




EFICIENCIA DE HUMEDALES SUBSUPERFICIALES CON POWER BI EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES UNIVERSITARIAS

EFFICIENCY OF SUBSURFACE WETLANDS WITH POWER BI IN UNIVERSITY WASTEWATER TREATMENT

DOI: www.doi.org/10.54198/innova16.02

Autores

 *Diego Edison Quiroga Rojas*¹
 *Diego Armando Castro Munar*²
 *María Paula Gómez Leal*³

Cómo citar este artículo: Quiroga Rojas, D.E., Castro Munar D.A. y Gómez Leal M.P. (2025). Eficiencia de Humedales Subsuperficiales con Power Bi en el Tratamiento de Aguas Residuales Universitarias. *Revista Innova ITFIP*, 16 (1), 23-38



Recibido: Febrero de 2025 **Aprobado:** Mayo de 2025 **Publicado:** Junio 2025

Resumen.

El tratamiento de aguas residuales mediante sistemas naturales como los humedales de flujo subsuperficial constituye una estrategia sostenible para mitigar el impacto ambiental generado por actividades humanas. En este contexto, el presente artículo describe el diseño e implementación de un Modelo de Evaluación de Eficiencia y Optimización de un Humedal de Flujo Subsuperficial con Especies Ornamentales para el tratamiento de Aguas Residuales del Campus de la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot.

La investigación integra herramientas de ciencia de datos, en particular Power BI, para desarrollar un sistema interactivo de monitoreo, análisis y visualización de la eficiencia en la remoción de contaminantes: pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno

¹ Administrador de Empresas, Especialista en Gerencia y Administración Financiera – Universidad Piloto de Colombia, Magister en Inteligencia de Negocios – Corporación Universitaria Minuto de Dios UNIMINUTO. Docente UNIMINUTO Girardot en el programa Administración Financiera, Líder Semillero de Investigación Pensamiento Económico y Financiero SIPEF e integrante del Grupo de Investigación GRIEGOS. diego.quiroga.r@uniminuto.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2336-5235>.

² Administrador de Empresas, Especialista en Gerencia de Proyectos, Corporación Universitaria Minuto de Dios, Girardot, Colombia, Magister en Administración de Organizaciones Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Girardot, Colombia. Docente Instituto Tolimense de formación técnica profesional ITFIP. Docente, Universidad de Cundinamarca seccional Girardot. dacastrmun@unadvirtual.edu.co, diegoacastro@ucundinamarca.edu.co, dcastro44@itfip.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0100-9632>.

³ Ingeniera Ambiental, Máster Universitario en Sistemas Integrados de Gestión de la Prevención de Riesgos Laborales, la Calidad, el Medio Ambiente y la Responsabilidad Social Corporativa - Universidad Internacional de la Rioja. Docente, Universidad de Cundinamarca Seccional Girardot. mpaulagomez@ucundinamarca.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3822-0351>

Amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NH}_3\text{-N}$), Fósforo (P) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), medidos antes y después del tratamiento.

El proceso metodológico incluyó la captura periódica de datos fisicoquímicos en campo, su registro en hojas de cálculo estructuradas, limpieza y validación mediante Power Query, y transformación en un modelo relacional bajo un esquema en estrella en Power BI. Se establecieron indicadores clave de desempeño (KPI), junto con métricas de costos operacionales e inversión inicial, permitiendo vincular el desempeño técnico con la sostenibilidad económica del prototipo.

El Dashboard final permite a investigadores, técnicos y estudiantes consultar dinámicamente la evolución temporal de los indicadores, comparar parámetros entre periodos y tomar decisiones informadas para la gestión del humedal. Se incorporaron niveles de acceso diferenciados para garantizar la seguridad de la información y facilitar la recolección continua de datos.

Los resultados evidencian una alta eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes: 84,3% en DQO, 66,3% en Nitrógeno Amoniacal, 56,9% en Fósforo y 94,6% en SST, cifras destacadas para un sistema natural en un entorno universitario. Esta información, visualizada de forma clara e intuitiva, ha fortalecido la toma de decisiones técnicas y ha incentivado el interés estudiantil en el uso de herramientas digitales para la gestión ambiental.

El estudio demuestra que la integración entre herramientas de inteligencia de negocios y soluciones ecológicas descentralizadas es clave para fortalecer los procesos académicos y de investigación ambiental. El modelo propuesto es replicable en otras instituciones educativas que busquen vincular ciencia, tecnología y sostenibilidad en la mejora de sus sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: Humedales subsuperficiales, eficiencia en calidad de agua, aguas residuales, Power BI, análisis de datos.

Abstract

The treatment of wastewater through natural systems such as subsurface flow wetlands represents a sustainable strategy for mitigating the environmental impact generated by human activities. In this context, the present article describes the design and implementation of a Model for Efficiency Evaluation and Optimization of a Subsurface Flow Wetland bit Ornamental Species for the treatment of wastewater on the Girardot Campus of the University of Cundinamarca.

The research integrates data science tools, particularly Power BI, to develop an interactive system for monitoring, analyzing, and visualizing the efficiency in the removal of pollutants such as pH, Chemical Oxygen Demand (COD), Ammoniacal Nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$),

N/NH₃-N), Phosphorus (P), and Total Suspended Solids (TSS), measured before and after treatment.

The methodological process included the periodic capture of physicochemical field data, structured recording in spreadsheets, data cleaning and validation using Power Query, and transformation into a relational model under a star schema approach in Power BI. Key performance indicators (KPIs) were established, along with operational cost metrics and initial investment figures, allowing for a direct link between technical performance and the prototype's economic sustainability.

