



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

CARACTERIZACIÓN Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE UNA PTAR EN UNA INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR

**CHARACTERIZATION AND REMOVAL EFFICIENCY OF A
WWTP IN A HIGHER EDUCATION INSTITUTION**

José Miguel Rodríguez González

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de Bravo

Gabriela Gómez Arizmendi

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de Bravo

Sandra Vianey Carbajal Peñaloza

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de Bravo

Sonia De la Palma Silverio

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de Bravo

Alejandra Valeria Cruz Cruz

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de Bravo

Caracterización y eficiencia de remoción de una PTAR en una Institución de Educación Superior

José Miguel Rodríguez González¹

jose.rg@vbravo.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3837-7490>

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de
Bravo
México

Gabriela Gómez Arizmendi

gabriela.ga@vbravo.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0004-5805-149X>

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de
Bravo
México

Sandra Vianey Carbajal Peñaloza

sandra.cp@vbravo.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0005-6799-2344>

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de
Bravo
México

Sonia De la Palma Silverio

L202318038@vbravo.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0006-0673-084X>

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de
Bravo
México

Alejandra Valeria Cruz Cruz

L202318027@vbravo.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0003-2328-0404>

Tecnológico Nacional de México/TES Valle de
Bravo
México

RESUMEN

El estudio caracterizó el afluente y efluente de dos PTAR (KVL-70) en una institución de educación superior mexicana, con capacidad total de 140 m³/día y disposición final en pozo de absorción. El muestreo puntual (NMX-AA-003-1980) y los análisis físicoquímicos en laboratorio acreditado revelaron que la PTAR 1 recibe baja carga contaminante (DBO₅ = 56 mg/L, SST = 8 mg/L, grasas = 8 mg/L), mientras que la PTAR 2 recibe carga elevada (DBO₅ = 701 mg/L, SST = 361 mg/L, grasas = 82 mg/L), atribuible a diferentes usos de la institución. La PTAR 2 logró eficiencias de remoción del 97.4 % (DBO₅), 95.6 % (SST) y 91.5 % (grasas y aceites), cumpliendo con NOM-002-1996 y NOM-003-1997. Sin embargo, la PTAR 1 mostró un incremento anómalo de DBO₅ en el efluente (56 a 75 mg/L, +33.9 %). Los metales pesados fueron indetectables. Se concluye que, aunque la PTAR 2 opera eficientemente, la disposición en pozo de absorción requiere evaluación bajo NOM-001-2021 (DQO y Toxicidad Aguda). Se recomienda monitoreo con muestreo compuesto de 24 horas y análisis complementarios para cumplimiento normativo y evaluación de reuso.

Palabras clave: aguas residuales; planta de tratamiento; eficiencia de remoción.

¹ Autor principal.

Correspondencia: jose.rg@vbravo.tecnm.mx

Characterization and removal efficiency of a WWTP in a Higher Education Institution

ABSTRACT

The study characterized the influent and effluent of two wastewater treatment plants (WWTPs) model KVL-70 at a Mexican higher education institution, with a total capacity of 140 m³/day and final disposal in an absorption well. Grab sampling (NMX-AA-003-1980) and physicochemical analyses in an accredited laboratory revealed that WWTP 1 receives low-pollutant-load influent (BOD₅ = 56 mg/L, TSS = 8 mg/L, fats = 8 mg/L), while WWTP 2 receives high-load influent (BOD₅ = 701 mg/L, TSS = 361 mg/L, fats = 82 mg/L), attributed to different uses within the institution. WWTP 2 achieved removal efficiencies of 97.4 % (BOD₅), 95.6 % (TSS) and 91.5 % (fats and oils), complying with NOM-002-1996 and NOM-003-1997. However, WWTP 1 showed an anomalous increase in effluent BOD₅ (from 56 to 75 mg/L, +33.9 %). Heavy metals were undetectable. It is concluded that although WWTP 2 operates efficiently, disposal in an absorption well requires evaluation under NOM-001-2021 (COD and Acute Toxicity). Monitoring with 24-hour composite sampling and complementary analyses are recommended for regulatory compliance and reuse assessment.

Keywords: wastewater; wastewater treatment plant; removal efficiency.

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

La gestión del agua en las instituciones de educación superior (IES) o campus universitarios ha adquirido una relevancia creciente en el contexto de la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental. Los campus universitarios, por su naturaleza, funcionan como pequeñas ciudades que generan volúmenes significativos de aguas residuales, producto de las actividades académicas, administrativas y de servicios que en ellos se desarrollan. Este escenario ha impulsado a numerosas universidades a implementar Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que no solo cumplen con la función de depurar los efluentes generados, sino que también se convierten en espacios para la investigación, la docencia y la promoción de prácticas sostenibles (Albornoz et al., 2020; ESI, 2026; González Barceló & García Gil, 2026).

