



Formato de Investigación de Póster

Misión Académica Internacional

1. Información General del Proyecto

Facultad de Ingeniería Civil	Fecha de presentación:		
	DD	MMM	AAAA
Programa: Especialización en Ingeniería Hidroambiental	21	05	2026
Título del proyecto: COMPARACIÓN TÉCNICA DE LOS PROCESOS DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL JUAN DIAZ (PANAMÁ) Y LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE TUNJA			

1.1 Director del Proyecto

Nombres y Apellidos	Número Documento	Nivel de Formación	e-mail	Número Teléfono
Pedro Mauricio Acosta Castellanos	7186213	Doctorado	pedro.acosta@usantoto.edu.co	3124534318

1.1.1 Codirector del Proyecto

Nombres y Apellidos	Número Documento	Nivel de Formación	e-mail	Número Teléfono

1.2 Estudiantes Participantes

Nombres y Apellidos	Número de Documento	Semestre	Correo Electrónico	Número Teléfono
---------------------	---------------------	----------	--------------------	-----------------

Carlos Fernando Salazar Mesa	1057546705	2	Carlos.salazarm@usanto to.edu.co	3202919980
Juan Camilo Matamoros Camargo	1056802087	2	Juan.matamoros@usanto to.edu.co	3183112183

1.3 Firmas

Director 1

Pedro Mauricio Acosta C. Ph.D.

Codirector 2

Estudiante: Carlos

Salazar

Estudiante: Juan

Matamoros

2. Introducción

El tratamiento de aguas residuales urbanas constituye un componente esencial para la protección de la salud pública y los ecosistemas. En Latinoamérica, su fortalecimiento ha avanzado mediante infraestructuras de gran escala que buscan mejorar la calidad del efluente y cumplir normativas cada vez más estrictas. En este contexto, la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Juan Díaz, en Panamá, forma parte del programa de saneamiento de la Ciudad y Bahía de Panamá, destacando por su capacidad y por los desafíos operativos asociados a la inestabilidad estacional de caudales y cargas afluentes (CAF, 2025; Soto & Saavedra, 2015). Por su parte, la PTAR de Tunja, en Colombia, ha

sido objeto de diagnósticos y propuestas de modernización orientadas a mejorar la eficiencia del proceso biológico, mitigar impactos como los olores y avanzar hacia tecnologías de mayor rendimiento, incluida la transición a esquemas de membranas en escenarios de reúso (Pineda Buitrago, 2017; Valderrama Botía, 2021).

Aunque ambas plantas operan bajo realidades urbanas distintas, comparten problemáticas técnicas comunes: variabilidad hidráulica y orgánica, requerimientos de estabilización de procesos biológicos, gestión integral de lodos y control de externalidades. Estas condiciones afectan directamente el cumplimiento normativo y la estabilidad, justifican la necesidad de comparar sus configuraciones, estrategias de operación y resultados documentados.

El propósito de este estudio es contrastar técnica y operativamente las PTAR de Juan Díaz y Tunja, describiendo sus trenes de tratamiento, analizando sus indicadores de desempeño y derivando lecciones de mejora aplicables a sitios urbanos latinoamericanos. A través de esta comparación se busca aportar una base técnica que facilite la toma de decisiones para modernización, optimización y transferencia de aprendizajes entre ambas realidades.

3. Estado del Arte y Análisis de Vigilancia Tecnológica

El problema que se identifica en la variabilidad de cargas y caudales, exigencias normativas crecientes, retos de operación (energía, olores) y gestión de lodos, exige tecnologías de tratamiento robustas ante la inestabilidad, prácticas estables y sistemas de monitoreo y control que garanticen el cumplimiento continuo. En este marco, una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) se estructura típicamente en línea de agua y línea de lodos, comprendiendo etapas de pretratamiento (desbaste, desarenado), tratamiento