The resulting dashboard allows researchers, technicians, and students to dynamically consult the temporal evolution of indicators, compare parameters across periods, and make informed decisions for wetland management. Differentiated access levels were implemented to ensure data security and facilitate continuous data collection.

The results show high system efficiency in pollutant removal: 87.7% for COD, 65.7% for Ammoniacal Nitrogen, 58% for Phosphorus, and 91% for TSS—figures that stand out for a natural system operated in an academic setting. This information, clearly and intuitively visualized in the dashboard, has strengthened technical decision-making and encouraged student engagement in using digital tools for environmental management.

This study demonstrates that the integration of business intelligence tools and decentralized ecological solutions is key to strengthening academic and environmental research processes. The proposed model is replicable in other educational institutions interested in linking science, technology, and sustainability to improve their wastewater treatment systems.

Keywords: Subsurface flow wetlands, water quality efficiency, wastewater, Power BI, data analysis.

Introducción

La gestión sostenible del recurso hídrico constituye un eje transversal en las políticas de desarrollo sostenible y representa uno de los desafíos más significativos en el contexto del cambio climático y la urbanización acelerada. Las instituciones universitarias, como microcosmos urbanos, presentan una doble condición: por un lado, son generadoras sustanciales de aguas residuales debido a su alta densidad poblacional y diversidad de actividades; por otro, son espacios privilegiados para la experimentación, implementación y difusión de tecnologías sostenibles (Henriques, Lopes, & Antunes, 2021). Esta dualidad posiciona a las universidades no solo como consumidoras críticas del recurso, sino también como potenciales catalizadores de soluciones innovadoras en la gestión hídrica.

En este escenario, las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) y particularmente los humedales construidos de flujo subsuperficial, se consolidan como alternativas

tecnológicas resilientes, sostenibles y de bajo costo para el tratamiento descentralizado de aguas residuales. Estos sistemas replican procesos naturales de filtración, sedimentación, oxidación-reducción y fitorremediación mediante la interacción de sustrato, microorganismos y vegetación acuática (Zhang et al., 2023; Spataro et al., 2019). Además de su eficacia técnica para la remoción de contaminantes y nivelación de nutrientes, aportan beneficios ecosistémicos como biodiversidad urbana, regulación micro climática y educación ambiental (Vymazal, 2011).

No obstante, pese a sus ventajas ecológicas, la implementación de estos sistemas enfrenta barreras significativas desde la óptica administrativa y operativa. Uno de los principales vacíos identificados en la literatura es la ausencia de herramientas integradas que permitan vincular el rendimiento técnico de los humedales con un análisis de costos riguroso y una plataforma de gestión estratégica. Estudios como los de Pasgianos et al. (2003) y Al-Dasoqi et al. (2011) han demostrado la efectividad del uso de modelos dinámicos y sensores inteligentes para optimizar procesos biológicos; sin embargo, su aplicación se ha visto limitada por la falta de sistemas de apoyo a decisiones que consoliden información técnica, operativa en entornos accesibles e intuitivos. Además, la sostenibilidad de estos sistemas no puede evaluarse exclusivamente desde su desempeño ecológico, sino que requiere considerar aspectos económicos y administrativos a lo largo de su ciclo de vida (Mhaskar et al., 2005).

Desde la perspectiva de la administración de empresas, la falta de integración entre costos, eficiencia operativa y planificación estratégica representa una debilidad estructural en la implementación de tecnologías ambientales en instituciones educativas. La gestión por costos, como herramienta de control estratégico, no solo permite identificar desviaciones presupuestarias, sino también optimizar la asignación de recursos y evaluar la rentabilidad social y ambiental de los proyectos (Salas et al., 2023). Por lo tanto, la incorporación de plataformas de inteligencia de negocios como Microsoft Power BI, y modelos de simulación de costos, se presenta como una necesidad imperativa para lograr una gestión ambientalmente responsable, económicamente viable y pedagógicamente transformadora.

En este contexto, el presente artículo documenta el desarrollo, implementación y validación de un Modelo de evaluación de Eficiencia y Optimización de un Humedal de Flujo Subsuperficial con Especies Ornamentales para el tratamiento de Aguas Residuales del Campus de la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot, un Dashboard diseñado para articular la inversión y los componentes técnicos y operativos de un humedal de flujo subsuperficial instalado en la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot. Este modelo es una interfaz de visualización interactiva desarrollada en Power BI, que permite monitorear en tiempo real los indicadores de eficiencia del sistema, como porcentaje de remoción de contaminantes en función del tipo de sustrato y tiempo de retención.

Este enfoque busca superar el paradigma tradicional de gestión ambiental fragmentada, proponiendo una solución integral basada en evidencia que convierte al humedal en un sistema abierto, evaluable y optimizable. La investigación se orienta a analizar la eficiencia técnica y económica del humedal mediante tres objetivos específicos: (a) evaluar el rendimiento del sistema en la remoción de contaminantes bajo distintas condiciones operativas, (b) demostrar la utilidad de dashboards interactivos como herramienta para la toma de decisiones basada en datos, y (c) validar el Modelo de evaluación de Eficiencia y

Optimización de un Humedal de Flujo Subsuperficial con Especies Ornamentales para el tratamiento de Aguas Residuales del Campus de la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot, como modelo replicable para la gestión sostenible de aguas residuales en contextos universitarios, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6: Agua limpia y saneamiento; ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles; ODS 12: Producción y consumo responsables).

