SECCIÓN: CALIDAD DE SERVICIOS EN SALUD
DOI: 10.22267/rus.262802.9491
ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN
REVISTA UNIVERSIDAD Y SALUD

Caracterización de afluente y efluente en una planta de tratamiento de aguas residuales con filtros percoladores

Characterization of influent and effluent at a wastewater treatment plant with trickling filters in the high Andean region of Peru

Caracterização do afluente e do efluente em uma estação de tratamento de águas residuais com filtros de percolação na região andina do

Wilder Ledesma-Giraldez [1]
Esmila Yeime Chavarria-Marque [2]

1. ECOMÁS Consultoría y Capacitación. Juliaca, Perú.
2. Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo. Tayacaja, Perú.

RESUMEN

Introducción: La planta de tratamiento de aguas residuales de Yauli, ubicada en la región altoandina de Huancavelica, Perú (~3383 m), y enfrenta condiciones ambientales que limitan la eficiencia de los procesos biológicos. **Objetivo:** Determinar las concentraciones de parámetros fundamentales en el afluente y efluente de la PTAR de Yauli, incluyendo aceites y grasas (AyG), coliformes termotolerantes (CT), (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), pH y temperatura. **Materiales y métodos:** Mediante un diseño descriptivo transversal se realizaron 8 campañas por afluente y efluente entre octubre de 2019 y febrero de 2020. Se analizaron AyG, CT, DBO_5, DQO, SST, pH y temperatura. Los resultados se compararon con los Límites Máximos Permisibles (LMP) de la normativa peruana. Se aplicaron pruebas de normalidad y *t* de *Student* ($p < 0,05$), con intervalos de confianza al 95 % y tamaño del efecto (*Cohen's d*). **Resultados:** El efluente cumplió con los LMP en AyG, CT, DQO, SST, pH y temperatura. Sin embargo, la DBO_5 excedió el límite (732,9 mg/L vs. 100 mg/L). Se observó mayor eficiencia de remoción en los SST (73,15 %), y menor en la DBO_5 (3,95 %). Se evidenció además una sobrecarga orgánica que afectó la eficiencia del sistema. **Conclusión:** El estudio evidencia limitaciones del tratamiento biológico en condiciones altoandinas. Es necesario adaptar tecnologías a las particularidades ambientales y operativas locales para proteger los recursos hídricos y garantizar la calidad del efluente.

Palabras clave: Plantas de tratamiento de aguas residuales; altitud; monitoreo del ambiente; Perú. (Fuente: DeCS, Bireme).

Objetivos de desarrollo sostenible: Salud y bienestar; agua limpia y saneamiento. (Fuente: ODS, OMS).

ABSTRACT

Introduction: The Yauli wastewater treatment plant, located in the high Andean region of Huancavelica, Peru (~3,383 m), faces environmental conditions that limit the efficiency of biological processes. **Objective:** To determine the concentrations of key parameters in the influent and effluent of the Yauli WWTP, including oils and fats (O&F), thermotolerant coliforms (TC), BOD_5, chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), pH, and temperature. **Materials and methods:** Using a descriptive cross-sectional design, 8 sampling campaigns were conducted for influent and effluent between October 2019 and February 2020. O&F, TT, BOD_5, COD, TSS, pH, and temperature were analyzed. The results were compared with the Maximum Permissible Limits (MPLs) established by Peruvian regulations. Normality tests and *Student*'s t-tests ($p < 0.05$) were applied, with 95% confidence intervals and effect size (*Cohen's d*). **Results:** The effluent complied with the MPLs for BOD_5, COD, TSS, pH, and temperature. However, BOD_5 exceeded the limit (732.9 mg/L vs. 100 mg/L). Higher removal efficiency was observed for SST (73.15%), and lower for BOD_5 (3.95%). Organic overload was also evident, which affected the system's efficiency. **Conclusion:** The study highlights the limitations of biological treatment in high-Andean conditions. It is necessary to adapt technologies to local environmental and operational conditions to protect water resources and ensure effluent quality.

Keywords: Wastewater treatment plants; altitude; environmental monitoring; Peru. (Source: DeCS, Bireme).

Sustainable development goals: Good health and well-being; clean water and sanitation. (Source: SDG, WHO).

Citación:
Ledesma-Giraldez W, Chavarria-Marque EY. Caracterización de afluente y efluente en una planta de tratamiento de aguas residuales con filtros percoladores en la región altoandina del Perú. Univ Salud [Internet]. 2026; 28(2): e9491. DOI: 10.33367/rus.262802.9491

Recibido:	Mayo	22 - 2025
Revisado:	Noviembre	27 - 2025
Aceptado:	Abril	30 - 2026
Publicado:	Mayo	01 - 2026

CC BY NC SA

ISSN: 0124-7107 - ISSN (En línea): 2389-7066
Univ. Salud 2026 Vol 28 No 2
https://doi.org/10.22267/rus
https://revistas.udenar.edu.co/index.php/usalud

Fuentes de financiamiento:
El desarrollo de esta investigación fue financiado con recursos propios de los investigadores.

