del sistema. Este coeficiente se obtuvo mediante  $Cd = k/1.38$ , donde 1.38 corresponde a la constante teórica derivada de la ecuación de los vertederos triangulares de 90°. Así, se obtuvieron valores de 0.614, 0.611 y 0.608 para los humedales 1,2 y 3, respectivamente, consistentes entre sí y dentro del rango esperado en condiciones reales. La ligera disminución del Cd puede atribuirse a variaciones menores en la descarga, como efectos de rugosidad

o diferencias geométricas. A su vez, el mayor exponente del Humedal 3 ( $n=2.91$ ) sugiere una desviación del comportamiento teórico, posiblemente asociada a condiciones locales de flujo o variabilidad experimental. Según el Water Measurement Manual del U.S. Bureau of Reclamation (U.S. Bureau of Reclamation, 2001), este tipo de variaciones es común en sistemas piloto.

En términos operativos, las ecuaciones de calibración permitieron estimar el caudal con un nivel adecuado de precisión y repetibilidad, aspecto fundamental para el monitoreo hidráulico de los humedales construidos de pequeña escala. Los elevados coeficientes  $R^2$  y la consistencia observada en los valores de  $C_d$  reflejan un comportamiento hidráulico estable entre los sistemas evaluados. Aunque las condiciones analizadas corresponden a una estación experimental con monitoreo técnico permanente, la calibración realizada permite establecer criterios de operación y control hidráulico potencialmente aplicables en sistemas descentralizados rurales, especialmente en relación con la distribución del flujo y el seguimiento de las cargas hidráulicas. Sin embargo, se reconoce que en aplicaciones rurales pueden existir variaciones operativas y menores niveles de control instrumental que podrían influir en el desempeño hidráulico del sistema

### **3.2. Eficiencia de remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos**

Los resultados de monitoreo, incluyendo promedios y valores extremos de entrada y salida, se encuentran recopilados en la Tabla 4 para facilitar la comprensión inicial del rendimiento de cada unidad (ver anexos D y E con los resultados obtenidos). En la tabla, C.E corresponde a concentración de entrada, C.S a concentración de salida, SD.E a desviación estándar de la entrada y SD.S a desviación estándar de la salida.

**Tabla 4.** Resumen estadístico de las concentraciones por unidad de tratamiento.

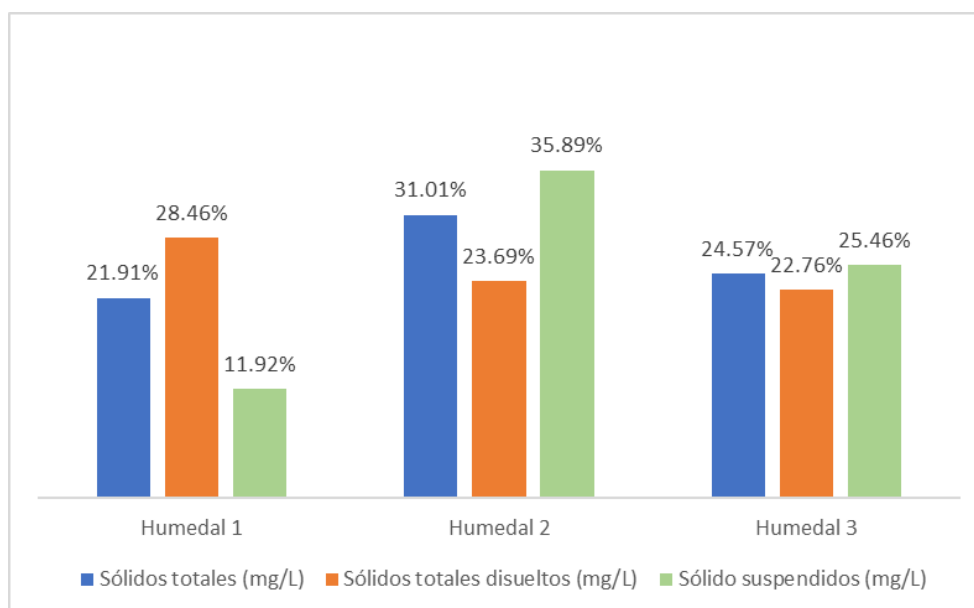
Parámetros	H1				H2				H3				Max	Min
	C.E	SD. E	C.S	SD. S	C.E	SD. E	C.S	SD. S	C.E	SD. E	C.S	SD. S		
Sólidos totales (mg/L)	424.00	82.41	335.00	91.00	415.00	168.57	280.50	109.94	408.75	158.05	282.75	63.40	424.00	280.50
Sólidos totales disueltos (mg/L)	190.91	39.48	133.58	17.35	160.69	50.47	119.92	34.45	170.29	55.00	127.42	22.21	190.91	119.92
Sólidos suspendidos (mg/L)	233.10	107.75	201.42	87.75	254.31	152.55	160.58	114.82	238.47	106.03	155.33	66.73	254.31	155.33
Sólidos volátiles (mg/L)	158.00	51.61	121.50	37.57	161.00	78.22	102.50	67.08	173.00	86.88	111.75	37.63	173.00	102.50
Sólidos fijos (mg/L)	266.00	46.48	213.50	66.98	254.00	105.82	178.00	49.50	235.75	74.35	171.00	34.35	266.00	171.00
Conductividad (us/cm)	383.75	84.76	268.33	34.46	319.50	93.97	224.55	86.87	340.99	115.18	252.49	43.79	383.75	224.55
Fósforo (mg/L)	2.13	1.21	0.55	0.21	0.94	1.11	0.96	0.67	1.60	1.01	0.90	0.72	2.13	0.55
Amoníaco (mg/L)	5.58	5.06	0.39	0.37	6.20	3.80	2.87	2.21	4.53	3.93	3.26	3.31	6.20	0.39
DQO (mg/L)	143.25	55.33	93.25	10.11	167.25	73.79	107.50	50.39	188.00	98.12	91.00	14.49	188.00	91.00
Coliformes totales (NMP/100 ml)	$3.31 \cdot 10^7$	$4.21 \cdot 10^7$	$1.22 \cdot 10^6$	$7.66 \cdot 10^5$	$1.09 \cdot 10^7$	$3.4 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^5$	$5.9 \cdot 10^5$	$1.3 \cdot 10^7$	$9.19 \cdot 10^6$	$6.35 \cdot 10^5$	$3.29 \cdot 10^5$	$3.31 \cdot 10^7$	$6.35 \cdot 10^5$
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	$2.09 \cdot 10^7$	$2.43 \cdot 10^7$	$7.76 \cdot 10^5$	$6.56 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^6$	$4.9 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$	$9.5 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^7$	$7.75 \cdot 10^6$	$5.55 \cdot 10^5$	$4.24 \cdot 10^5$	$2.09 \cdot 10^7$	$3.03 \cdot 10^5$

Fuente: Elaboración propia.

Se presenta una visión general del comportamiento de los parámetros analizados en los tres humedales, considerando tanto las condiciones de entrada como de salida. A grandes rasgos, se observa una reducción en la mayoría de las concentraciones, lo que sugiere un efecto positivo del sistema en la mejora de la calidad del agua. Sin embargo, esta disminución no es uniforme entre parámetros ni entre humedales, evidenciando variaciones asociadas a las condiciones operativas de cada unidad. A su vez, los valores máximos y mínimos, obtenidos del total de muestras (entradas y salidas de los tres humedales), permiten dimensionar la amplitud de las concentraciones registradas. A partir de esta visión general, en los siguientes apartados se analiza de manera específica el comportamiento de cada grupo de parámetros.

### 3.2.1. Sólidos Totales, Sólidos totales disueltos y Sólidos suspendidos

Los niveles de eficiencia alcanzados en la remoción de estos sólidos para cada humedal se visualizan en la Figura 9.