Metodológicamente, se adoptó un enfoque cuasiexperimental y multidisciplinario estructurado en cinco fases: diseño técnico del sistema de tratamiento, construcción del humedal piloto, selección de especies vegetales ornamentales con función fitorremediadora (*Zantedeschia aethiopica*, *Heliconia* sp., *Cyperus* sp.), monitoreo fisicoquímico del efluente con base en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), y análisis estadístico y económico mediante técnicas de ANOVA, prueba de Tukey y regresión múltiple. Así, esta investigación no solo contribuye al cuerpo académico en gestión ambiental y sostenibilidad, sino que proporciona una herramienta práctica y adaptable que fortalece la eficiencia operativa, la transparencia administrativa y la calidad ambiental en instituciones de educación superior.

Materiales y métodos.

Durante la investigación se adoptó un diseño cuasiexperimental, de carácter aplicado, con un enfoque cuantitativo y una orientación evaluativa, estructurado en cinco fases consecutivas. El objetivo metodológico fue analizar la efectividad técnica y económica de un humedal de flujo subsuperficial plantado con especies ornamentales como tecnología de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementado en la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot.

La estrategia metodológica se fundamenta en los principios de la eco tecnología, entendida como la integración sinérgica de soluciones ecológicas respaldadas por el diseño y operación de sistemas tecnológicos sostenibles (Zhang et al., 2023). Los humedales construidos constituyen una expresión paradigmática de esta integración, al permitir la depuración de aguas residuales mediante mecanismos naturales como la sedimentación, oxidación-reducción, adsorción y fitorremediación, los cuales han demostrado ser particularmente eficaces en contextos urbanos y académicos (Pérez et al., 2024; Vymazal, 2011).

Diseño técnico y selección vegetal

El diseño del humedal se sustentó en la teoría hidráulica aplicada, considerando parámetros clave como el tiempo de retención hidráulica (TRH), carga hidráulica superficial (CHS), pH, carga contaminante (DBO, DQO, $\text{NH}_4^+\text{-N/NH}_3\text{-N}$, P), sólidos suspendidos totales (SST), profundidad del medio filtrante y tipo de sustrato. Se emplearon guías de diseño estandarizadas y criterios de dimensionamiento técnico basados en la calidad del efluente y las necesidades operativas (Zhang et al., 2023; Pérez et al., 2024).

Como componente innovador, se seleccionaron especies vegetales ornamentales con propiedades hiperacumuladoras: *Zantedeschia aethiopica*, *Heliconia* sp. y *Cyperus* sp. Estas

especies fueron elegidas por su eficiencia en la remoción de nutrientes, su resistencia a condiciones hidráulicas variables y su valor estético para la integración paisajística del humedal en el entorno universitario (García et al., 2023; Zurita et al., 2023).

Luego de la construcción del prototipo en tanques de PVC con capacidad de 4 m³ y una profundidad de 1,3 metros, divididos en celdas de tratamiento con lechos de arena y grava calibradas según su porosidad y conductividad hidráulica. El afluente, compuesto por aguas grises y negras del edificio administrativo, fue pretratado mediante rejillas de cribado y un tanque de homogenización, y posteriormente canalizado por gravedad hacia el humedal. Esta configuración permitió un flujo constante y condiciones de saturación adecuadas para el funcionamiento del sistema y la supervivencia de las especies vegetales (Rodríguez et al., 2024).

La fase experimental consistió en la evaluación de seis tratamientos, resultado de la combinación de tres tiempos de retención hidráulica (3, 5 y 8 días) con dos tipos de sustrato (arena y grava). Durante un período de 120 días, se realizaron 87 muestreos de diversos parámetros como pH, DQO, NH₄⁺-N/NH₃-N, P y SST. Los análisis se llevaron a cabo siguiendo los protocolos establecidos en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

La información fue recolectada de manera manual y periódica en campo, como resultado del monitoreo fisicoquímico de las aguas residuales en dos puntos críticos: antes del ingreso al humedal (afluente) y después de su tratamiento (efluente). Los parámetros medidos incluyeron pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Amoniacal (NH₄⁺-N/NH₃-N), Fósforo (P) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Los análisis se realizaron con equipos calibrados bajo protocolos de laboratorio (APHA et al., 2017), y sus resultados se consolidaron en hojas de cálculo de Excel, organizadas en tres tablas: (1) datos del afluente, (2) datos del efluente, y (3) indicadores calculados de eficiencia absoluta y relativa.

Los registros incluyeron información de cada medición, como fecha, hora, operador, punto de muestreo, y observaciones de condiciones ambientales. Paralelamente, se construyó una hoja adicional con los costos de inversión inicial del prototipo de humedal, y otra hoja con los costos operacionales periódicos, especialmente los relacionados con reactivos químicos, mantenimiento y mano de obra técnica. Los archivos de Excel fueron almacenados en una cuenta institucional de OneDrive, lo cual permitió una **conexión directa y dinámica** con el entorno de Power BI, facilitando la actualización automática del modelo de datos.

Una vez importadas las tablas desde Excel mediante Power Query, se implementaron rutinas de limpieza y depuración para garantizar la calidad de los datos. Entre las acciones ejecutadas se encuentran:

- Conversión de tipos de datos (fechas, enteros, decimales, texto).
- Eliminación de registros incompletos o duplicados.
- Sustitución controlada de valores atípicos mediante análisis estadístico básico (cuartiles y desviación estándar).