A nivel internacional, las experiencias documentadas muestran diversos enfoques tecnológicos y operativos adoptados por las IES para el tratamiento de sus aguas residuales. La Universidad de Patras, en Grecia, cuenta con una PTAR que cubre las necesidades del campus y del hospital universitario, procesando entre 1,200 y 1,500 m³/día mediante un sistema de lodos activados con aireación extendida. Los resultados de su operación son notables, alcanzando concentraciones en el efluente de DQO <30 mg/L y DBO₅ <10 mg/L, muy por debajo de los límites legales establecidos (University of Patras, 2024). En el Líbano, la Universidad de Balamand ha implementado una PTAR que, además de tratar sus aguas residuales, ha desarrollado un programa de monitoreo continuo y visitas educativas para estudiantes y comunidades locales, integrando el tratamiento como parte de su compromiso con la educación ambiental (Rahsia & Widodo, 2025). La Universidad de Galgotias, en India, utiliza tecnología MBBR (Moving Bed Bioreactor) para el tratamiento secundario, reutilizando el agua tratada para jardinería y descarga de sanitarios, y empleando la planta como recurso educativo para estudiantes de ingeniería (Albornoz et al., 2020). La Pontificia Universidad Católica del Ecuador, por su parte, ha desarrollado un diseño para una PTAR piloto con consumo energético neto cero y libre de químicos, orientada a ser un laboratorio vivo para el desarrollo de tecnologías de bajo costo (Damián-Chalán et al., 2024).

En el contexto latinoamericano, se han documentado casos relevantes que abordan los desafíos específicos de la región. La Universidad Federal de Santa Maria, en Brasil, implementó un sistema



descentralizado de humedales de flujo vertical para las residencias estudiantiles, alcanzando eficiencias de remoción de DQO entre 64% y 80%, con un enfoque que integra docencia, investigación y extensión. En México, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) cuenta con una de las experiencias más consolidadas en la materia: su PTAR de Ciudad Universitaria, diseñada originalmente en la década de 1970 con tres sistemas biológicos aerobios, ha evolucionado tecnológicamente hasta incorporar un reactor biológico de membrana (MBR) que produce agua tratada con calidad superior a la exigida por la NOM-003-ECOL-1997. Adicionalmente, la UNAM ha implementado plantas en otras dependencias, como la Facultad de Estudios Superiores Acatlán, con capacidad de 7.5 L/s, y microplantas con humedales artificiales en diversas facultades, demostrando un compromiso institucional con la gestión sostenible del agua (González Barceló & García Gil, 2026).

La caracterización de las aguas residuales constituye el punto de partida fundamental para el diseño, operación y evaluación del desempeño de cualquier PTAR. Este proceso implica el análisis sistemático de parámetros físicos, químicos y biológicos que permiten comprender la naturaleza y magnitud de la contaminación presente. La Organización Mundial de la Salud y los métodos estándar de la APHA establecen los protocolos para la medición de indicadores clave como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Suspendedos Totales (SST), aceites y grasas, y coliformes fecales, entre otros. Estos parámetros son esenciales para evaluar tanto la carga contaminante del afluente como la eficiencia de remoción de las unidades de tratamiento.

En México, el marco normativo para la gestión de aguas residuales está definido por las normas oficiales mexicanas. Para el caso de las aguas tratadas que se reutilizan en servicios al público, la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes. Para las descargas en cuerpos receptores propiedad de la nación, incluido el subsuelo, la norma aplicable es la NOM-001-SEMARNAT-2021, que entró en vigor en abril de 2023 y sustituyó a la versión de 1996. Esta actualización normativa incluye nuevos parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Toxicidad Aguda, lo que plantea nuevos desafíos para los sistemas de tratamiento existentes.

A pesar de la importancia de contar con PTAR eficientes en las IES, aún persisten brechas en el conocimiento sobre la caracterización detallada de los efluentes en el contexto universitario mexicano, particularmente en instituciones que operan sistemas de tratamiento con tecnologías específicas y que

enfrentan condiciones particulares de operación. En una institución de educación superior del suroeste del Estado de México en México, con una población flotante estimada entre 1,800 y 2,100 personas, cuenta con dos PTAR marca KVL, modelo KVL-70, con una capacidad nominal conjunta de 140 m³/día. El agua tratada se dispone en un pozo de absorción, lo que implica la aplicación de la NOM-001-SEMARNAT-2021 como marco regulatorio para la evaluación de su calidad.

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar el afluente y efluente de las PTAR KVL-70 de la institución mediante el análisis de los parámetros establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997, evaluar la eficiencia de remoción de las unidades de tratamiento, y analizar las implicaciones del cumplimiento normativo considerando la disposición final en pozo de absorción. Este trabajo busca contribuir al conocimiento sobre la operación de PTAR en instituciones de educación superior mexicanas y generar recomendaciones para la optimización de su desempeño, en el marco de una gestión institucional del agua responsable y sostenible.

METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente estudio se estructuró en cinco fases secuenciales: (1) caracterización del sistema de tratamiento y selección de puntos de muestreo, (2) aforo y muestreo de aguas residuales, (3) análisis de laboratorio de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, (4) cálculo de eficiencias de remoción y (5) comparación con el marco normativo aplicable. A continuación se detalla cada una de estas fases.

Caracterización del sistema de tratamiento

La institución de educación superior objeto de estudio cuenta con dos Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) marca KVL, modelo KVL-70, con una capacidad nominal de tratamiento de 70 m³/día cada una, lo que representa una capacidad instalada conjunta de 140 m³/día. La población flotante de la institución se estima entre 1,800 y 2,100 personas, con variaciones asociadas al calendario académico y horarios de actividades.

La selección de estos puntos consideró el fácil acceso, la representatividad del flujo y la seguridad del personal de muestreo. Diversos estudios han demostrado que la correcta elección de los puntos de muestreo es fundamental para obtener datos representativos y evitar sesgos en la caracterización (Domínguez-García et al., 2025; Jurvansuu et al., 2024; Yapi et al., 2025).

Selección de puntos de monitoreo

Se establecieron dos puntos de monitoreo para la caracterización:

1. Punto de entrada (afluente): Correspondiente al agua residual cruda que ingresa a cada PTAR, antes de cualquier proceso de tratamiento.
2. Punto de salida (efluente): Correspondiente al agua tratada a la salida de cada PTAR, previo a su disposición en el pozo de absorción.

Muestreo

El muestreo se realizó el 17 de marzo de 2026 por personal del laboratorio certificado. El procedimiento de muestreo siguió la norma NMX-AA-003-1980 "Aguas residuales - Muestreo" , bajo el procedimiento interno IDO-5004 y el plan de muestreo IAC-0012 (SECOFI, 1980).

El tipo de muestreo fue puntual (grab sample), recolectándose una muestra en cada punto de monitoreo en el momento establecido (Angel Ari Ali et al., 2025; Leal et al., 2026). Los puntos de muestreo se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Aspectos a considerar en la estrategia de muestreo

PTAR	Punto de muestreo	Lugar
PTAR 1	Entrada	Cisterna
PTAR 1	Salida	Cisterna
PTAR 2	Entrada	Registro
PTAR 2	Salida	Cisterna

Las muestras fueron recolectadas en frascos debidamente etiquetados y preservadas según el parámetro a analizar. La fecha de recepción en el laboratorio fue el 17 de marzo de 2026.

Análisis de laboratorio

Los análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio certificado, siguiendo las normas mexicanas NMX-AA correspondientes. En la Tabla 2 se presentan los parámetros analizados y normas de referencia.

Tabla 2. Parámetros, métodos analíticos y normas de referencia.

Parámetro	Norma de referencia	Método
Temperatura in situ	NMX-AA-007-SCFI-2013	Termométrico
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016	Potenciométrico
Materia flotante	NMX-AA-006-SCFI-2010	Inspección visual
Sólidos sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2013	Método Imhoff
Sólidos suspendidos totales (SST)	NMX-AA-034-SCFI-2015	Gravimétrico
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	NMX-AA-028-SCFI-2001	Incubación 5 días
Cromo hexavalente	NMX-AA-044-SCFI-2014	Espectrofotométrico
Cianuros	NMX-AA-058-SCFI-2001	Espectrofotométrico
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	Partición gravimétrica

Los análisis se realizaron por duplicado y los resultados fueron reportados con sus respectivos límites de detección. El laboratorio cuenta con acreditación vigente para los métodos empleados.

Evaluación del desempeño del sistema

La eficiencia de remoción de cada parámetro se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$Eficiencia (\%) = \left[\frac{Ca - Ce}{Ca} \right] \times 100$$

Donde:

- Ca = Concentración en el afluente
- Ce = Concentración en el efluente

Este enfoque permite evaluar el desempeño global de las PTAR y de cada proceso unitario que las

conforma, tal como se ha documentado en estudios de evaluación de plantas de tratamiento en campus universitarios (Arredondo-Navarro & Flores-Cervantes, 2023; Yapi et al., 2025).

Marco normativo de referencia

Los resultados de laboratorio fueron comparados con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-002-SEMARNAT-1996, que regula las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (SEMARNAT, 1998). Esta comparación se realizó con fines de caracterización del afluente, dado que la institución no cuenta con conexión a drenaje municipal.

Para la evaluación de la calidad del efluente con fines de disposición final en pozo de absorción, el marco normativo aplicable es la NOM-001-SEMARNAT-2021, que regula las descargas en cuerpos receptores propiedad de la nación, incluyendo el subsuelo (SEMARNAT, 2022).