primario (sedimentación), secundario (procesos biológicos) y terciario o avanzado (pulimiento y desinfección), conforme a lineamientos como el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Sus características clave incluyen capacidad hidráulica definida, eficiencia de remoción de DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días), SST (Sólidos Suspendidos Totales) y nutrientes, estabilidad operacional, flexibilidad ante cargas variables y cumplimiento de estándares como la resolución 0631 de 2015 que establece los parámetros y valores máximos permisibles para los vertimientos a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillado público. A nivel de tratamiento secundario, los **lodos activados** constituyen un proceso biológico aerobio basado en biomasa suspendida, donde microorganismos degradan materia orgánica y nutrientes bajo condiciones controladas de oxígeno disuelto, edad del fango (SRT) y carga orgánica. Este sistema se caracteriza por alta eficiencia de remoción, sensibilidad a choques hidráulicos/orgánicos y necesidad de control riguroso y recirculación de lodos. A nivel internacional y regional, las configuraciones con remoción biológica de nutrientes (BNR) se han posicionado por su eficacia y escalabilidad cuando se optimizan variables mediante sensoria en línea y automatización.

En Latinoamérica, los esquemas UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket - Reactor anaeróbico de flujo ascendente con manto de lodos) con postratamiento aeróbico se han difundido por su bajo consumo energético y la estabilización anaerobia previa, aunque requieren etapas de pulimiento para alcanzar límites exigentes y demandan medidas específicas para mitigar emisiones odoríferas. Paralelamente, los reactores biológicos de membrana (MBR) ofrecen efluentes de alta calidad y huella compacta en contextos de reúso o cuerpos receptores sensibles, con la contrapartida de gestionar el ensuciamiento y el consumo específico de energía; en modernizaciones, las soluciones híbridas tipo (

Integrated Fixed-Fil Activated Sludge – Lodo activado por película fija integrada) IFAS/MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor – Reactor de lecho móvil con biopelícula) incrementan biomasa y estabilidad de nitrificación sin ampliaciones significativas de volumen.

Adicionalmente, existen otras unidades y tecnologías de tratamiento que complementan o sustituyen esquemas convencionales, tales como lagunas de estabilización, humedales construidos, filtros percoladores, reactores anaerobios distintos al UASB, sistemas de filtración terciaria (arena, discos), desinfección (cloración, UV) y procesos avanzados de oxidación, cuya selección depende de criterios técnicos, económicos y regulatorios.

Transversalmente, la tendencia dominante es la automatización de aireación y recirculaciones mediante indicadores en tiempo real como oxígeno disuelto, amonio, nitratos, potencial redox, lo que reduce sobre aireación, estabiliza el proceso biológico ante choques hidráulicos u orgánicos y mejora la eficiencia energética. La línea de lodos resulta determinante en costos, cumplimiento y aceptación social: la integración de espesado, estabilización (aerobia/anaerobia), deshidratación y rutas de valorización como compostaje controlado o co-procesamiento, debe acompañarse de estrategias sistemáticas de control de olores (sellos, cubiertas, biofiltros o carbón activado). En plantas de mayor escala, la recuperación energética a partir de biogás contribuye a la resiliencia operativa y a la reducción de la huella ambiental.

Aplicado a los casos de estudio, una planta basada en BNR (Biological Nutrient Removal – Remoción biológica de nutrientes), requiere flexibilidad operativa y control avanzado para absorber estacionalidad y variabilidad del afluente, mientras que una configuración UASB + aeróbico necesita postratamientos robustos para asegurar el cumplimiento estable de DBO_5 , SST y nutrientes, junto con planes de manejo de olores. Cuando el cuerpo receptor es sensible o se

persigue el reúso, las alternativas de pulimiento intensivo incluido MBR o filtración terciaria con desinfección UV elevan la calidad de efluente y reducen riesgos regulatorios. De esta lectura se desprende una agenda de vigilancia prioritaria: retrofits BNR→IFAS/MBBR para estabilizar nitrificación; estrategias de control en tiempo real para aireación y recirculaciones; MBR de menor consumo con prácticas anti-ensuciamiento; gestión integral de lodos con valorización y mitigación de olores; y protocolos de operación resiliente frente a eventos de lluvia o infiltración. Estas líneas responden directamente al problema definidos, y orientan decisiones tecnológicas y operativas para las plantas analizadas.

4. Planteamiento del Problema de Investigación

Las plantas de tratamiento de aguas residuales de Juan Díaz (Panamá) y Tunja (Colombia) enfrentan retos comunes asociados a los cambios de caudales, las cargas orgánicas fluctuantes y el cumplimiento sostenido de los límites de vertimiento. La literatura reporta que en Juan Díaz la estacionalidad del afluente afecta la estabilidad del tratamiento biológico, requiriendo estrategias más robustas y control avanzado para mantener la eficiencia de remoción (Soto & Saavedra, 2015; CAF, 2025). En Tunja, los diagnósticos evidencian dificultades vinculadas al pulimiento del efluente, la gestión de olores y la necesidad de modernizar procesos para mejorar consistencia operativa y percepción comunitaria (Pineda Buitrago, 2017; Valderrama Botía, 2021).