**Figura 9.** Gráfica de la eficiencia de remoción de ST, STD y SS.

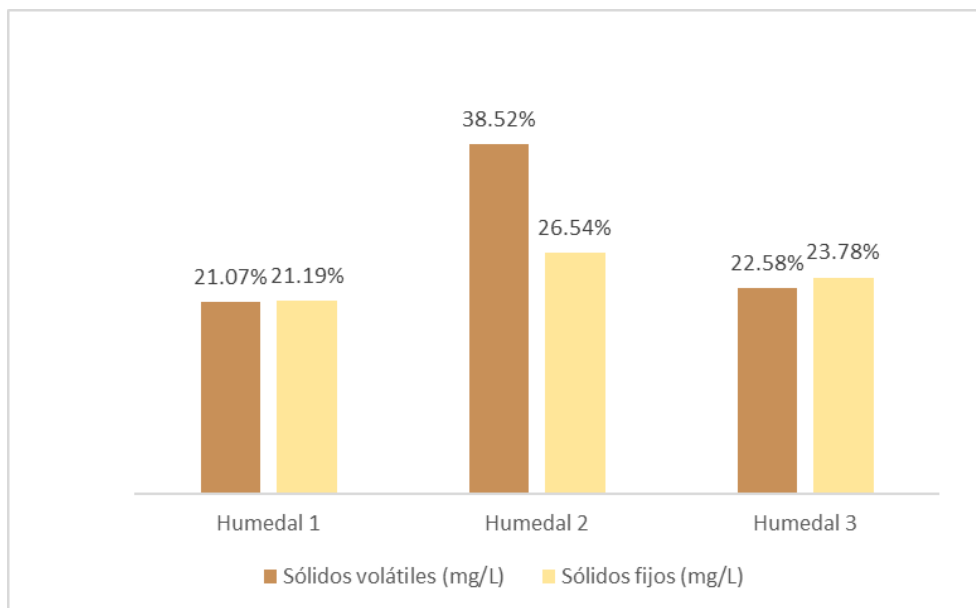
Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de remoción de sólidos totales, sólidos totales disueltos y sólidos suspendidos en los tres humedales mostró variaciones, como se observa en la Figura 9. Para ST, las eficiencias oscilaron entre 21.91% y 31.01%, mientras que para STD se registraron valores entre 22.76% y 28.46%. Y en el caso de los SS se observaron las mayores remociones, con valores entre 11.92% y 35.89%, lo que confirma un mejor desempeño en la retención de partículas. Este comportamiento se explica por procesos de sedimentación y filtración en el sustrato y la vegetación, mientras que los sólidos disueltos presentan menores eficiencias debido a su naturaleza y a la necesidad de procesos adicionales como adsorción y

transformación biológica (Nava-Rojas et al., 2023). Al comparar con Javed et al. (2024), quienes reportan 47.22% para ST, 32.6% para STD y hasta 79.16% para SS, se evidencia que los valores obtenidos son inferiores, lo cual puede deberse, a que el monitoreo se realizó durante la fase inicial de operación de los humedales, cuando el biofilm aún no se ha desarrollado completamente en el medio filtrante, limitando los procesos de degradación biológica. En conjunto, los resultados reflejan un desempeño prometedor para la etapa de arranque, con remociones moderadas de ST y STD, y una mayor efectividad en la retención de sólidos en suspensión bajo las condiciones evaluadas.

### 3.2.2. Sólidos volátiles y sólidos fijos

Los niveles de eficiencia alcanzados en la remoción de estos sólidos para cada humedal se visualizan en la Figura 10.



**Figura 10.** Gráfica de la eficiencia de remoción de SV y SF.

Fuente: Elaboración propia.

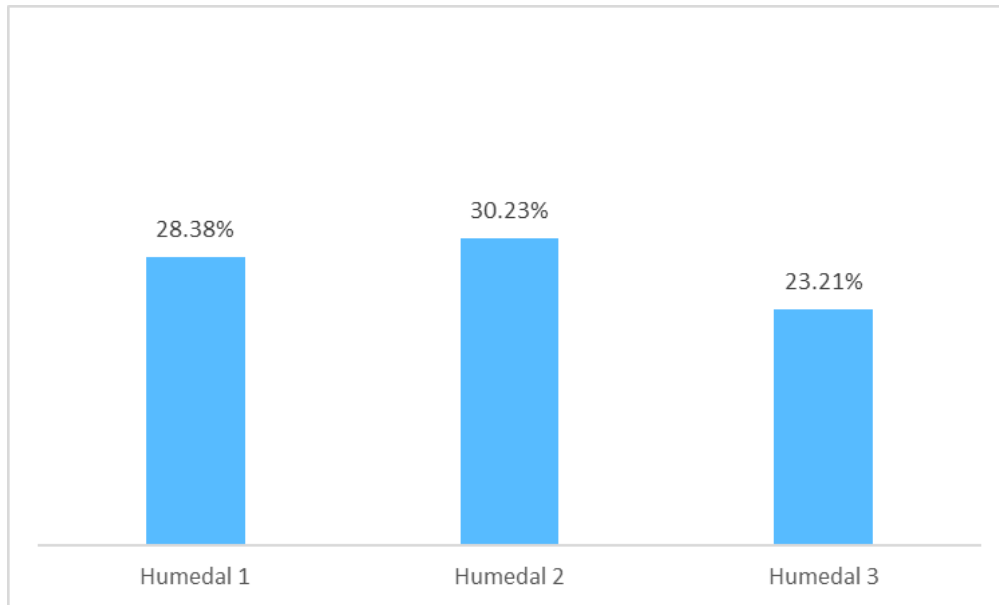
La eficiencia de remoción de sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) presentó ciertas variaciones, como se observa en la figura 10. Para los sólidos volátiles, las eficiencias registradas fueron de 21.07% en el humedal 1, 38.52% en el humedal 2 y 22.58% en el humedal 3, reflejando un mayor desempeño en el humedal 2. En cuanto a los sólidos fijos, se obtuvieron valores de 21.19%, 26.54% y 23.78% para los humedales 1, 2 y 3, respectivamente, mostrando un comportamiento más uniforme entre los sistemas evaluados, sin embargo, el humedal 2 siendo igualmente el más eficiente.

En estudios realizados de humedales construidos, los SV y SF no suelen mencionarse de manera directa, pues, se analizan de manera indirecta dentro de otros parámetros, como materia orgánica o sólidos totales. La fracción volátil se asocia a la materia orgánica presente en el sistema, mientras que la fracción fija representa los sólidos inertes. Las eficiencias moderadas observadas pueden relacionarse con la fase

inicial de la operación de los humedales, debido a que la biomasa microbiana aún no ha alcanzado su pleno desarrollo, limitando su respectiva degradación de estos parámetros.

### 3.2.3. Conductividad

En la Figura 11 se observa la capacidad de remoción de la conductividad alcanzada por los distintos humedales evaluados.



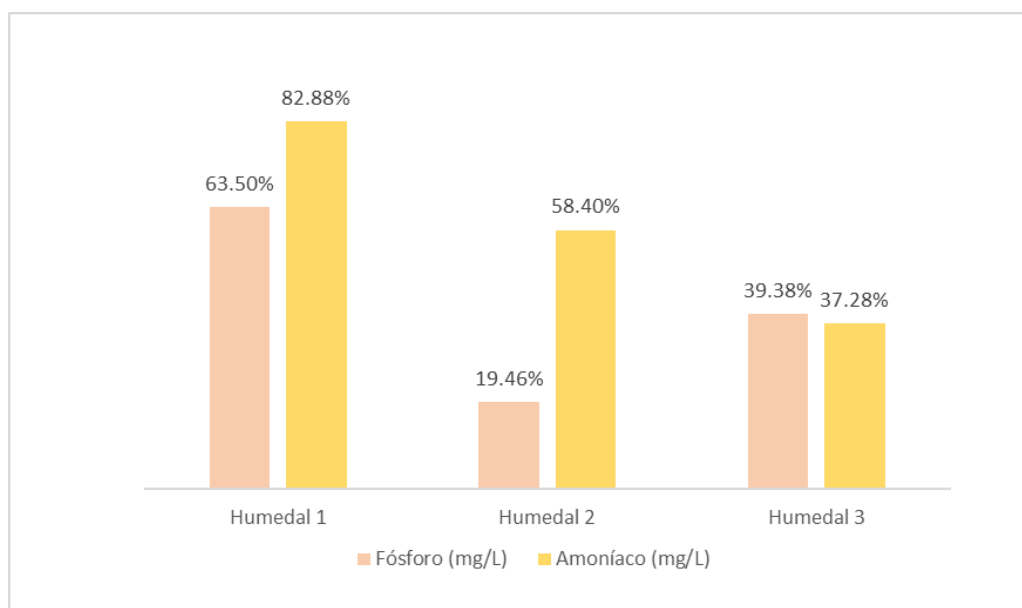
**Figura 11.** Gráfica de la eficiencia de remoción de la conductividad.