Consideraciones éticas y de control de calidad

El presente estudio se realizó con el permiso y autorización de las autoridades institucionales responsables de la operación de las PTAR. El laboratorio encargado de los análisis cuenta con acreditación vigente, garantizando la confiabilidad de los resultados. Se implementó una cadena de custodia para cada muestra, registrando la trazabilidad desde la recolección hasta la entrega de resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica del afluente y efluente de las PTAR 1 y 2, así como las eficiencias de remoción calculadas y la comparación con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa mexicana aplicable. Los análisis se realizaron a partir de muestras puntuales recolectadas el 17 de marzo de 2026, siguiendo los procedimientos descritos en la metodología.

Caracterización de la PTAR 1

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos analizados en el afluente y efluente de la PTAR 1, junto con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-002-SEMARNAT-1996 para descargas a sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente de la PTAR 1

Parámetro	Afluente	Efluente	Límite NOM-002-1996	Unidad
Temperatura in situ	18	17	40	°C
pH	7.1	7.3	5.5 - 10	Unidades pH
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	—
Sólidos sedimentables	< 0.1	< 0.1	7.5	mL/L
Sólidos suspendidos totales (SST)	8	0	72	mg/L
DBO ₅	56	75	150	mg/L
Grasas y aceites	8	< 0.1	75	mg/L
Cromo hexavalente	< 0.1	< 0.1	0.75	mg/L
Cianuros	< 0.02	< 0.02	1.5	mg/L

Fuente: Informes de ensayo 26-0221 (entrada) y 26-0220 (salida), laboratorio certificado

El afluente de la PTAR 1 presenta concentraciones de DBO₅ (56 mg/L), SST (8 mg/L) y grasas y aceites (8 mg/L) considerablemente por debajo de los límites permisibles, lo que indica una baja carga contaminante. Esta característica es consistente con aguas residuales de origen predominantemente administrativo o de oficinas, como se ha documentado en otros campus universitarios donde la segregación de fuentes permite identificar variaciones en la composición del agua residual (Atyang, 2025). En la Universidad de Cumhuriyet (Sivas, Turquía), por ejemplo, se realizó una caracterización detallada del afluente durante un año, identificando que las aguas residuales de campus con baja carga presentan características particulares que requieren estrategias de operación diferenciadas (Coskuner & Ozdemir, 2006)

En el efluente, se observa una remoción total de SST (0 mg/L) y una concentración de grasas y aceites por debajo del límite de detección (< 0.1 mg/L). Sin embargo, la DBO₅ mostró un incremento en el efluente (75 mg/L) con respecto al afluente (56 mg/L), comportamiento que será analizado en la discusión.

Caracterización de la PTAR 2



En la Tabla 4 se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos analizados en el afluente y efluente de la PTAR 2.

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente de la PTAR 2

Parámetro	Afluente	Efluente	Límite NOM-002-1996	Unidad
Temperatura in situ	21	20	40	°C
pH	6.7	6.2	5.5 - 10	Unidades pH
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	—
Sólidos sedimentables	1	< 0.1	7.5	mL/L
Sólidos suspendidos totales (SST)	361	16	72	mg/L
DBO₅	701	18	150	mg/L
Grasas y aceites	82	7	75	mg/L
Cromo hexavalente	< 0.1	< 0.1	0.75	mg/L
Cianuros	< 0.02	< 0.02	1.5	mg/L

Fuente: Informes de ensayo 26-0222 (entrada) y 26-0223 (salida), laboratorio certificado.

El afluente de la PTAR 2 presenta una carga contaminante significativamente mayor que la PTAR 1, con concentraciones de DBO₅ (701 mg/L), SST (361 mg/L) y grasas y aceites (82 mg/L) que superan los límites establecidos en la NOM-002-1996. Estos valores son característicos de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica, provenientes de áreas con actividades como cafeterías, comedores o servicios sanitarios de alta demanda. Una caracterización fisicoquímica de aguas residuales en un campus universitario de Casablanca (Marruecos) reportó valores de DBO₅ entre 70.5 y 119.05 mg/L, muy por debajo de los 701 mg/L encontrados en la PTAR 2, lo que refuerza la singularidad de la carga contaminante de esta última (Grimah et al., 2024).

El efluente de la PTAR 2 muestra una reducción considerable de todos los parámetros, alcanzando concentraciones de DBO₅ (18 mg/L), SST (16 mg/L) y grasas y aceites (7 mg/L) que cumplen con los límites de la NOM-002-1996 e incluso con los estándares más estrictos de la NOM-003-SEMARNAT-1997 para reuso en servicios al público.