Aunque ambas plantas cumplen funciones sanitarias esenciales, no existe una comparación técnica normalizada que permita evaluar bajo criterios equivalentes el desempeño de sus procesos, su eficiencia energética y la eficacia de sus líneas

de lodos frente a los requerimientos regulatorios. La ausencia de una evaluación comparativa homogénea impide identificar con claridad qué prácticas, configuraciones tecnológicas o estrategias de control podrían transferirse entre ambas realidades para cerrar brechas de cumplimiento y mejorar la estabilidad del sistema bajo escenarios de variación hidráulica u orgánica.

En este contexto surge el problema central de investigación: ¿en qué medida las configuraciones actuales de las PTAR Juan Díaz y Tunja logran un desempeño estable y sostenible en términos de calidad del efluente, operación y manejo de lodos, y qué oportunidades de mejora técnica y operacional pueden derivarse a partir de una comparación normalizada?

Para abordarlo, el estudio se orienta a: (i) caracterizar y contrastar los trenes de proceso, tanto en línea de agua como de lodos; (ii) comparar indicadores clave de desempeño documentados en cada planta; y (iii) derivar recomendaciones basadas en evidencia que faciliten procesos de modernización y optimización en sitios urbanos latinoamericanos.

5. Justificación de la Propuesta e Identificación y Descripción del Conocimiento que Generará la misión académica internacional

La comparación técnica entre las PTAR Juan Díaz y Tunja se justifica por su importancia sanitaria y ambiental en el contexto latinoamericano, donde las plantas deben enfrentar cambio de cargas, límites de vertimiento estrictos y desafíos de eficiencia energética y manejo de lodos. Una evaluación comparativa permite identificar brechas, fortalecer prácticas y orientar mejoras costo-efectivas que aumenten estabilidad y cumplimiento normativo.



Desde la formación profesional, este estudio potencia competencias en análisis de procesos, gestión de activos y toma de decisiones basadas en evidencia. Además, aporta un marco metodológico reproducible para comparar PTAR, integrando criterios de normalización, análisis de incertidumbre y plantillas de evaluación. La misión académica también genera guías ejecutivas de uso inmediato, control de aireación, monitoreo crítico y lineamientos de manejo de lodos y permite documentar prácticas reales mediante interacción con operadores y especialistas.

En conjunto, la propuesta ofrece evidencia útil para modernizar plantas en la región, fortalecer su sostenibilidad y apoyar decisiones institucionales sobre tecnologías y estrategias de gestión.

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Comparar técnica y operativamente las plantas de tratamiento de aguas residuales de Juan Díaz (Panamá) y Tunja (Colombia), con el fin de evaluar su desempeño en términos de calidad del efluente, operación y manejo de lodos, e identificar oportunidades de mejora aplicables a sitios urbanos latinoamericanos.

6.2 Objetivos específicos

- Caracterizar y contrastar los trenes de proceso de ambas plantas, considerando línea de agua y línea de lodos, así como sus principales unidades y configuraciones.
- Analizar los indicadores de desempeño reportados (remoción de DBO_5 , DQO, SST y nutrientes, consumo específico de energía, producción de lodos, entre otros) para cada planta.



- Evaluar el grado de cumplimiento de los parámetros de vertimiento frente a la normativa vigente en Panamá y Colombia, destacando brechas y fortalezas en cada caso.
- Identificar acciones de mejora técnica y operativa de baja, media y alta inversión que contribuyan a optimizar el desempeño de las plantas, con énfasis en el contexto colombiano.
- Proponer lineamientos generales que puedan orientar procesos de modernización y toma de decisiones en otras PTAR de la región con condiciones similares.