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de remoción de la conductividad en los humedales evaluados, como se observa en la Figura 11, fue de 28.38% en el Humedal 1, 30.23% en el Humedal 2 y 23.21% en el Humedal 3, evidenciando un comportamiento relativamente homogéneo con una ligera mayor eficiencia en el segundo humedal. Estas remociones moderadas se asocian a procesos como adsorción en el sustrato, intercambio iónico y asimilación por la vegetación; sin embargo, al estar vinculada a iones disueltos, la conductividad presenta menores eficiencias frente a parámetros particulados (Nava-Rojas et al., 2023). Las condiciones de pH registradas entre los tres humedales oscilan entre los 6.6 a los 7.8 y se demuestran que estos datos se mantienen cercanos a la neutralidad, favoreciendo la estabilidad de los procesos de remoción. En comparación con lo reportado por Javed et al. (2024), las variaciones observadas pueden relacionarse a diferencias en el tiempo de retención hidráulica y la configuración del sistema. Por lo tanto, los resultados evidencian una capacidad limitada pero consistente para la reducción de la conductividad bajo las condiciones analizadas.

### 3.2.4. Fósforo y Amoníaco

Los niveles de eficiencia alcanzados en la remoción de los nutrientes para cada humedal se visualizan en la Figura 12.



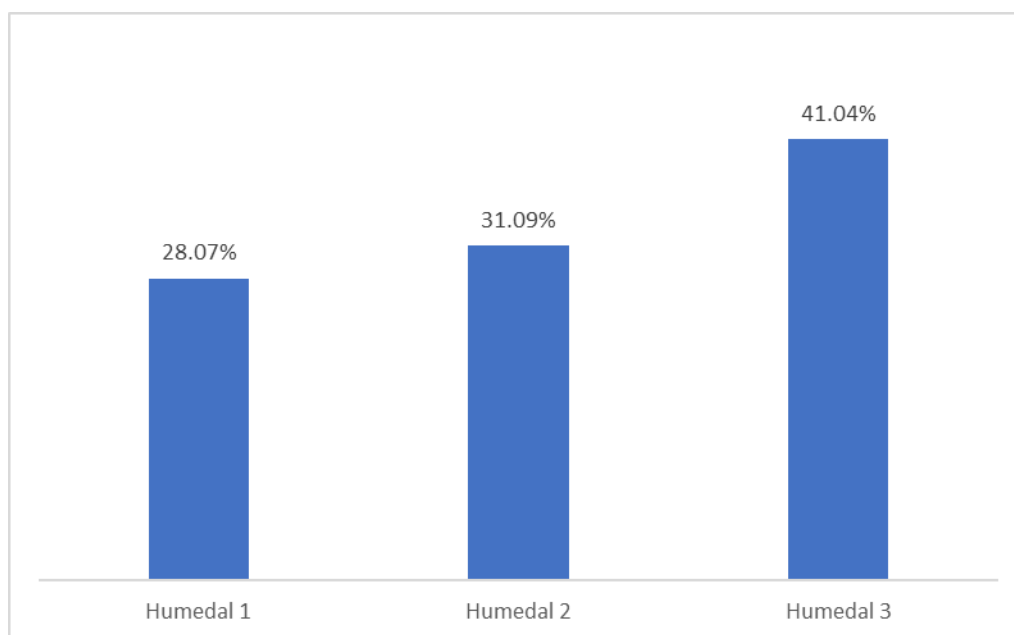
**Figura 12.** Gráfica de la eficiencia de remoción de Fósforo/Amoníaco.

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de remoción de fósforo presentada en la Figura 12 muestra variaciones entre los tres humedales evaluados. El humedal 1 presenta la mayor eficiencia de remoción, con un valor de 63.50%, lo que representa un contraste significativo con el humedal 2, que presenta una eficiencia de 19.46%. Por su parte, el humedal 3 evidenció una mejora intermedia, alcanzando un 39.38%. Estos resultados reflejan la variabilidad en la remoción de fósforo dentro de los sistemas evaluados. Estudios como el de Vymazal (2010) indican que la eliminación de fósforo en humedales construidos suele ser altamente variable y dependiente del tipo de sustrato, con eficiencias que oscilan entre 34% y 56%. Esto se debe a que, en general, los humedales no se diseñan con el fósforo como objetivo principal de tratamiento, y los materiales comúnmente utilizados como parte del sustrato, grava lavada o roca triturada, presentan una limitada capacidad de adsorción y precipitación, parte importante para la remoción de fósforo. Por otro lado, para el amoníaco se obtuvieron valores de 82.88% en el humedal 1, 58.40% en el humedal 2 y 37.28% en el humedal 3, mostrando una disminución progresiva en la eficiencia entre los humedales evaluados. Lo que concuerda con el mismo estudio de Vymazal (2010) donde el humedal de flujo vertical alcanza la mayor remoción con un 73% debido a que los humedales de flujo vertical son mucho más aerobios, por lo que proporcionan condiciones adecuadas para la nitrificación, aunque aún existe una carencia en la desnitrificación, lo que restringe la eliminación completa del nitrógeno.

### 3.2.5. DQO

Los niveles de eficiencia alcanzados en la remoción de la carga orgánica para cada humedal se visualizan en la Figura 13.



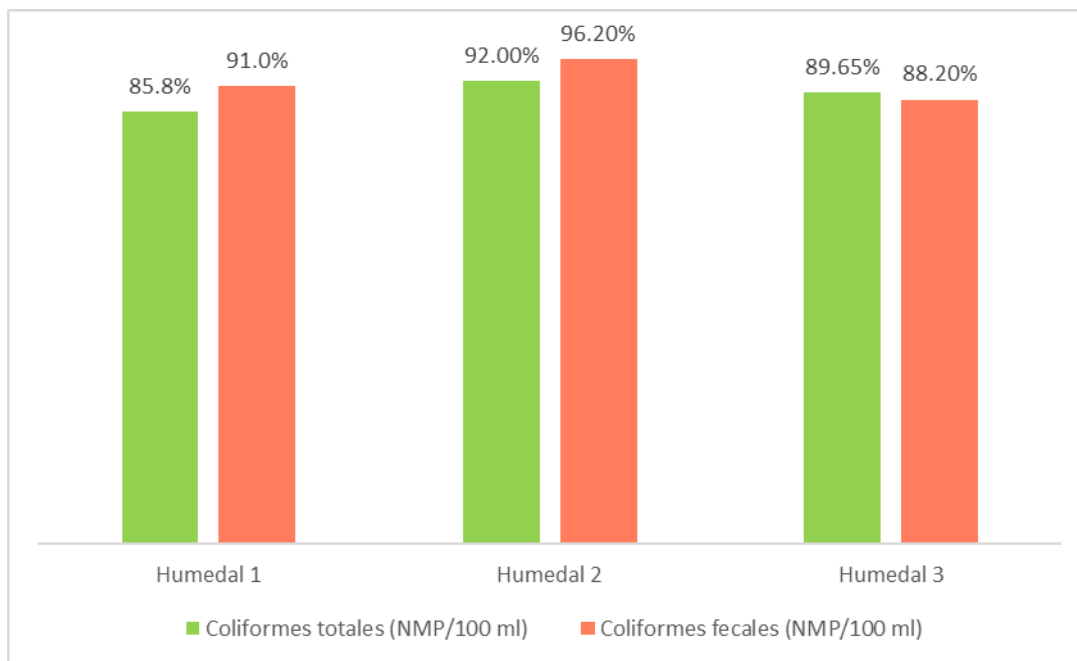
**Figura 13.** Gráfica de la eficiencia de remoción de DQO.

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de remoción de DQO en los humedales 1, 2 y 3 fue de 28.07%, 31.09% y 41.04% respectivamente como se observa en la Figura 13, evidenciando mayor rendimiento en el último humedal. Estos valores moderados se explican por la acción conjunta de procesos como sedimentación de materia orgánica, filtración en el medio y biodegradación microbiana, debido a la interacción entre el agua, la vegetación y el medio filtrante. La eficiencia de este parámetro depende de factores como el tiempo de retención hidráulica, la carga orgánica y las condiciones operativas del sistema (Nava-Rojas et al., 2023). A su vez, la variabilidad entre los humedales sugiere una relación directa de las condiciones hidráulicas y del grado de contacto entre el agua residual y el medio filtrante. En comparación, Javed et al. (2024) reportaron un valor de 69.01% de remoción, lo que sugiere diferencias en la configuración y operación del sistema. En conjunto, los resultados indican una eficiencia moderada en la remoción de DQO, asociada a la fase de puesta de marcha del sistema, donde la biomasa microbiana aún se encuentra en proceso de estabilización.

### 3.2.6. Coliformes fecales y Coliformes totales

Los niveles de eficiencia alcanzados en la remoción de los parámetros microbiológicos para cada humedal se visualizan en la Figura 14.