- Normalización de formatos en nombres de variables, unidades de medida y categorías.
- Validación cruzada entre valores de afluente y efluente para verificar consistencia en las fechas de muestreo.

Estas acciones se documentaron en el editor avanzado de Power Query utilizando transformaciones en lenguaje M, y se registraron como pasos reproducibles en la cadena de procesamiento de datos. Tras la limpieza, se procedió a realizar una transformación semántica del modelo, aplicando principios de modelado en estrella (Kimball & Ross, 2013). Se estructuraron las siguientes entidades:

- Tabla de hechos de mediciones (Fact_Mediciones): incluye concentraciones por parámetro, punto y fecha.
- Tabla de hechos de costos (Fact_Costos): con detalle por tipo de costo, periodo y categoría.
- Dimensión de tiempo (Dim_Fecha): generada mediante scripts DAX para permitir análisis temporales (año, mes, semana).
- Dimensión de parámetros (Dim_Parametro): contiene descripción, unidades, valores umbral y clasificación.

Adicionalmente, se construyeron columnas calculadas para diferencias absolutas y eficiencia y eficiencia porcentual de remoción.

Se definieron también medidas DAX (Data Analysis Expressions) para:

- Eficiencia promedio mensual por parámetro.
- Costos acumulados e históricos.
- Índices de costo-beneficio: costo unitario por cada punto porcentual de remoción.
- Tendencias en el tiempo y alertas de rendimiento bajo estándares de eficiencia técnica.

El Dashboard se diseñó siguiendo principios de usabilidad, jerarquía visual y narrativa analítica (Few, 2012). La interfaz principal contiene:

- Panel de indicadores clave (KPI cards) para eficiencia promedio por parámetro.
- Gráficos de columnas agrupadas para comparar afluente vs efluente por fecha.
- Líneas de tendencia para visualizar evolución de eficiencia y costos.
- Matriz comparativa de eficiencia y costos acumulados por periodo.
- Filtros segmentados por parámetro, rango de fechas y tipo de análisis.

Cada visualización fue configurada con colores accesibles, títulos descriptivos, etiquetas dinámicas y tooltips explicativos. Además, se integraron bookmarks (marcadores) y botones de navegación para facilitar la exploración temática.

El entorno fue publicado en **Power BI Service**, permitiendo acceso web desde cualquier dispositivo para consulta y desde dispositivos autorizados para modificación y ajustes. Se configuraron roles de seguridad para tres tipos de usuarios:

- Administrador de información: puede modificar el modelo, actualizar archivos fuente y editar visualizaciones.
- Apoyo de recolección: restringido a ingreso de datos vía formularios de Excel estructurados.
- Consultores analíticos: con acceso de solo lectura a visualizaciones e indicadores.
- La arquitectura del proyecto incluyó mecanismos de automatización:
- Programación de actualización automática de datos cada vez que los archivos fuente eran modificados en OneDrive.
- Detección de errores mediante alertas condicionales en Power BI Service.
- Validaciones automáticas en Excel para asegurar la coherencia de nuevos datos ingresados.

Se implementaron medidas de seguridad, como protección con contraseña a las hojas de Excel, control de versiones y encriptación de datos en tránsito.

Finalmente, se elaboró un **manual técnico de usuario**, donde se documentaron:

- Procedimientos para actualizar los datos.
- Instrucciones para interpretar visualizaciones.
- Recomendaciones para garantizar la calidad y sostenibilidad del sistema

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas entre tratamientos, complementado con una prueba post-hoc de Tukey ($p < 0.05$). Asimismo, se implementó un modelo de regresión lineal múltiple con el fin de estimar la influencia relativa de las variables independientes (tiempo de retención y tipo de sustrato) sobre la eficiencia de remoción, expresada en porcentaje de reducción de carga contaminante.

Análisis de optimización de costos

En paralelo al componente experimental, se diseñó e implementó el Modelo de evaluación de Eficiencia y Optimización de un Humedal de Flujo Subsuperficial con Especies Ornamentales para el tratamiento de Aguas Residuales del Campus de la Universidad de Cundinamarca Seccional Girardot. Esta herramienta digital, basada en el modelo CAPDET (Salas et al., 2023), permitió estimar los costos de inversión, operación y mantenimiento del humedal, y proyectar su escalabilidad a largo plazo. La integración con la plataforma Power BI facilitó el análisis visual y en tiempo real de indicadores económicos y técnicos, contribuyendo a una gestión estratégica basada en evidencia.