7. Métodos (visitas técnicas a laboratorios, talleres, seminarios)

La metodología se estructura por métodos orientados a cada objetivo, no como una secuencia cronológica. Integra: i) revisión técnica y normativa para caracterizar procesos y límites de vertimiento; ii) trabajo de campo (visitas técnicas) para observar operación y control; iii) levantamiento de información experta (entrevistas breves y talleres); y iv) análisis comparativo con indicadores normalizados (m^3 tratado, habitante-equivalente, kg DBO₅ removido), resguardando trazabilidad y control de calidad de datos.

Revisión documental y normativa (para los objetivos de caracterización y comparación regulatoria)

- Compilación de memorias de diseño, reportes operacionales, manuales O&M, y registros de monitoreo de efluente/afluente.
- Sistematización de límites de vertimiento y guías técnicas aplicables en Colombia y Panamá, para construir la matriz de cumplimiento por parámetro (DBO₅, DQO, SST, N, P, coliformes).



- Resultado: fichas técnicas por planta y tabla comparativa de exigencias normativas.

Visitas técnicas a plantas y laboratorios (para validar configuración, operación y control de proceso)

- Recorridos guiados por línea de agua (pretratamiento, tratamiento biológico, terciario/desinfección) y línea de lodos (espesado, estabilización, deshidratación, disposición/valorización).
- Observación de instrumentación y control (OD, amonio, nitratos, ORP), set-points y estrategias de aireación/recirculaciones.
- Verificación en laboratorio (in situ o de apoyo) de parámetros críticos seleccionados y confirmación de métodos analíticos reportados por la operación.
- Evidencia: listas de chequeo, registros fotográficos autorizados y bitácoras de visita con hallazgos y restricciones.

8. Aplicación en Colombia

La comparación técnica entre la PTAR Juan Díaz y la PTAR Tunja permite identificar aprendizajes directamente transferibles al ambiente colombiano, particularmente en sistemas con variabilidad hidráulica y de carga que condicionan la estabilidad de los procesos. En este sentido, la experiencia de Juan Díaz evidencia la necesidad de implementar estrategias de control avanzado en tiempo real, especialmente en la gestión de aireación y recirculaciones internas, orientadas a mantener condiciones óptimas de



operación (oxígeno disuelto, SRT, cargas volumétricas) frente a fenómenos de estacionalidad, infiltración y aportes no controlados.

En segundo lugar, la configuración observada en Tunja pone de manifiesto la importancia de incorporar etapas de tratamiento terciario o de pulimiento que permitan cerrar brechas frente a los límites establecidos en la Resolución 0631 de 2015, particularmente en términos de DBO_5 , SST y nutrientes. En este texto, la evidencia comparada respalda la adopción progresiva de tecnologías como filtración terciaria, desinfección avanzada (UV/cloración) y soluciones híbridas tipo IFAS/MBBR, las cuales incrementan la resiliencia del sistema y la estabilidad de procesos como la nitrificación, sin requerir ampliaciones sustanciales de infraestructura.

Asimismo, el análisis evidencia que la línea de lodos constituye un eje crítico de desempeño técnico, económico y social. Las prácticas implementadas en Juan Díaz incluyendo estabilización (anaerobia/aerobia), deshidratación y control de emisiones odoríferas se alinean con los lineamientos del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y representan referentes aplicables para optimizar la gestión integral de biosólidos en PTAR colombianas, particularmente en escenarios con restricciones de disposición final y conflictos socioambientales.

Finalmente, la comparación resalta una brecha estructural en la gestión de información y control operacional, evidenciando la necesidad de fortalecer sistemas de monitoreo mediante instrumentación en línea (OD , NH_4 , NO_3 , ORP) y protocolos estandarizados de seguimiento. La adopción de indicadores operativos y herramientas de control basadas en datos permite reducir la incertidumbre operacional y mejorar la toma de decisiones por parte de operadores, prestadores de servicio y autoridades ambientales.

En conjunto, estos elementos configuran una ruta de aplicación en Colombia orientada a cerrar la brecha entre condiciones reales de operación y exigencias regulatorias, mediante la integración de tecnologías resilientes, control avanzado y gestión optimizada de lodos, en coherencia con las limitaciones técnicas, económicas y de escala propias de las PTAR del país.