**Figura 14.** Gráfica de la eficiencia de remoción de Coliformes.

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de remoción de coliformes totales y coliformes fecales en los tres humedales presentó valores elevados, como se nos presenta en la Figura 14. Para los coliformes totales, se registraron eficiencias de 85.8% en el humedal 1, 92% en el humedal 2 y 89.65% en el humedal 3, mientras que para los coliformes fecales se obtuvieron valores de 91%, 96.2% y 88.2% respectivamente. En general, se observa un alto desempeño del sistema en la remoción de microorganismos indicadores; no obstante, los porcentajes obtenidos representan una reducción de dos unidades logarítmicas aproximadamente, lo cual no es suficiente para alcanzar concentraciones que cumplan con la normativa de descarga a un cuerpo de agua dulce, evidenciando la necesidad de una etapa adicional de desinfección. Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura como el de Vymazal (2010) que señala que estos sistemas pueden alcanzar reducciones significativas de microorganismos patógenos mediante procesos de filtración, sedimentación y acción biológica, aunque difícilmente logran por sí solos la eliminación necesaria para el cumplimiento normativo vigente enfocado a la descarga hacia un cuerpo de agua dulce.

### 3.3. Comparación con estándares de calidad ambiental nacionales

Para sentar un criterio comparativo, la Tabla 5 recopila los límites máximos permisibles definidos por la normativa ecuatoriana dada por la TULSMA en el libro VI: Calidad ambiental en el Anexo 1 para descargas a un cuerpo de agua dulce, los cuales sirven como base para valorar el desempeño de los humedales en cuanto a la calidad del efluente.

**Tabla 5.** Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce de la TULSMA.

<b>Parámetros</b>	<b>Expresado como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	2 000
Color real <sup>1</sup>	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO <sub>5</sub>	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10,0
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Material flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	50,0
Compuestos Organoclorados	Organoclorados	mg/l	0,05
Organoclorados	totales		
Compuestos Organofosforados	Organofosforados	mg/l	0,1
Organofosforados	totales		

Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1 600
Sulfatos	SO <sub>4</sub> < 2	mg/l	1 000
Sulfuros	< 2 S	mg/l	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ± 3
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0

<sup>1</sup> La apreciación del color se estima sobre 10 cm de muestra diluida

Fuente: Ministerio del Ambiente (2015).

Adicionalmente, en la Tabla 6 se presenta la comparativa de los valores obtenidos en el efluente de cada humedal frente a los límites establecidos por las normativas vigentes ecuatorianas y chilenas.

**Tabla 6.** Comparación de resultados de los parámetros con distintas normativas.

Parámetros	Humedal	Valor efluente	Norma TULSMA	Norma Chilena
Coliformes fecales	1	<b>776 250</b>	2 000	1 000
	2	<b>302 500</b>		
	3	<b>555 000</b>		
DQO	1	93.25	200	No regulado
	2	107.5		
	3	91		
Fósforo Total	1	0.55	10	15
	2	0.96		
	3	0.90		
	1	0.32	30	

Nitrógeno	2	2.36		No directamente comparable con el NTK
Amoniacal	3	2.68		
Sólidos	1	<b>201.42</b>	130	300
Suspendidos	2	<b>160.58</b>		
Totales	3	<b>155.33</b>		
Sólidos Totales	1	335	1 600	No regulado
	2	280.5		
	3	282.75		
pH	1	6.6-7.8	6 a 9	6 a 8.5
	2	6.7-7.3		
	3	6.6-7		

Fuente: Elaboración propia con base en TULSMA (Libro VI, Anexo 1) y norma chilena D.S.N°90.

Por lo tanto, como se evidencia en la Tabla 6 se contrastan los valores del efluente con los límites máximos permisibles establecidos en la TULSMA (Ministerio del Ambiente, 2015), específicamente en la tabla 9 del anexo 1 que corresponde a descargas a cuerpos de agua dulce, y con la normativa chilena (Rodríguez, 2021), utilizando la tabla n°2, seleccionada por representar condiciones de descarga en cuerpos de agua con capacidad de dilución. Este enfoque permite realizar una evaluación comparativa coherente y sustentada del desempeño del sistema de tratamiento.

Los resultados muestran un cumplimiento parcial según el tipo de parámetro. La DQO, el fósforo total, el nitrógeno amoniacal, los sólidos totales y el pH se mantienen dentro de los límites permisibles de la normativa ecuatoriana en los tres humedales, confirmando que los procesos de degradación orgánica y remoción de nutrientes están activos y funcionales. Sin embargo, los coliformes fecales superan el límite de 2 000 NMP/100 mL en ambas normativas, y los sólidos suspendidos totales exceden el límite TULSMA de 130 mg/L, aunque se mantienen dentro del límite de la norma chilena de 300 mg/L, evidenciando diferencias en el nivel de exigencias entre marcos regulatorios.

Los incumplimientos registrados deben interpretarse considerando que el sistema se encontraba en fase de estabilización biológica e hidráulica durante el periodo de monitoreo, condición que limita el desempeño respecto a su capacidad en régimen estable. Kadlec & Wallace (2009) señalan que los humedales construidos requieren periodos de maduración de la biopelícula microbiana para alcanzar su eficiencia máxima, y que la remoción de los sólidos y microorganismos mejora progresivamente conforme el medio filtrante consolida su estructura biológica. Es importante reconocer que en contextos rurales de baja densidad poblacional también pueden presentarse superaciones puntuales de ciertos parámetros de descarga, dado que las condiciones de operación y monitoreo son menos controladas que una estación experimental. Aunque los parámetros de mayor relevancia para la carga orgánica ya

cumplen la normativa desde esta etapa inicial, lo que confirma que los mecanismos de tratamiento funcionan correctamente. A su vez, los incumplimientos en coliformes fecales y sólidos suspendidos totales son susceptibles de mejora mediante ajustes operativos en el régimen hidráulico y la adición de elementos complementarios como una etapa de desinfección, lo que permitiría alcanzar los límites permisibles establecidos por la normativa vigente para la descarga a un cuerpo de agua dulce y así evitar generar un impacto negativo hacia el medioambiente.

## **CAPÍTULO 4: Viabilidad del sistema**

En el contexto del saneamiento en zonas rurales y periurbanas, la evaluación de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales requiere considerar aspectos técnicos, institucionales, económicos y ambientales, especialmente frente a las limitaciones que presentan los sistemas centralizados convencionales. En este sentido, los humedales construidos representan una alternativa de interés debido a su menor complejidad operativa y su potencial de adaptación a diferentes contextos locales. A partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, el presente capítulo analiza la viabilidad del sistema experimental evaluado, considerando tanto el comportamiento hidráulico y la remoción de contaminantes observada, como las limitaciones identificadas durante su operación bajo condiciones controladas. De igual manera, es fundamental comprender que el sistema se encontraba en una etapa inicial de funcionamiento; por lo tanto, aún no se había desarrollado completamente la biopelícula microbiana ni la capa de lodo superficial que caracteriza a los humedales construidos de tipo francés, la cual influye directamente en la retención de sólidos, la distribución hidráulica y las eficiencias de remoción (Molle, 2014).

### **4.1. Viabilidad técnica e institucional del sistema**

A partir de un enfoque técnico, la viabilidad del sistema se sustenta en el desempeño observado en los humedales construidos, los cuales han demostrado una adecuada remoción de contaminantes en parámetros como DQO, nutrientes y sólidos totales, evidenciando su funcionamiento bajo condiciones reales de operación. Si bien se identifican limitaciones en la remoción de coliformes fecales y sólidos suspendidos, estos aspectos pueden optimizarse mediante ajustes en el régimen hidráulico o la incorporación de etapas complementarias de tratamiento. En este contexto, los humedales construidos, como sistemas basados en la naturaleza (SbN), representan una alternativa viable para el tratamiento descentralizado de aguas residuales debido a su bajo requerimiento energético, facilidad operativa y capacidad de adaptación a zonas rurales y periurbanas (Javed et al., 2024). Además, diversos estudios señalan que este tipo de tecnología presenta bajos costos de operación y mantenimiento, junto con una adecuada eficiencia en la remoción de contaminantes.

Por otra parte, desde el enfoque institucional, la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales y periurbanas de Cuenca responde a un proceso ya establecido, en el que participan la comunidad, las juntas parroquiales, los gobiernos autónomos descentralizados y la empresa pública ETAPA EP. En este contexto, las soluciones implementadas corresponden principalmente a fosas sépticas y filtros anaerobios, tecnologías ampliamente utilizadas en sistemas descentralizados en zonas rurales de Cuenca (González & Narváez, 2018; ver Anexo F). No obstante, los humedales construidos podrían representar una alternativa complementaria para el tratamiento descentralizado de aguas residuales, debido a su menor dependencia electromecánica y potencial para contribuir a la reducción de cargas contaminantes antes de la descarga hacia cuerpos de agua dulce.