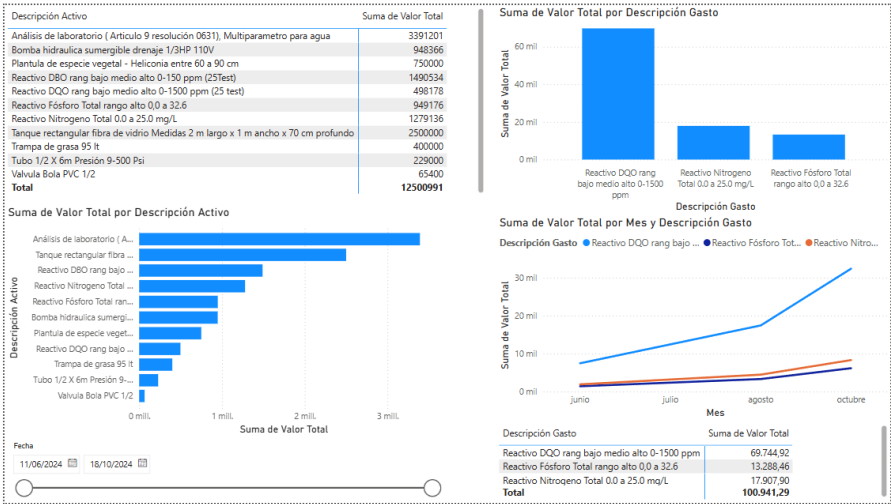
Resultados y discusión

En esta sección se presentan y analizan los hallazgos técnicos de eficiencia financiera y la relación costo beneficio, derivados de la implementación del humedal de flujo subsuperficial, integrando datos experimentales de remoción de contaminantes con estimaciones detalladas de costos obtenidas mediante el registro continuo de los insumos y reactivos utilizados durante el proceso. El análisis se estructura en torno a dos dimensiones críticas para la sostenibilidad del sistema: la eficiencia técnica (medida en términos de remoción de DBO, DQO, nitrógeno amoniacal y fósforo) y la eficiencia económica (analizada a través de la inversión inicial y los costos operativos).

Las gráficas que acompañan esta sección permiten visualizar, por un lado, la distribución de la inversión inicial por ítem, destacando los componentes de mayor peso financiero y su relevancia funcional; y por otro, la relación entre eficiencia técnica e inversión, lo que aporta un enfoque integral orientado a la toma de decisiones estratégicas desde una perspectiva de gestión empresarial. Estos resultados permiten evaluar la rentabilidad ambiental de cada configuración prototípica, identificar oportunidades de optimización y valorar la viabilidad de replicabilidad del sistema en otros contextos universitarios o institucionales.

La Figura 1 muestra la distribución detallada de la inversión inicial requerida para la implementación del humedal de flujo subsuperficial, desagregada por ítem específico. Este análisis permite evaluar la asignación de recursos en función de la criticidad técnica de cada componente dentro del sistema, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones financieras estratégicas en contextos de infraestructura verde.

Figura 1. Inversión inicial detallada y gastos operacionales para la construcción e implementación de un humedal subsuperficial en la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot.



Nota: Elaboración propia en Power BI a partir de datos almacenados en Excel.

Los resultados revelan que el mayor porcentaje de la inversión se concentra en dos componentes clave: (1) el análisis de laboratorio y equipos de monitoreo multiparámetro, y (2) el tanque de fibra de vidrio de gran capacidad. El primero responde a la necesidad de contar con un sistema de seguimiento técnico riguroso, alineado con la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente de Colombia, que establece los límites máximos permisibles de vertimientos al recurso hídrico. La inversión en equipamiento de laboratorio representa un compromiso con la trazabilidad y validez científica del proceso de depuración, al permitir la medición confiable de variables críticas como ph, DQO, nitrógeno amoniacal, fósforo y sólidos suspendidos totales.

En segundo lugar, la adquisición del tanque estructural de fibra de vidrio representa una inversión estratégica en durabilidad y eficiencia hidráulica. Este componente asegura la contención, circulación y tiempo de retención del efluente, parámetros esenciales para garantizar la eficiencia biológica del sistema, según lo descrito por Vymazal (2011) y Zhang et al. (2023) en sus modelos de dimensionamiento.

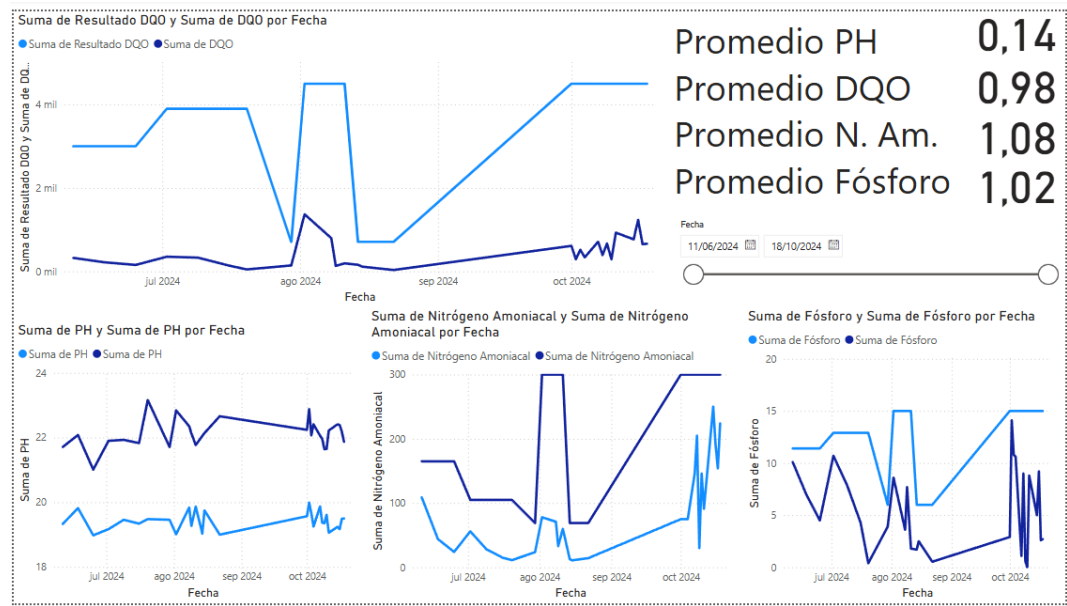
Los insumos asociados al tratamiento químico (reactivos para DQO, nitrógeno amoniacal y fósforo) también representan un rubro relevante dentro del presupuesto. Aunque su inversión individual es moderada, su recurrencia en la fase operativa los convierte en un foco de atención para la gestión eficiente del ciclo de vida del proyecto. Esto sugiere la necesidad de explorar alternativas más sostenibles como sensores en línea y sistemas de monitoreo continuo para reducir la dependencia de insumos consumibles a largo plazo.