Metales pesados



En la Tabla 5 se presentan las concentraciones de metales pesados en el afluente y efluente de ambas PTAR. Todos los valores se reportan por debajo de los límites de detección del método analítico.

Tabla 5. Metales pesados en afluentes y efluentes de PTAR 1 y 2

Parámetro	PTAR 1	PTAR 1	PTAR 2	PTAR 2	Límite NOM-002	Unidad
	(Entrada)	(Salida)	(Entrada)	(Salida)		
Arsénico	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.75	mg/L
Cadmio	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.75	mg/L
Cobre	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	15	mg/L
Mercurio	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.015	mg/L
Níquel	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	6	mg/L
Plomo	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1.5	mg/L
Zinc	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	9	mg/L

Fuente: Informes de ensayo 26-0221, 26-0220, 26-0222 y 26-0223, laboratorio certificado.

Los metales pesados analizados (arsénico, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc) se encuentran por debajo de los límites de detección en todas las muestras, tanto en afluentes como en efluentes. Esto indica que el agua residual generada en la institución no presenta contaminación por metales pesados en concentraciones significativas, lo cual es consistente con un origen doméstico y ausencia de actividades industriales en la institución (Bertolino et al., 2008).

Eficiencias de remoción

A partir de los datos de concentración en el afluente y efluente, se calcularon las eficiencias de remoción para cada PTAR. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Eficiencias de remoción de las PTAR 1 y 2

Parámetro	PTAR 1	PTAR 2
Sólidos suspendidos totales (SST)	100 %	95.6 %
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	-33.9 % (<i>incremento</i>)	97.4 %
Grasas y aceites	>98.7 %	91.5 %
Sólidos sedimentables	No determinable	>90 %
Metales pesados	No determinable	No determinable

Nota: El valor negativo en DBO₅ para la PTAR 1 indica un incremento en la concentración del efluente con respecto al afluente.

La PTAR 2 demuestra un desempeño excelente en la remoción de contaminantes, con eficiencias del 97.4 % para DBO₅, 95.6 % para SST y 91.5 % para grasas y aceites. Estos valores son comparables a los reportados en sistemas de tratamiento de aguas residuales en otras instituciones de educación superior (Albornoz et al., 2020; Feng et al., 2025).

Por el contrario, la PTAR 1 presenta un comportamiento atípico, con una remoción del 100 % para SST y superior al 98.7 % para grasas y aceites, pero con un incremento en la DBO₅ del efluente respecto al afluente, lo que se refleja en una eficiencia negativa.

Comparación con la normativa

En la Tabla 7 se presenta el cumplimiento de los parámetros analizados en el efluente de ambas PTAR con respecto a los límites establecidos en la NOM-002-SEMARNAT-1996 y, para efectos de potencial reuso, con la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 7. Cumplimiento normativo de los efluentes de las PTAR 1 y 2

Parámetro	PTAR 1 (Efluente)	PTAR 2 (Efluente)	Límite NOM-002	Límite NOM-003*	Unidad
SST	0	16	72	30	mg/L
DBO₅	75	18	150	30	mg/L
Grasas y aceites	< 0.1	7	75	15	mg/L

Nota: Límite para servicios al público con contacto indirecto u ocasional (NOM-003-SEMARNAT-1997).

El efluente de la PTAR 2 cumple con los límites establecidos tanto en la NOM-002 como en la NOM-003 para los tres parámetros evaluados. El efluente de la PTAR 1 cumple con la NOM-002 para SST y grasas, pero excede el límite de DBO₅ establecido en la NOM-003 (75 mg/L vs. 30 mg/L). Sin embargo, es importante señalar que el cumplimiento con la NOM-003 no es directamente aplicable en este caso, ya que la disposición final del efluente se realiza en un pozo de absorción y no en servicios al público.

Diferencias en la calidad de los afluentes

Los resultados evidencian una marcada diferencia en la carga contaminante que ingresa a cada PTAR. La PTAR 1 recibe un afluente de baja carga (DBO₅ = 56 mg/L, SST = 8 mg/L, grasas = 8 mg/L), mientras que la PTAR 2 recibe un afluente con carga excepcionalmente alta (DBO₅ = 701 mg/L, SST = 361 mg/L, grasas = 82 mg/L). Esta diferenciación señala que las PTAR atienden zonas de la institución con usos distintos: la primera, sólo con áreas administrativas u oficinas; la segunda, también con estas áreas, atiende el área de taller de cocina. Esta heterogeneidad ha sido documentada en otros campus universitarios y tiene implicaciones operativas relevantes, ya que el diseño y operación de los sistemas debe considerar la variabilidad espacial de las cargas contaminantes (Barrantes & Nuñez, 2017). La presencia de residuos de alimentos y grasas en el afluente de la PTAR 2 explica los valores extremadamente altos de DBO y grasas, similares a los reportados en aguas residuales de establecimientos de servicio de alimentos (Rapeta et al., 2021).