#### 4.2. Viabilidad económica del sistema

El análisis de costos de los sistemas de tratamiento se analizó mediante un escenario de prefactibilidad para una población de 100 habitantes. Para ello, se compararon un sistema de fosa séptica con filtro anaerobio (F.S + F.A) y un humedal construido (H.C) considerando los distintos indicadores económicos presentes, cuyos resultados se observan en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Comparación referencial de indicadores económicos entre sistemas de tratamiento descentralizado.

<b>Indicador</b>	<b>Unidades</b>	<b>F. S + F.A</b>	<b>H.C</b>
CAPEX total	USD	<b>9 658</b>	<b>10 316</b>
CAPEX por habitante	USD/hab	96.58	103.16
OPEX anual	USD/año	<b>386</b>	<b>206</b>
Costo total 10 años	USD	13 521	12 379
Costo por m <sup>3</sup> tratado	USD/m <sup>3</sup>	0.36	0.33
Costo anual por habitante	USD/hab·año	13.52	12.38
Tiempo de implementación	mes	5	3
Requerimiento energético		Bajo–moderado	Bajo
Operación gravitacional		Factible	Predominante
Dependencia electromecánica		Media	Baja

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7 demuestra que el humedal construido presenta mayores costos de inversión y menores costos de operación con respecto al sistema convencional. Primero, el CAPEX se calculó mediante el factor de Lang, el cual permite aproximar el costo total mediante una estimación de costos directos (materiales y excavaciones) e indirectos (mano de obra, implementación, transporte, etc.) (ver Anexo G), variando según el grado de complejidad del sistema aplicado (Peters et al., 2004). Por ende, se utilizó una estimación del factor de Lang de 4 para sistemas convencionales debido a sus mayores requerimientos constructivos, operativos y electromecánicos, y de 2 para sistemas basados en la naturaleza por disponer un menor requerimiento constructivo para su implementación. En resumen, el sistema convencional presentó un CAPEX de 9658 USD y un OPEX de 386 USD/año, en cambio el humedal alcanzó valores de 10316 USD y 206 USD/año, respectivamente. Y mediante una estimación de diez años, los costos totales proyectados para los sistemas convencionales y no convencionales fueron de 13521 USD y 12379 USD respectivamente.

A partir de estos resultados, se evidenció que ambas alternativas se encuentran dentro del rango referencial aproximado de inversión establecido por ETAPA EP (150-300 USD/hab), lo que sugiere condiciones favorables de prefactibilidad para su implementación. Por esta razón, los humedales

construidos presentan ventajas asociadas a menores costos operativos y menores costos acumulados proyectados a diez años, además de un menor requerimiento energético, un funcionamiento predominantemente gravitacional y menores requerimientos constructivos para su implementación, aspectos favorables para sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Sin embargo, el sistema convencional continúa presentando ventajas relacionadas con una menor inversión inicial, por lo que la selección de la alternativa más adecuada dependerá de las condiciones técnicas, operativas y económicas de cada sector evaluado.

Un aspecto importante que debe considerarse es que, en este análisis, no se ha incluido el tratamiento adicional de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. En el caso del sistema compuesto por FS+FA, los lodos acumulados en la fosa séptica deben retirarse periódicamente y someterse posteriormente a un tratamiento adecuado, como lechos de secado (una alternativa viable para zonas rurales). Esto implica requerimientos adicionales tanto de inversión como de operación y mantenimiento asociados al manejo de lodos. En contraste, los humedales construidos de tipo francés integran el tratamiento del agua residual y de los lodos en una misma unidad, permitiendo la acumulación y estabilización de estos últimos dentro del sistema. Según Molle (2014), la extracción de lodos en este tipo de humedales se realiza generalmente después de 10 a 15 años de funcionamiento, por lo que no es necesario construir unidades adicionales específicas para el tratamiento de lodos.

#### 4.3. Viabilidad ambiental del sistema

Se realizó una evaluación comparativa ambiental entre el humedal construido (HC) y el sistema convencional FS + FA, considerando parámetros relacionados con el desempeño ambiental y criterios técnicos de operación identificados durante el análisis de estos sistemas presentado en el componente 4.2, como se observa en la Tabla 8. Los resultados del desempeño del sistema convencional FS+FA fueron tomados del trabajo de González y Narváez (2018) de la planta rural de la comunidad de Acchayacu. Se empleó una escala cualitativa de valoración aplicada a cada uno de los parámetros evaluados, definida de la siguiente manera:

1. Óptimo: Supera los estándares o expectativas establecidas.
2. Eficiente: Cumplimiento de los estándares y de la normativa.
3. Aceptable: Presenta un desempeño adecuado, pero tiene ciertas limitaciones.
4. Deficiente: No cumple con los estándares establecidos.

**Tabla 8.** Valoración comparativa de viabilidad ambiental entre HC Y FS+FA

Parámetro Ambiental	HC	FS+FA	Justificación
Remoción de DQO	Eficiente	Aceptable	El HC presentó mayor degradación biológica y

			filtración de materia orgánica.
Remoción de nutrientes	Eficiente	Aceptable	El HC favorece la retención y absorción de nutrientes por medio del sustrato y vegetación.
Tratamiento microbiológico	Aceptable	Aceptable	Ambos sistemas presentaron limitaciones respecto al cumplimiento normativo.
Remoción de SST	Aceptable	Aceptable	Ambos sistemas presentaron remoción de SST, aunque con limitaciones en el cumplimiento normativo.
Gasto energético	Óptimo	Eficiente	El HC opera principalmente mediante procesos naturales y por flujo de gravedad.
Generación de residuos	Óptimo	Aceptable	El HC genera menor acumulación de lodos residuales.
Integración y adaptabilidad rural	Óptima	Aceptable	El HC presenta mayor compatibilidad con zonas rurales.
Facilidad operación y mantenimiento	Eficiente	Aceptable	El HC requiere menor complejidad técnica y de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del presente estudio y antecedentes técnicos de PTAR rural reportado por González y Narváez (2018).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La calibración hidráulica realizada en los vertederos triangulares permitió obtener relaciones confiables entre la carga hidráulica y el caudal, reflejadas en coeficientes de determinación elevados, lo que evidenció estabilidad en el comportamiento hidráulico del sistema. Asimismo, los humedales construidos de flujo vertical de tipo francés presentaron un desempeño favorable en la remoción de DQO y nutrientes, asociado a la interacción de procesos fisicoquímicos y biológicos desarrollados en el medio filtrante. Aunque el sistema logró disminuir parcialmente los sólidos suspendidos y la carga microbiológica, algunos parámetros aún presentaron limitaciones respecto al cumplimiento de los estándares normativos evaluados bajo las condiciones operativas del estudio.

Desde el enfoque técnico, ambiental y económico, los humedales construidos tipo francés demostraron ser una alternativa adecuada para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en zonas rurales y periurbanas del cantón Cuenca. Su funcionamiento principalmente gravitacional, el bajo requerimiento energético, la generación mínima de lodos y los reducidos requerimientos operativos favorecen su implementación como una solución basada en la naturaleza con potencial de integración al entorno local. Por lo tanto, el sistema evaluado presenta ventajas operativas, ambientales y territoriales que respaldan su aplicación en contextos con limitaciones técnicas y económicas, especialmente en esquemas descentralizados de saneamiento.

Se recomienda fortalecer los procedimientos de monitoreo y control experimental mediante calibraciones periódicas de los vertederos, mediciones más precisas de caudal y una mayor estandarización en los procesos de toma, preservación y análisis de muestras, con el propósito de reducir posibles errores experimentales y mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Asimismo, resulta conveniente reforzar los controles analíticos de laboratorio para disminuir variaciones asociadas al procesamiento y manejo de muestras.