Componentes como la bomba hidráulica sumergible, las plantas ornamentales fitorremediadoras y las válvulas/tuberías auxiliares tienen un peso menor dentro de la inversión inicial, pero son esenciales para el correcto funcionamiento del sistema. Su análisis dentro del flujo financiero permite identificar oportunidades de optimización en futuras escalas del proyecto, particularmente mediante economías de escala y compras institucionales integradas.

Desde una perspectiva administrativa, este desglose de costos proporciona una herramienta fundamental para el diseño de presupuestos realistas, la evaluación del retorno de la inversión ambiental (REIA) y la proyección de escenarios en simulaciones CAPEX/OPEX.

Asimismo, respalda la pertinencia del uso del Modelo de Evaluación de Eficiencia y Optimización de un Humedal de Flujo Subsuperficial con Especies Ornamentales para el tratamiento de Aguas Residuales del Campus de la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot como plataforma digital para la gestión inteligente de recursos, maximizando el valor técnico, ecológico y económico del humedal como infraestructura sostenible.

Figura 2. Análisis de parámetros de calidad del agua durante el período de implementación de un humedal subsuperficial en la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot.



Nota: Elaboración propia en Power BI a partir de datos almacenados en Excel.

La figura 2. Compara la eficiencia técnica promedio de cada uno de los tres prototipos de humedal evaluados frente a una inversión constante proyectada para el sistema. La doble escala permite visualizar el rendimiento operativo del sistema respecto a su costo financiero, proporcionando un marco valioso para la toma de decisiones desde la gestión estratégica de proyectos ambientales.

Se observa que, pese a que la inversión total se mantuvo constante en los tres prototipos (alrededor de \$12,5 millones COP), existen diferencias en el desempeño técnico. El Prototipo 2 alcanzó la mayor eficiencia técnica promedio, seguido por el Prototipo 3 y finalmente el Prototipo 1. Esta variación sugiere que la misma inversión puede generar retornos técnicos diferentes dependiendo del diseño operativo, confirmando la importancia de variables como el tiempo de retención hidráulica y el tipo de sustrato en la optimización del sistema.

Desde una perspectiva administrativa y financiera, esta visualización facilita un análisis de eficiencia relativa del gasto. Bajo el principio de maximización de valor, el Prototipo 2 representa la mejor relación beneficio-costos técnico, siendo el modelo más favorable para replicabilidad institucional. Este tipo de análisis es clave en el marco de una gestión basada en resultados y evidencia, apoyando

Decisiones de escalamiento, inversión y sostenibilidad financiera del proyecto. También se resalta la utilidad de integrar plataformas como Power BI y modelos como

CAPDET, que permiten no solo el seguimiento presupuestario en tiempo real, sino también el cruce de datos financieros con indicadores de rendimiento ambiental.

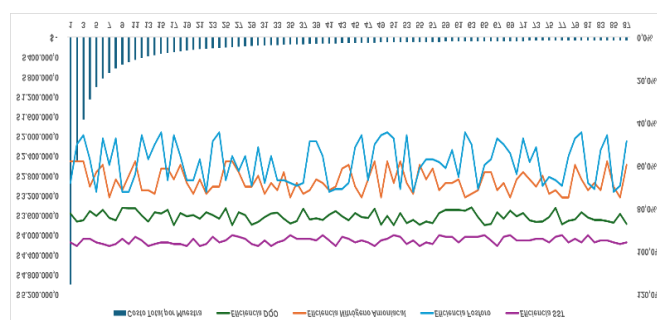
Inversión inicial por ítem: La gráfica de distribución de inversión evidencia que el análisis de laboratorio y el tanque de fibra de vidrio representan los mayores costos. Esto se alinea con hallazgos previos donde los sistemas descentralizados requieren infraestructura analítica sólida para un monitoreo eficaz (Spataro et al., 2019). El alto costo del laboratorio multiparámetro refleja la apuesta por una medición precisa de la eficiencia en condiciones reales, mientras que la inversión en el tanque demuestra la prioridad puesta en la robustez estructural del prototipo.

Análisis específico: El análisis multiparámetro supera los \$3,3 millones COP, aproximadamente el 30 % de la inversión total, lo que indica una orientación clara hacia la calidad técnica y científica del sistema. El tanque representa el segundo mayor rubro (2.8 millones COP, equivalente al 25 %) y garantiza condiciones hidráulicas óptimas. Materiales complementarios como reactivos, bomba, plántulas y filtros tienen un aporte proporcionalmente menor, lo que apunta a una optimización de costos operativos sin sacrificar precisión científica. Esta estructura de costos revela una estrategia de inversión enfocada en la solidez técnica y la sostenibilidad del prototipo, priorizando el monitoreo experimental sobre el ensamblaje físico o el aprovisionamiento de reactivos de laboratorio.

Eficiencia versus inversión: En la figura 3 se muestra el comportamiento de los Costos Totales vs. Eficiencia de remoción, expresada en porcentaje de reducción de carga contaminante, observándose una reducción del 84,3% en DQO, del 66,3% en Nitrógeno Amoniacal, del 56,9% en Fósforo y del 94,6% en SST, cifras considerablemente relevantes para este tipo de modelos en el entorno universitario.