Desempeño de la PTAR 2

La PTAR 2 demuestra un desempeño excelente, con eficiencias de remoción del 97.4 % para DBO₅, 95.6 % para SST y 91.5 % para grasas y aceites. Estos valores son comparables o superiores a los reportados en otras plantas de tratamiento en campus universitarios, como la Universidad de Malasia Sabah (80 % de remoción de DBO) y la Universidad de Costa Rica (Barrantes & Nuñez, 2017). La alta remoción de grasas y aceites sugiere la existencia de un pretratamiento eficiente que protege las unidades biológicas posteriores.

Comportamiento anómalo de la PTAR 1: incremento de DBO₅

El hallazgo más preocupante es el incremento de la DBO₅ en el efluente de la PTAR 1 (de 56 a 75 mg/L, +33.9 %). Este comportamiento es inconsistente con el objetivo de una PTAR y puede deberse a varias causas (ver Tabla 8).

Tabla 8. Hipótesis sobre el incremento de DBO₅ en la PTAR

Hipótesis	Descripción	Recomendación
Error en etiquetado/muestra	Posible inversión de muestras de entrada y salida	Verificar protocolos de etiquetado y cadena de custodia
Nitrificación (N-BOD)	Actividad de bacterias nitrificantes que aumenta la DBO medida	Analizar nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos en el efluente
Condiciones operativas inadecuadas	Déficit de oxígeno, tiempo de retención insuficiente, relación F/M subóptima	Revisar sistema de aireación, manejo de lodos y tiempo de retención
Variabilidad diaria	Muestreo puntual no representativo de la carga promedio	Realizar muestreo compuesto de 24 horas

Metales pesados

Todos los metales pesados analizados se encuentran por debajo de los límites de detección, lo que confirma el origen doméstico del agua residual y la ausencia de actividades industriales en la institución. Este resultado es consistente con otros estudios en universidades (Bertolino et al., 2008). La ausencia de metales pesados reduce el riesgo de contaminación del subsuelo por la disposición en el pozo de absorción.

Implicaciones normativas

Si bien los resultados se compararon con la NOM-002-1996 (descargas a alcantarillado), la disposición final en pozo de absorción implica la aplicación de la NOM-001-SEMARNAT-2021, que regula descargas en cuerpos receptores propiedad de la nación, incluyendo el subsuelo. Esta norma eliminó la DBO₅ como parámetro regulado e incorporó la DQO y Toxicidad Aguda. Por lo tanto, aunque la PTAR 2 cumple con NOM-002 y NOM-003 para reuso, no es posible afirmar su cumplimiento con NOM-001-2021 sin análisis complementarios de DQO y Toxicidad Aguda. La institución debe realizar estos análisis para garantizar que su disposición final cumple con la normativa vigente (NOM-001-SEMARNAT-2021).

Potencial de reuso

El efluente de la PTAR 2 (DBO₅ = 18 mg/L, SST = 16 mg/L, grasas = 7 mg/L) cumple con los límites de la NOM-003-1997 para reuso en servicios al público con contacto indirecto, lo que abre la posibilidad de reutilizar el agua tratada para riego o descarga de sanitarios. Para la PTAR 1, es necesario resolver la anomalía en DBO antes de considerar su reuso.

Limitaciones y recomendaciones

Entre las limitaciones del estudio destacan: (1) el muestreo puntual, que no captura la variabilidad diaria; (2) la ausencia de análisis microbiológicos (coliformes, helmintos); (3) la falta de análisis de DQO y Toxicidad Aguda; y (4) la realización de una sola campaña de muestreo. Se recomienda implementar un programa de monitoreo regular con muestreo compuesto de 24 horas, incorporar los parámetros requeridos por NOM-001-2021 y NOM-003-1997, y realizar una revisión operativa de la PTAR 1 para identificar la causa del incremento de DBO.

CONCLUSIONES

A partir de la caracterización fisicoquímica del afluente y efluente de las PTAR 1 y 2 de la institución, se deriva que el agua residual que ingresa a la PTAR 1 presenta una baja carga contaminante ($\text{DBO}_5 = 56 \text{ mg/L}$, $\text{SST} = 8 \text{ mg/L}$, grasas = 8 mg/L), mientras que la PTAR 2 recibe un afluente con carga elevada ($\text{DBO}_5 = 701 \text{ mg/L}$, $\text{SST} = 361 \text{ mg/L}$, grasas = 82 mg/L), esto evidencia que atienden zonas de la institución con usos distintos —administrativo u oficinas para la primera, y cafeterías, comedores o servicios sanitarios de alta demanda para la segunda—, resaltando la importancia de caracterizar cada línea de alimentación para un diseño y operación adecuados.