9. Resultados Esperados

Los resultados esperados del estudio apuntan a generar un insumo técnico comparativo que aporte claridad sobre el desempeño actual de las PTAR Juan Díaz y Tunja, así como sobre las oportunidades reales de optimización bajo condiciones operativas latinoamericanas. En primer lugar, se espera obtener una caracterización estructurada de los trenes de proceso de ambas plantas, diferenciando líneas de agua y lodos, e identificando las unidades que resultan más determinantes para la estabilidad del tratamiento frente a variaciones hidráulicas y orgánicas.

En segundo lugar, el estudio producirá una matriz comparativa de indicadores de desempeño, incluyendo remoción de DBO_5 , DQO, SST, nutrientes, consumo específico de energía y generación de lodos. Esta matriz permitirá identificar brechas de eficiencia y cumplimiento, así como fortalezas operativas que puedan ser replicadas o adaptadas a otros contextos, especialmente en plantas colombianas con características similares.

Un tercer resultado esperado es la identificación de un conjunto de acciones de mejora técnica y operativa, clasificadas por nivel de inversión (baja, media y alta). Estas recomendaciones se fundamentarán en evidencia documentada y considerarán tanto los límites regulatorios locales como la viabilidad de implementación en entornos municipales o empresas prestadoras. Entre ellas podrán incluirse ajustes en aireación, control de recirculaciones, incorporación de

unidades de pulimiento, estrategias de mitigación de olores y mejoras en la gestión de lodos.

Finalmente, se espera generar lineamientos metodológicos transferibles, que incluyan plantillas de análisis, criterios de normalización y marcos de decisión aplicables en otros estudios comparativos o procesos de modernización de PTAR en Colombia y la región. En conjunto, estos resultados proporcionarán una base sólida para futuras fases de diseño, optimización o actualización tecnológica.

10. Conclusiones

La comparación técnica entre las PTAR Juan Díaz (Panamá) y Tunja (Colombia) evidencia que, aunque operan bajo contextos urbanos y regulatorios distintos, comparten un conjunto de desafíos que afectan la estabilidad del tratamiento biológico, la calidad del efluente y la gestión de lodos. Los análisis muestran que la variabilidad de caudales y cargas constituye un factor crítico en ambos casos, requiriendo estrategias operativas robustas y sistemas de control capaces de responder con flexibilidad a condiciones cambiantes.

Los hallazgos señalan que las plantas basadas en procesos aeróbicos con remoción biológica de nutrientes, como Juan Díaz, demandan un control fino de oxígeno disuelto, recirculaciones y edad del fango para mantener la eficiencia de remoción; mientras que instalaciones con trenes anaerobios más simples, como Tunja, requieren etapas de pulimiento y acciones específicas para mitigar olores y asegurar un cumplimiento estable de los límites de vertimiento. Esta diferencia tecnológica constituye un punto clave para orientar decisiones de modernización y priorizar intervenciones según el contexto.

Asimismo, el ejercicio comparativo permite identificar oportunidades de mejora aplicables al entorno colombiano, destacando la relevancia de fortalecer

unidades de pulimiento, mejorar la gestión de lodos y avanzar en esquemas de automatización que optimicen la eficiencia energética y reduzcan la variación. La sistematización de indicadores y criterios de evaluación también constituye un aporte metodológico que puede ser replicado en otras PTAR de la región.

En términos generales, la comparación proporciona una base técnica sólida para apoyar procesos de optimización y orientar futuras etapas de diseño o actualización tecnológica. Los resultados obtenidos permiten identificar brechas, reconocer buenas prácticas y proponer rutas de intervención realistas y graduales, contribuyendo a mejorar la sostenibilidad de las plantas y el cumplimiento de los objetivos ambientales en lugares urbanos latinoamericanos.

11. Referencias

CAF. (2025). *Programa de saneamiento de la ciudad y bahía de Panamá: Segundo módulo de la planta de tratamiento de aguas residuales de Juan Díaz* [Informe técnico]. CAF – Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe.

Pineda Buitrago, L. L. (2017). *Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de Tunja – Boyacá* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia].

Soto, E., & Saavedra, C. (2015). Influencia de la variación estacional de la calidad y cantidad de agua residual en la eficiencia de tratamiento: Caso PTAR Juan Díaz, Panamá. *Revista de Iniciación Científica*, 1(2), 7–10.

Valderrama Botía, Y. T. (2021). *Plan para la reducción del impacto por olores ofensivos generados en la PTAR para la empresa Veolia Aguas de Tunja S.A. E.S.P.* [Trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia].