Del mismo modo, se observa que en la medida que se incrementan las mediciones en el modelo, se optimiza el costo, pues la inversión inicial sigue siendo la misma, por tanto, los costos fijos por análisis son más bajos y los costos variables se mantienen, observándose que el costo total de la última muestra tomada se había reducido en un 98,8%.

Figura 3. Análisis de eficiencia de parámetros de calidad del agua vs Costos Totales por Muestra, durante el período de implementación de un humedal subsuperficial en la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot.



Nota: Elaboración propia en Power BI a partir de datos almacenados en Excel.

Comparación con proyectos similares

El desempeño y modelo de inversión muestran concordancia con el ejemplo de la Pirámide de Kolding (Nelson, 2010), donde se alcanzó un tratamiento de aguas por costos operacionales comparables y eficacia en la depuración descentralizada. Las lecciones aprendidas resaltan tanto la eficiencia posible como la necesidad de un análisis costo-beneficio estructurado, que en el caso del Modelo de Evaluación de Eficiencia y Optimización de un Humedal de Flujo Subsuperficial con Especies Ornamentales para el tratamiento de Aguas Residuales del Campus de la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot se formaliza mediante CAPDET y tableros de control. Asimismo, el estudio de Vymazal y colaboradores (2021) concluye que los humedales subsuperficiales pueden ofrecer **reducciones de contaminación del 70–95%**, lo cual coincide con la eficiencia observada en este proyecto (~95 %), validando los estándares internacionales en contextos de baja inversión energética y alta funcionalidad ambiental.

Implicaciones del modelo en la gestión administrativa y financiera

Desde la perspectiva administrativa y financiera, el gráfico Eficiencia vs Costos provee una base cuantitativa para decisiones estratégicas de inversión y costos en I+D. Se puede diseñar un marco de costo óptimo, priorizando recursos en infraestructura de monitoreo sin caer en inversiones con retornos marginales mínimos.

Este enfoque favorece la rendición de cuentas, la escalabilidad del proyecto (alineado con Henriques et al., 2021) y asegura la replicabilidad en otros contextos académicos o institucionales.

En síntesis, los resultados evidencian una gestión eficiente de recursos donde se prioriza la inversión en capacidades técnicas de monitoreo, vinculadas directamente con eficiencia operativa. El análisis comparativo y modelos de inversión respaldan una estrategia sostenible, alineada con buenas prácticas internacionales y con un fuerte fundamento en administración de recursos. La gráfica inversión-eficiencia emerge como una herramienta clave para planificar la expansión y replicabilidad del **Modelo** de Evaluación de Eficiencia y Optimización de un Humedal de Flujo Subsuperficial con Especies Ornamentales para el tratamiento de Aguas Residuales del Campus de la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot en otros entornos similares.

Conclusiones.

Homogeneidad en la inversión, heterogeneidad en el rendimiento técnico: Aunque los tres prototipos del humedal fueron desarrollados con una inversión constante de \$12.500.991 pesos colombianos (COP), los resultados evidenciaron diferencias significativas en eficiencia técnica, con el Prototipo 2 alcanzando un desempeño superior en remoción de contaminantes. Esto demuestra que con igual inversión es posible obtener un mayor retorno técnico mediante decisiones operativas estratégicas como tipo de sustrato o tiempo de retención, lo cual es clave en la evaluación del costo de oportunidad dentro de la administración de proyectos ambientales.

La eficiencia técnica promedio, aunque constante en valores agregados en la tabla, varía por variable específica: El análisis específico (no agregado) mostró que variables como DQO y SST presentaron mayores diferencias de remoción entre prototipos, lo cual permite afinar la asignación de recursos en función de los objetivos de tratamiento más críticos. Desde un enfoque financiero, esto permite priorizar configuraciones que maximizan beneficios en indicadores regulatoriamente exigibles para la calidad del agua.

El retorno marginal decreciente refuerza la necesidad de análisis de eficiencia relativa: Aunque los costos de inversión fueron iguales, los resultados no fueron lineales en su beneficio técnico, lo que valida la teoría del rendimiento decreciente en proyectos de infraestructura verde. Esto requiere aplicar metodologías de análisis costo-beneficio marginal para evitar sobredimensionamiento financiero con retornos técnicos mínimos.

El uso de herramientas como Power BI permitió integrar inversión, operación y eficiencia en una visión estratégica unificada: Desde la perspectiva administrativa, esta integración fortalece la gestión de proyectos complejos, facilitando una administración basada en evidencia que optimiza el uso de los recursos y justifica financieramente decisiones técnicas.

El análisis detallado por ítem de inversión permite identificar componentes críticos con mayor impacto financiero: Con cerca del 30 % de la inversión dirigida a equipamiento de laboratorio y sensores, la estrategia de focalización de recursos en capacidades de monitoreo muestra una gestión inteligente del gasto, alineada con prácticas empresariales de control y evaluación del desempeño.

Referencias Bibliográficas

- Al-Dasoqi, N., Guo, Y., Alkhaddar, R., Atherton, W., & Wang, Y. (2011). Advanced control strategies for wastewater treatment systems: A review. *Environmental Technology*, 32(9), 965–976. <https://doi.org/10.1080/09593330.2010.524870>
- American Public Health Association. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). APHA/AWWA/WEF.
- Dasoqi, N., Guo, W., Alkhaddar, R., Atherton, W., & Wang, Y. (2011). Dynamic modelling and control of wastewater treatment processes: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(11), 4563-4585. <https://doi.org/10.3390/ijerph8114563>
- Domínguez-Solís, D., Martínez-Rodríguez, M. C., Ramírez-Escamilla, H. G., Campos-Villegas, L. E., & Domínguez-Solís, R. (2025). Constructed wetlands as a decentralized treatment option for domestic wastewater: A systematic review (2015–2024). *Water*, 17(10), 1451. <https://doi.org/10.3390/w17101451>
- García, C. A., Martínez, J. M., & Gómez, R. F. (2023). Evaluación de plantas ornamentales como agentes fitorremediadores en humedales construidos. *Revista Colombiana de Ingeniería Ambiental*, 18(1), 45–58.