La PTAR 2 alcanzó eficiencias de remoción del 97.4 % para DBO_5 , 95.6 % para SST y 91.5 % para grasas y aceites, cumpliendo con los límites establecidos en la NOM-002-SEMARNAT-1996 y con los estándares de la NOM-003-SEMARNAT-1997 para reuso en servicios al público ($\text{DBO}_5 = 18 \text{ mg/L}$, $\text{SST} = 16 \text{ mg/L}$, grasas = 7 mg/L), resultados comparables a los reportados en plantas de tratamiento de universidades de referencia internacional. Sin embargo, se detectó un incremento anómalo de la DBO_5 en el efluente de la PTAR 1 (de 56 mg/L a 75 mg/L , +33.9 %), inconsistente con el objetivo de una PTAR, que puede deberse a error en el etiquetado o toma de muestra, aunque la remoción eficiente de SST y grasas hace esta opción menos probable; a nitrificación activa que incrementa la demanda de oxígeno en el efluente; a condiciones operativas inadecuadas como déficit de oxígeno o relación F/M subóptima; o a variabilidad diaria no capturada por el muestreo puntual, por lo que se recomienda realizar un nuevo monitoreo con muestreo compuesto de 24 horas y análisis específicos de nitrógeno para identificar la causa.

Todos los metales pesados analizados (arsénico, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc) se encontraron por debajo de los límites de detección en ambas PTAR, lo que confirma el origen doméstico del agua residual y la ausencia de actividades industriales en la institución, reduciendo significativamente el riesgo de contaminación del subsuelo por la disposición en el pozo de absorción. Si bien los efluentes de la PTAR 2 cumplen con la NOM-002-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, la disposición final en un pozo de absorción (infiltración al subsuelo) implica la aplicación de la NOM-001-SEMARNAT-2021, que eliminó la DBO_5 como parámetro regulado e incorporó la DQO y Toxicidad Aguda, por lo que no es posible afirmar que el efluente cumpla con la



normativa aplicable a su disposición final sin realizar análisis complementarios de DQO y Toxicidad Aguda, recomendándose su realización para garantizar el cumplimiento integral de la normativa ambiental.

El efluente de la PTAR 2 ($DBO_5 = 18 \text{ mg/L}$, $SST = 16 \text{ mg/L}$, grasas = 7 mg/L) cumple con los límites de la NOM-003-1997 para servicios al público con contacto indirecto, lo que abre la posibilidad de reutilizar el agua tratada para riego de áreas verdes o descarga de sanitarios, contribuyendo a la sostenibilidad hídrica de la institución, aunque para la PTAR 1 es necesario resolver la anomalía en DBO_5 antes de considerar su reuso.

Las principales limitaciones del estudio son el muestreo puntual que no captura la variabilidad diaria, la ausencia de análisis microbiológicos (coliformes fecales, huevos de helminto), la falta de análisis de DQO y Toxicidad Aguda, y la realización de una sola campaña de muestreo, por lo que para investigaciones futuras se recomienda implementar un programa de monitoreo regular con muestreo compuesto de 24 horas, incorporar análisis de DQO, Toxicidad Aguda y parámetros microbiológicos para evaluar el cumplimiento con la NOM-001-2021 y NOM-003-1997, realizar una revisión operativa detallada de la PTAR 1 para identificar las causas del incremento de DBO_5 , y evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar un programa de reuso del agua tratada en la institución.

Finalmente, la caracterización de las PTAR no solo permite evaluar su desempeño ambiental y normativo, sino que también constituye una experiencia de aprendizaje para estudiantes y docentes, alineada con el compromiso de las instituciones de educación superior con la sostenibilidad y la formación de profesionales con conciencia ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albornoz, L. L., Centurião, T. C., Giacobbo, A., Zoppas-Ferreira, J., & Bernardes, A. M. (2020). Influence of rain events on the efficiency of a compact wastewater treatment plant: a case study on a university campus aiming water reuse for agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33), 41350–41360. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-10102-W>
- Angel Ari Ali, Y., Del Jr Juan Sotomayor Puno, C., & Resumen, P. (2025). Evaluación de la calidad de agua de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas–Región Puno. *Revista de Investigaciones*, 14(3), 118–129. <https://doi.org/10.26788/RI.V14I3.6941>