De igual manera, se recomienda continuar con investigaciones enfocadas a optimizar la remoción microbiológica y de sólidos suspendidos mediante configuraciones complementarias de tratamiento y mayores periodos de evaluación operacional. Resulta necesario desarrollar estudios comparativos bajo condiciones experimentales equivalentes y evaluar el desempeño de estos sistemas en condiciones rurales reales y con menores niveles de control técnico, a fin de validar su aplicabilidad como alternativas descentralizadas sostenibles para el saneamiento de aguas residuales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arévalo-Durazno, M. B., García Zumalacarregui, J. A., Ho, L., Narváez, A., & Alvarado, A. (2023). Performance of modified first-stage French vertical flow constructed wetlands under extreme operational conditions. *Water Science & Technology*, 88(1), 220–232. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.201>
- Abbassi, B. E., Abuharb, R., Ammary, B., Almanaseer, N., & Kinsley, C. (2018). Modified septic tank: Innovative onsite wastewater treatment system. *Water*, 10(5), 578. <https://doi.org/10.3390/w10050578>
- Arias, C. A., & Brix, H. (2003). *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13(1), 17–24. <https://doi.org/10.18359/rcin.1321>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (Eds.). (2016). Nature-based solutions to address global societal challenges. IUCN International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Dávila M., & López, E. (2020). *Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas mediante Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Vertical utilizando diferentes Plantas Emergentes. Universidad del Azuay*, 17. <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10121/1/15751.pdf>
- Davis, L. (1995). *A handbook of constructed wetlands: A guide to creating wetlands for agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, and stormwater in the Mid-Atlantic Region* (Vol. 1: General considerations). U.S. Government Printing Office.
- EPA. (2002). *Method 1604: Total Coliforms and Escherichia coli in Water by Membrane Filtration Using a Simultaneous Detection Technique (MI Medium)*.
- González, C. R., & Narváez, A. C. (2018). Evaluación y rediseño de la planta de tratamiento de aguas residuales Acchayacu, parroquia Tarqui, del cantón Cuenca, Ecuador.
- International Organization for Standardization. (2017). *Hydrometry—Open channel flow measurement using thin-plate weirs* (ISO 1438:2017). International Organization for Standardization. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66463/d1ff677166724f3bbe79a18f389c9e22/ISO-1438-2017.pdf>
- Javed, F., Fazakat, S., Hashmi, I., & Gabriel, H. (2024). Treatment Efficiency of Integrated Constructed Wetland for Domestic Wastewater. *NUST Journal of Engineering Sciences*, 17(1), 39-48. <https://doi.org/10.24949/njes.v17i1.741>

- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands (2nd ed.)*. CRC Press.  
[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition\\_0.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf)
- Lipps, W. C., Braun-Howland, E. B., & Baxter, T. E. (Eds.). (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (24th ed.)*. APHA Press.
- Ministerio del Ambiente. (04 de noviembre de 2015). *TULSMA, LIBRO VI Calidad ambiental*.  
 Obtenido de [https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento\\_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015\\_0.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015_0.pdf)
- Molle, P., Lienard, A., Boutin, C., Merlin, G., & Iwema, A. (2005). How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research.*, 51, 11-21.  
 10.2166/wst.2005.0277
- Molle, P. (2014). French vertical flow constructed wetlands: A need of a better understanding of the role of the deposit layer. *Water Science and Technology*, 69(1), 106-112.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2013.561>
- Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. D. R., & Reyes-Velázquez, C. (2023). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 41.  
<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., West, R. E., & West, R. E. (2004). *Plant design and economics for chemical engineers (5. ed, international ed. 2004)*. McGraw-Hill.
- Rodríguez, J. J. L. (2021). *DIARIO OFICIAL DE LA REPUBLICA DE CHILE*.  
<https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2021/01/30/42868/01/1888846.pdf#:~:text=TABLA%20No%201.%20L%C3%8DMITES%20M%C3%81XIMOS%20PERMITIDOS%20PARA,de%20diluci%C3%B3n%20del%20cuerpo%20de%20agua%20receptor%2C>
- Santos, J., Rodríguez, S., Magalhães, M., Rodríguez, K., Pereira, L., & Marinho, G. (2024). A state-of-the-art review (2019–2023) on constructed wetlands for greywater treatment and reuse. *Environmental Challenges*, 16, 100973. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100973>
- Suaza, A. (2016). *Análisis del desempeño y operación de humedales construidos de flujo subsuperficial vertical para tratamiento de agua residual doméstica en países tropicales*. Universidad Católica de Manizales. <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/1326>

Torres, N. A. N., & Vanegas, P. E. T. (2022). *COMPORTAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES VERTICALES EN CUENCA- ECUADOR EN TÉRMINOS DE OXÍGENO DISUELTO Y pH*.

U.S. Bureau of Reclamation. (2001). *Water measurement manual (3rd ed.)*.  
<https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/index.htm>

Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2016). *Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: Reflexiones. Tecnología y Ciencias del Agua*.

## ANEXOS

### Anexo A. Calendario de Toma de Muestras

Humedal	1ª Muestra	2ª Muestra	3ª Muestra	4ª Muestra
<b>Humedal 1 (H1)</b>	Lunes 12 Ene	Viernes 23 Ene	Miércoles 4 Feb	Miércoles 11 Feb y Jueves 19 Feb*
<b>Humedal 2 (H2)</b>	Jueves 15 Ene	Lunes 26 Ene	Jueves 5 Feb	Lunes 23 Feb
<b>Humedal 3 (H3)</b>	Martes 20 Ene	Jueves 22 Ene	Viernes 30 Ene	Martes 10 de Feb

\*19 febrero es microbiología y el 11 febrero química. Por cuestiones del Feriado nacional

**Anexo B.** Hojas de campo de las muestras

AFLUENTE DEL HUMEDAL 1						
Fecha	Clima	Condición del lugar	Olor	Color	Turbidez	Observaciones
12/01/2026	Nublado, llovizna	Normal	Normal	Gris ligeramente opaco	Poco	No hay
23/01/2026	Soleado, nublado	Normal	Poco fuerte	Grisáceo	Medio	No hay
04/02/2026	Soleado	Normal	Poco fuerte	Grisáceo	Medio	No hay
11/02/2026	Soleado	Normal	Poco fuerte	Grisáceo oscuro	Medio	No hay

EFLUENTE DEL HUMEDAL 1						
Fecha	Clima	Condición del lugar	Olor	Color	Turbidez	Observaciones
12/01/2026	Nublado, llovizna	Normal	Normal	Amarillento	Poca	No hay
23/01/2026	Soleado, nublado	Normal	Inodoro	Amarillento	Poca	No hay
04/02/2026	Soleado	Normal	Inodoro	Casi incoloro	Nada	No hay
11/02/2026	Soleado	Normal	Inodoro	Amarillo tenue	Nula	No hay

AFLUENTE DEL HUMEDAL 2						
Fecha	Clima	Condición del lugar	Olor	Color	Turbidez	Observaciones
15/01/2026	Nublado	Normal	Poco fuerte	Ligeramente opaco	Medio	No hay
26/01/2026	Nublado	Normal	Fuerte	Ligeramente opaco	Medio	No hay
05/02/2026	Nublado	Normal	Poco fuerte	Grisáceo	Medio	No hay
23/02/2026	Soleado	Normal	Poco fuerte	Gris oscuro	Medio	No hay

EFLUENTE DEL HUMEDAL 2						
Fecha	Clima	Condición del lugar	Olor	Color	Turbidez	Observaciones
15/01/2026	Nublado	Normal	Normal	Amarillo tenue	Poco	No hay
26/01/2026	Nublado	Normal	Normal	Amarillo tenue	Poco	No hay
05/02/2026	Nublado	Normal	Inodoro	Amarillo tenue	Poca	No hay
23/02/2026	Soleado	Normal	Inodoro	Gris tenue	Poca	No hay

AFLUENTE DEL HUMEDAL 3						
Fecha	Clima	Condición del lugar	Olor	Color	Turbidez	Observaciones
20/01/2026	Despejado	Normal	Tolerable (Poco fuerte)	Ligeramente opaco	Poco	No hay
22/01/2026	Nublado	Normal	Fuerte	Opaco	Alto	No hay
30/01/2026	Nublado	Normal	Poco fuerte	Grisáceo	Medio	No hay
10/02/2026	Nublado	Normal	Fuerte	Gris oscuro	Alto	No hay

EFLUENTE DEL HUMEDAL 3						
Fecha	Clima	Condición del lugar	Olor	Color	Turbidez	Observaciones
20/01/2026	Despejado	Normal	Normal	Amarillo tenue	Poco	No hay
22/01/2026	Nublado	Normal	Tolerable	Amarillo	Poco	No hay
30/01/2026	Nublado	Normal	Inodoro	Grisáceo	Poco	No hay
10/02/2026	Nublado	Normal	Tolerable	Amarillo tenue	Nula	No hay