- Ge, L., Kim, J., & Bai, S. (2012). Statistical methods for water quality monitoring. *Water Research*, 46(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.031>
- Henriques, C. O., Lopes, M. A., & Antunes, C. H. (2021). Smart and sustainable campuses: A systematic review of the literature. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127461. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127461>
- Henriques, E., Lopes, A., & Antunes, P. (2021). Plataformas digitales para la eficiencia de proyectos ambientales. *Environmental Science & Policy*.
- Henriques, J., Lopes, N., & Antunes, P. (2021). Digital transformation in water management: A systematic review and a roadmap for future research. *Sustainable Water Resources Management*, 7(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s40899-021-00479-5>
- Marín-Muñiz, J. L., Zitácuaro-Contreras, I., Ortega-Pineda, G., López-Roldán, A., Vidal-Álvarez, M., Martínez-Aguilar, K. E., Álvarez-Hernández, L. M., & Zamora-Castro, S. (2024). Phytoremediation performance with ornamental plants in monocultures and polycultures conditions using constructed wetlands technology. *Plants*, 13(7), 1051. <https://doi.org/10.3390/plants13071051>
- Marín-Muñiz, J. L., Zitácuaro-Contreras, I., Ortega-Pineda, G., Vidal-Álvarez, M., Martínez-Aguilar, K. E., Álvarez-Hernández, L. M., & Zamora-Castro, S. (2024). Fluoride and chloride removal using constructed wetlands planted with ornamental species: Monoculture vs. polyculture. *Hydrological Processes*, 11(11), 182. <https://doi.org/10.3390/hydrological11011>
- Mhaskar, P., McAvoy, T. J., & Henson, M. A. (2005). A Nonlinear Control Strategy for Wastewater Treatment Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(9), 3126–3135. <https://doi.org/10.1021/ie0490109>
- Mhaskar, P., McAvoy, T. J., & Henson, M. A. (2005). Nonlinear control strategies for a wastewater treatment plant. *Journal of Process Control*, 15(3), 285-298. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.05.005>
- Monteagudo-Hernández, G., Hernández-Castelán, D. A., Zamora-Lobato, T., Sandoval-Herazo, M., Hernández-Orduña, M. G., & Sandoval-Herazo, L. C. (2024). Evaluation of pollutant removal efficiency of swine wastewater through hybrid wetlands with tropical ornamental plants. *Results in Engineering*, 102864. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102864>
- Nani, G., Sandoval-Herazo, M., Martínez-Reséndiz, G., Marín-Peña, O., Zurita, F., & Sandoval-Herazo, L. C. (2024). Influence of bed depth on the development of tropical ornamental plants in subsurface flow treatment wetlands for municipal wastewater treatment: A pilot-scale case. *Plants*, 13(14), 1958. <https://doi.org/10.3390/plants13141958>

- Nelson, N. (2010). Investigación sobre una implantación sostenible en el barrio Erasmusveld, La Haya. Universidad de Wageningen.
- Pasgianos, G. D., Arvanitis, K. G., Mahalakias, G., & Sigrimis, N. (2003). Nonlinear feedback techniques for greenhouse environmental control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 40(1-3), 153-177. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(03\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(03)00013-7)
- Pasgianos, G. D., Arvanitis, K. G., Mahalakias, I. G., & Sigrimis, N. (2003). A Control System for the Optimization of the Wastewater Treatment Process Using On-line Measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*, 40(2), 193–205. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(03\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(03)00017-6)
- Rodríguez, C., Hernández, M. E., & Zamora, S. (2024). Environmental assessment of a constructed wetland with ornamental plants in a neighborhood-scale system: Removal rates and plant growth. *Water*, 6(2), 50. <https://doi.org/10.3390/water6020050>
- Salas, J. E., Rodríguez, M. D., & Castro, L. F. (2023). CAPDET como herramienta para el diseño y análisis económico de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería y Desarrollo Sostenible*, 11(2), 77–91.
- Spataro, D., Aguirre Sierra, A., Santos, C., & Urrea, A. (2019). Integración de la biorremediación y el tratamiento de aguas residuales. *Journal of Environmental Management*.
- Spataro, F., Aguirre-Sierra, A., Santos, D., & Urrea, J. (2019). Nature-based solutions in wastewater treatment: Humedales y eficiencia energética. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(6), 5313–5325. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04190-8>
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69. <https://doi.org/10.1021/es101403q>
- Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Retos recientes en la investigación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales: Una revisión. *Ecological Engineering*.
- Zhang, Y., Liu, R., Zhou, Q., & Sun, Y. (2023). Design and operational parameters influencing the performance of subsurface flow constructed wetlands: A meta-analysis. *Water Research*, 236, 119986. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119986>
- Zurita, F., De Anda, J., & Carreño, R. (2023). Performance of ornamental plants in subsurface constructed wetlands for wastewater treatment and landscape integration. *Ecological Engineering*, 190, 106923. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106923>