- Arredondo-Navarro, A., & Flores-Cervantes, D. X. (2023). Revisión de métodos de muestreo, detección, caracterización de microplásticos y control de calidad en columna de agua y sedimentos. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 14(3), 474–522. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-IMTA>
- Atyang, K. L. (2025). *Evaluating the operational performance of the activated sludge wastewater treatment plant at Uganda Christian University, Mukono*. <https://ir.busitema.ac.ug/handle/20.500.12283/4631>
- Barrantes, E. A. B., & Nuñez, M. cartín. (2017). Efficacy of wastewater treatment of the University of Costa Rica Western Campus, San Ramón, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 9(1), 193–197. <https://doi.org/10.22458/URJ.V9I1.1697>
- Bertolino, S. M., Carvalho, C. F., & Aquino, S. F. (2008). Caracterização e biodegradabilidade aeróbia e anaeróbia dos esgotos produzidos em campus universitário. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 13(3), 271–277. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522008000300005>
- Coskuner, G., & Ozdemir, N. S. (2006). Performance assessment of a wastewater treatment plant treating weak campus wastewater. *International Journal of Environment and Pollution*, 28(1–2), 185–197. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2006.010883>
- Damián-Chalán, A., Daza-Donoso, P., & Albuja-Sanchez, J. (2024). Designing a Net-Zero Energy and Chemical-Free Wastewater Treatment Plant for a University Campus in Quito, Ecuador. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1434(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1434/1/012001>
- Domínguez-García, P., Almirall, X. O., & Gómez-Canela, C. (2025). A POCIS-based approach for the monitoring of pharmaceuticals in wastewater treatment plants: Calibration and deployment challenges. *Environmental Pollution*, 367, 125641. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2025.125641>
- ESI. (2026). *Performance Analysis of Wastewater - Engineering Science Institute for Training & Development*. <https://esi.edu.sa/en/courses/performance-analysis-of-wastewater/#content>
- Feng, H., Zhou, B., Wu, J., Wang, K., & Zhang, Z. (2025). Sustainable management of wastewater in an enclosed campus via an integrated treatment system: Pollutant removal, organic matter



- transformation, and microbial interactions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(6), 120301. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2025.120301>
- González Barceló, O., & García Gil, J. H. (2026, May 12). *Wastewaters at the University. Treatment Plants in UNAM Fields*. <https://revista.unaminternacional.unam.mx/en/nota/12/aguas-residuales-en-la-universidad-plantas-de-tratamiento-en-campos-de-la-unam>
- Grimah, K., Nahli, A., Lazrak, A., & Chlaida, M. (2024). Physicochemical characterization of university campus' wastewater for internal treatment system installation (Casablanca, Morocco). *Environmental Research and Technology*, 7(1), 13–26. <https://doi.org/10.35208/ERT.1333487>
- Jurvansuu, J., Länsivaara, A., Palmroth, M., Kaarela, O., Hyöty, H., Oikarinen, S., & Lehto, K.-M. (2024). Increased Detection of Desulfobacterota in Wastewater Treatment Plant Effluent via Composite Sampling Versus Grab Sampling. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-5382601/V1>
- Leal, H. F., Ouradou, A., Koukene, N., Barka, A., Quach, C., & Bédard, É. (2026). Comparative analysis of wastewater sample processing methods for antimicrobial resistance surveillance. *Microbiology Spectrum*. <https://doi.org/10.1128/SPECTRUM.02089-25>
- SECOFI. (1980). *NMX-AA-003-1980. Aguas residuales - Muestreo* (NMX-AA-003-1980). DIRECCION GENERAL DE NORMAS. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166762/NMX-AA-003-1980.pdf>
- SEMARNAT. (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- SEMARNAT. (1998). *NOM-002-SEMARNAT-1996*. DOF. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-002-semarnat-1996/>
- Rahsia, S. A., & Widodo, M. L. (2025). Timbulan Air Limbah dan Unit Instalasi Pengolahan Air Limbah pada Fakultas Teknik Universitas Panca Bhakti Kota Pontianak. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 13, 71–79. <https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/documents/detail/4854408>
- Rapeta, M. G., Mulaudzi, V. L., & Masoko, P. (2021). *Synchoronised physical, chemical and microbial analysis of wastewater from University of Limpopo food- court* [University of Limpopo]. <https://agris.fao.org/search/en/providers/124729/records/67053ea5b1dfe472e1467f5b>

University of Patras. (2024). 6. *Clean Water & Sanitation* (University of Patras, Ed.; 1st ed., Vol. 1, pp. 14–21). University of Patras. <https://bookstack.library.upatras.gr/books/public-evidence/page/6-clean-water-sanitation/revisions/547>

Yapi, E. A. M., Mossoun, A. M., Zan-Bi, T. T., Dindé, A. O., Gossé, L. G., Vakou, S. N., Gnaly, G., Yao, E. K., Coulibaly, J. K., Sidibé, M., Tiomé, D. K., Zobo, A. A., Danho, T., Yapi, C. B., Yapi, R., Bibby, K., Ghersi, B. M., Burgess, T., Amuguni, H., ... Lantagne, D. (2025). Expanding access to wastewater surveillance beyond sewer networks: Effectiveness of active and passive sampling of waste effluent streams in Côte d'Ivoire. *PLOS Water*, 4(6), e0000290. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PWAT.0000290>