## Anexo C. Cálculos de la curva de calibración

Humedal 1											
Volumen (mL)	Volumen m3	tiempo (s)	Qreal (m³/s)	HT (m)	H Ls (m)	Altura de Cresta	H (m)	Qcalibrado		H (m)	Qreal (m³/s)
890	0.00089	5	0.000178	0.221	0.10100	0.085	0.03500	0.000183		0.03500	0.000178
110	0.00011	5	0.000022	0.221	0.12100	0.085	0.01500	0.000022		0.01500	0.000022
980	0.00098	5	0.000196	0.221	0.10000	0.085	0.03600	0.000196		0.03600	0.000196
840	0.00084	5	0.000168	0.221	0.10200	0.085	0.03400	0.000170		0.03400	0.000168
										0.07050	0.001080
										0.06780	0.001000
										0.07870	0.001380
										0.08040	0.001480
Volumen (mL)	Volumen m3	tiempo (s)	Qreal (m³/s)	HT (m)	H Ls (m)	Altura de Cresta	H (m)	Qcalibrado			
1080	0.00108	1	0.00108	0.221	0.06550	0.085	0.07050	0.00107			
1000	0.001	1	0.00100	0.221	0.06820	0.085	0.06780	0.00097			
1380	0.00138	1	0.00138	0.221	0.05730	0.085	0.07870	0.00141		Cd real	0.614
1480	0.00148	1	0.00148	0.221	0.05560	0.085	0.08040	0.00148			

Humedal 2											
Volumen (mL)	Volumen m3	tiempo (s)	Qreal (m³/s)	HT (m)	H Ls (m)	Altura de Cresta	H (m)	Qcalculado		H (m)	Qreal (m³/s)
1040	0.00104	2	0.00052	0.226	0.0898	0.085	0.0512	0.00050		0.0512	0.00052
1080	0.00108	2	0.00054	0.226	0.0875	0.085	0.0535	0.00056		0.0535	0.00054
1120	0.00112	2	0.00056	0.226	0.0877	0.085	0.0533	0.00055		0.0533	0.00056
1100	0.0011	2	0.00055	0.226	0.0870	0.085	0.0540	0.00057		0.0540	0.00055
										0.0742	0.00126
										0.0754	0.00132
										0.0767	0.00140
										0.0735	0.00120
Volumen (mL)	Volumen m3	tiempo (s)	Qreal (m³/s)	HT (m)	H Ls (m)	Altura de Cresta	H (m)	Qteorico			
1260	0.00126	1	0.00126	0.226	0.0668	0.085	0.0742	0.00126			
1320	0.00132	1	0.00132	0.226	0.0656	0.085	0.0754	0.00131			
1400	0.0014	1	0.00140	0.226	0.0643	0.085	0.0767	0.00137		Cd real	0.611
1200	0.0012	1	0.00120	0.226	0.0675	0.085	0.0735	0.00123			

Humedal 3											
Volumen (mL)	Volumen m3	tiempo (s)	Qreal (m³/s)	HT (m)	H Ls (m)	Altura de Cresta	H (m)	Qcalibrado		H (m)	Qreal (m³/s)
920	0.00092	2	0.00046	0.226	0.06490	0.085	0.07610	0.00046		0.0761	0.00046
980	0.00098	2	0.00049	0.226	0.06320	0.085	0.07780	0.00049		0.0778	0.00049
820	0.00082	2	0.00041	0.226	0.06740	0.085	0.07360	0.00042		0.0736	0.00041
860	0.00086	2	0.00043	0.226	0.06710	0.085	0.07390	0.00043		0.0739	0.00043
										0.1226	0.00180
										0.1167	0.00162
										0.1204	0.00176
										0.1163	0.00162
Volumen (mL)	Volumen m3	tiempo (s)	Qreal (m³/s)	HT (m)	H Ls (m)	Altura de Cresta	H (m)	Qcalibrado			
1800	0.0018	1	0.00180	0.226	0.01840	0.085	0.12260	0.00186			
1620	0.00162	1	0.00162	0.226	0.02430	0.085	0.11670	0.00161			
1760	0.00176	1	0.00176	0.226	0.02060	0.085	0.12040	0.00176		Cd real	0.608
1620	0.00162	1	0.00162	0.226	0.02470	0.085	0.11630	0.00159			

Anexo D. Resultados de los parámetros fisicoquímicos.

		M1	M2	M3	M4		
		MUESTRAS					
		12/1/2026		15/1/2026			
PARÁMETRO	UNIDADES	H1 Entrada (A)	H1 Salida (B)	H2 Entrada (C)	H2 Salida (D)	LD	
Sólidos totales	mg/L	478	390	476	410	0.0001	
Sólidos totales disueltos	mg/L	136.17	114.33	112.7	88.67	0.01	
Sólidos sedimentables	mL/L	1.2	0.8	0.5	0.2	0.01	
Sólidos suspendidos	mg/L	341.83	275.67	363.3	321.33	0.01	
Sólidos volátiles	mg/L	170	108	238	196	0.01	
Sólidos fijos	mg/L	308	282	238	214	0.01	
pH		7.22	7.8	7.23	7.2	0.001	
conductividad	us/cm	270	228	224.33	117.2	0.01	
fósforo	mg/L	0.43	0.32	0.61	0.53	0.05	
amoníaco	mg/L	10.17	< LD	7.83	5.18	0.03	
DQO	mg/L	90	85	109	84		
sustancias disueltas en hexano	mg/L	< LD	< LD	< LD	< LD	0.01	

		M1	M2	M3	M4	M5	M6		
		MUESTRAS							
		20/1/2026		22/1/2026		23/1/2026			
PARÁMETRO	UNIDADES	H3E (A)	H3S (B)	H3E (C)	H3S (D)	H1E (E)	H1S (F)	LD	
Sólidos totales	mg/L	319	287	400	370	478	418	0.0001	
Sólidos totales disueltos	mg/L	140.57	105.8	146.9	132.8	190.15	150.4	0.01	
Sólidos sedimentables	mL/L	0.9	0.5	2.1	<LD	<LD	1.3	0.01	
Sólidos suspendidos	mg/L	178.43	181.2	253.1	237.2	287.85	267.6	0.01	
Sólidos volátiles	mg/L	132	135	186	152	174	162	0.01	
Sólidos fijos	mg/L	187	152	214	218	304	256	0.01	
pH		6.95	6.6	6.9	6.8	7.12	7	0.001	
conductividad	us/cm	280.67	210.67	295	266	379	298	0.01	
fósforo	mg/L	0.72	0.56	2.39	0.62	2.5	0.83	0.05	
amoníaco	mg/L	8.83	7.18	6.85	4.82	9.71	0.87	0.004	
DQO	mg/L	129	94	244	83	122	108		

sustancias disueltas en hexano	mg/L	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0.01
--------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------

PARÁMETRO	UNIDADES	M1	M2	M3	M4	LD
		MUESTRAS				
		26/1/2026		30/1/2026		
		H2E (A)	H2S (B)	H3E (C)	H3S (D)	
Sólidos totales	mg/L	282	220	282	226	0.0001
Sólidos totales disueltos	mg/L	126.5	117.3	141	114.9	0.01
Sólidos sedimentables	mL/L	1.29	< LD	<LD	< LD	0.01
Sólidos suspendidos	mg/L	155.5	102.7	141	111.1	0.01
Sólidos volátiles	mg/L	104	66	86	86	0.01
Sólidos fijos	mg/L	178	154	196	140	0.01
pH		6.91	6.73	7.00	6.73	0.001
conductividad	us/cm	262	240.7	275	225.3	0.01
fósforo	mg/L	0.59	0.37	0.72	0.44	0.3
amoníaco	mg/L	3.78	1.69	1.82	0.65	0.09
DQO	mg/L	98	84	84	77	
sustancias disueltas en hexano	mg/L	< LD	< LD	< LD	< LD	0.01

PARÁMETRO	UNIDADES	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	LD
		MUESTRAS								
		4/2/2026		5/2/2026		10/2/2026		11/2/2025		
		H1E (A)	H1S (B)	H2E (C)	H2S (D)	H3E (E)	H3S (F)	H1E (G)	H1S (H)	
Sólidos totales	mg/L	304	214	276	164	634	248	436	318.00	0.0001
Sólidos totales disueltos	mg/L	210.30	123.7	181.9	105.2	252.67	156.17	227.0	145.9	0.01
Sólidos sedimentables	mL/L	0.20	< LD	0.20	< LD	4.38	< LD	2.00	< LD	0.01
Sólidos suspendidos	mg/L	93.70	90.30	94.10	58.80	381.33	91.83	209.00	172.10	0.01
Sólidos volátiles	mg/L	84	76	84	44	288	74	204	140	0.01

<b>Sólidos fijos</b>	mg/L	220	138	192	120	346	174	232	178	0.01
<b>pH</b>		7.04	6.61	7.16	6.81	6.93	6.79	7.17	6.60	0.001
<b>conductividad</b>	us/cm	415	251.3	360.67	212.3	513.3	308	471	296	0.01
<b>fósforo</b>	mg/L	2.28	0.53	< LD	1.08	2.55	1.98	3.30	0.50	0.03
<b>amoníaco</b>	mg/L	0.68	0.23	2.43	0.40	0.63	0.40	1.75	0.45	0.09
<b>DQO</b>	mg/L	141	90	234	183	295	110	220	90	
<b>sustancias disueltas en hexano</b>	mg/L	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0.01

		<b>M1</b>	<b>M2</b>	
		<b>Muestra</b>		
		<b>23/2/2026</b>		
<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>H2E ( A )</b>	<b>H2S ( B )</b>	<b>LD</b>
<b>Sólidos totales</b>	mg/L	626	328	0.0001
<b>Sólidos totales disueltos</b>	mg/L	221.7	168.5	0.01
<b>Sólidos sedimentables</b>	mL/L	2.94	0.8	0.01
<b>Sólidos suspendidos</b>	mg/L	404.3	159.5	0.01
<b>Sólidos volátiles</b>	mg/L	218	104	0.01
<b>Sólidos fijos</b>	mg/L	408	224	0.01
<b>pH</b>		7.32	7.13	0.001
<b>conductividad</b>	us/cm	431	328	0.01
<b>fósforo</b>	mg/L	2.55	1.85	0.06
<b>amoníaco</b>	mg/L	10.75	4.20	0.09
<b>DQO</b>	mg/L	228	79	
<b>sustancias disueltas en hexano</b>	mg/L	< LD	< LD	0.01

Anexo E. Resultados de los parámetros microbiológicos.

<b>ORDEN No.:</b>	<b>FECHA RECEPCIÓN:</b>	<b>FECHA DE ENTREGA:</b>
	12/01/2026	9/02/2026
<b>CODIGO LAB: M</b>	<b>CLIENTE:</b>	<b>DIRECCIÓN:</b>
<b>RUC/CEDULA: N/A</b>	<b>MUESTRA: agua</b>	<b>CANTIDAD: 2</b>
<b>CONDICION DE LA MUESTREADO POR: cliente</b>	<b>ANALISIS SOLICITADO:</b>	
<b>MUESTRA: REFRIGERADAS</b>	Coliformes totales y fecales	

**IDENTIFICACION DE LA (S) MUESTRA(S):**

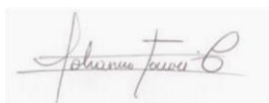
IDENTIFICACION UDA LABORATORIOS	IDENTIFICACION CLIENTE
M1	H1 entrada
M2	H1 salida

**3RESULTADOS:**

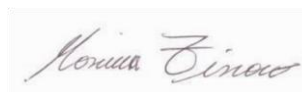
ANALISIS	UNIDADES	Método	Requisito	M1	M2
Coliformes totales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$2 * 10^6$	$6.8 * 10^4$
Coliformes fecales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$2 * 10^6$	$4.5 * 10^4$

**Observaciones:** N/A

**Abreviaturas:** NMP/100 ml: número más probable en 100 ml.



**Laboratorista Microbiología**



**Coordinadora Laboratorios**













**ORDEN No.:** 601

**FECHA RECEPCIÓN:**

04/02/2026

**FECHA DE ENTREGA:**

9/03/2026

**CODIGO LAB:** Proyecto  
Saneamiento sostenible, Ecuador  
2024-163

**CLIENTE:** Universidad del  
Azua

**DIRECCIÓN:** Av. 24 de Mayo  
7-77

**RUC/CEDULA:**  
0190131777001

**MUESTRA:** agua

**CANTIDAD:** 4

**CONDICION DE LA MUESTREO POR:** cliente  
**MUESTRA:** REFRIGERADAS

**ANALISIS SOLICITADO:**  
Coliformes totales y fecales

**IDENTIFICACION DE LA (S) MUESTRA(S):**

IDENTIFICACION UDA LABORATORIOS	IDENTIFICACION CLIENTE
M1	Entrada 4 FEBRERO
M2	Salida 4 FEBRERO
M3	Entrada 5 FEBRERO
M4	Salida 5 FEBRERO

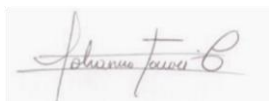
**RESULTADOS:**

ANALISIS	UNIDADES	Método	Requisito	M1	M2
Coliformes totales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$3.5 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^6$
Coliformes fecales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$2.4 \cdot 10^7$	$5.4 \cdot 10^5$

ANALISIS	UNIDADES	Método	Requisito	M3	M4
Coliformes totales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$1.6 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^6$
Coliformes fecales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$1.6 \cdot 10^7$	$3.5 \cdot 10^5$

**Observaciones:** N/A

**Abreviaturas:** NMP/100 ml: número más probable en 100 ml.



**Laboratorista Microbiología**



**Coordinadora Laboratorios**



**ORDEN No.:** 601

**FECHA RECEPCIÓN:**

19/02/2026

**FECHA DE ENTREGA:**

9/03/2026

**CODIGO LAB:** Proyecto  
Saneamiento sostenible, Ecuador  
2024-163

**CLIENTE:** Universidad del  
Azuay

**DIRECCIÓN:** Av. 24 de Mayo  
7-77

**RUC/CEDULA:**  
0190131777001

**MUESTRA:** agua

**CANTIDAD:** 4

**CONDICION DE LA MUESTREADO POR:** cliente  
**MUESTRA:** REFRIGERADAS

**ANALISIS SOLICITADO:**  
Coliformes totales y fecales

**IDENTIFICACION DE LA (S) MUESTRA(S):**

IDENTIFICACION UDA LABORATORIOS	IDENTIFICACION CLIENTE
M1	Entrada 19 FEBRERO
M2	Salida 19 FEBRERO
M3	Entrada 23 FEBRERO
M4	Salida 23 FEBRERO

**RESULTADOS:**

ANALISIS	UNIDADES	Método	Requisito	M1	M2
Coliformes totales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$9.2 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^6$
Coliformes fecales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$5.4 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^6$

ANALISIS	UNIDADES	Método	Requisito	M3	M4
Coliformes totales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$9.2 \cdot 10^6$	$9.2 \cdot 10^5$
Coliformes fecales	NMP/100 ml	Standard Methods Procedimiento 9221	N/A	$5.4 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^5$

**Observaciones:** N/A

**Abreviaturas:** NMP/100 ml: número más probable en 100 ml.

**Laboratorista Microbiología**

**Coordinadora Laboratorios**

**Anexo F.** Resumen de entrevista técnica sobre la implementación de sistemas de saneamiento rural.

**Tipo de fuente:** Comunicación personal (audio vía WhatsApp)

**Entrevistada:** Verónica Rodas (exfuncionaria de ETAPA EP)

**Fecha:** 06 de abril de 2026

**Tema:** Proceso de implementación de sistemas de saneamiento en zonas rurales de Cuenca

**Resumen de aportes relevantes:**

- ❖ Previamente antes de acceder a un sistema de saneamiento, se debe disponer de un sistema de agua potable en la zona de interés.
- ❖ El primer paso es hacer una solicitud hacia las juntas parroquiales, seguido de una recolección de firmas y también cartas de apoyo ante la necesidad, y se solicita a ETAPA el diseño del sistema.
- ❖ Participación de ETAPA EP y GAD en estudios técnicos como: levantamiento topográfico, número de usuarios posibles, la verificación de las cotas más bajas y así hacer diseños de 25-30 años debido al crecimiento poblacional.
- ❖ Hay que considerar que en zonas con vías de lastre se usa el alcantarillado sanitario porque es la opción más factible para evitar colapsos en la red del sistema.
- ❖ El financiamiento es dado por el GAD de Cuenca que entrega un presupuesto a los distintos GADs parroquiales. Una parte de este presupuesto va al sistema de alcantarillado y ETAPA también aporta mediante sus fondos de inversión.
- ❖ Sistema convencional: Fosa séptica más el filtro anaerobio presenta ciertas limitaciones porque reduce ligeramente la cantidad de DQO, no elimina patógenos y así permitiendo contaminar los ríos. Por este motivo, en algunos proyectos recientes se han incorporado humedales construidos como alternativa complementaria para mejorar el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales.