Contribución de autoría:
Conceptualización: Wilder Ledesma.
Curación de datos: Esmila Chavarria.
Análisis formal: Wilder Ledesma.
Investigación: Wilder Ledesma, Esmila Chavarria.
Metodología: Wilder Ledesma, Esmila Chavarria.
Administración del proyecto: Esmila Chavarria.
Supervisión: Wilder Ledesma
Validación: Esmila Chavarria.
Visualización: Wilder Ledesma.
Redacción-borrador original: Wilder Ledesma
Redacción-revisión y edición: Esmila Chavarria. (Fuente: CRediT, NISO).

Disponibilidad de datos y materiales:
Los datos y materiales utilizados en este estudio estarán disponibles bajo solicitud directa a los autores.

Aprobación de ética y consentimiento para participar:
Este estudio no requirió la aprobación de un comité de ética ni el consentimiento informado de participantes, debido a la naturaleza del trabajo.

Conflicto de intereses:
Se declara que no existe ningún conflicto de intereses entre los autores.

Declaración de responsabilidad:
Se declara que los autores son responsables del contenido y de su veracidad.

Consentimiento para publicación:
Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final para su publicación en la revista.

RESUMO

Introdução: A estação de tratamento de águas residuais de Yauli, localizada na região andina de Huancavelica, no Peru (~3.383 m), enfrenta condições ambientais que limitam a eficiência dos processos biológicos. **Objetivo:** Determinar as concentrações de parâmetros fundamentais no afluente e no efluente da ETAR de Yauli, incluindo óleos e gorduras (OG), coliformes termotolerantes (CT), DBO_5, demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST), pH e temperatura. **Materiais e métodos:** Por meio de um desenho descritivo transversal, foram realizadas 8 campanhas no afluente e no efluente entre outubro de 2019 e fevereiro de 2020. Foram analisados óleos e gorduras (AyG), coliformes termotolerantes (CT), DBO_5, DQO, SST, pH e temperatura. Os resultados foram comparados com os Limites Máximos Permissíveis (LMP) da regulamentação peruana. Foram aplicados testes de normalidade e *t* de *Student* ($p < 0,05$), com intervalos de confiança de 95% e tamanho do efeito (*Cohen's d*). **Resultados:** O efluente cumpriu os LMP em AyG, CT, DQO, SST, pH e temperatura. No entanto, a DBO_5 excedeu o limite (732,9 mg/L vs. 100 mg/L). Observou-se maior eficiência de remoção na SST (73,15%) e menor na DBO_5 (3,95%). Evidenciou-se, além disso, uma sobrecarga orgânica que afetou a eficiência do sistema. **Conclusão:** O estudo evidencia limitações do tratamento biológico em condições de alta montanha. É necessário adaptar as tecnologias às particularidades ambientais e operacionais locais para proteger os recursos hídricos e garantir a qualidade do efluente.

Palavras-chave: Estações de Tratamento de águas residuárias; aAltitude; monitoramento ambiental; Peru. (Fonte: DeCS, Bireme).

Metas de desenvolvimento sustentável: Saúde e bem-estar; água potável e saneamento. (Fonte: MDS, ONU).

https://doi.org/10.22267/rus.262802.9491

INTRODUCCIÓN

La gestión de aguas residuales es un desafío global por su impacto en salud pública, ambiente y desarrollo sostenible. En 2022, UN-Water[1] reportó que solo 76 % de las aguas residuales recibió algún tratamiento, evidenciando brechas en regiones menos desarrolladas. En América Latina, el Banco Mundial[2] estima que apenas entre 30 % y 40 % de las aguas residuales captadas son tratadas. Las diferencias son marcadas: Chile alcanza 71 % de cobertura, Paraguay apenas 4 % y Perú 39 %, reflejando desigualdades en infraestructura y gestión.

En Perú, las condiciones geográficas y socioeconómicas agravan los retos del saneamiento. Estudios en Lima, como el de Ramírez *et al*.[3], evaluaron humedales artificiales con eficiencias de remoción de DQO entre 55 % y 71 %, mostrando avances, pero también la necesidad de optimizar sistemas existentes. Las dificultades se intensifican en zonas de altitud, donde la menor presión atmosférica afecta la aireación. Baquero *et al*.[4] señalan que a 2550 m la demanda de aire aumenta 1,5 veces; en Yauli (3385 m) este efecto es aún más crítico. Guo *et al*.[5] demostraron además que la composición microbiana difiere en ambientes alpinos, condicionando la degradación de carbono y nitrógeno. Investigaciones en la meseta Qinghai–Tíbet[6] y en Ecuador[7] confirman que factores como ubicación, temperatura y tiempo de retención hidráulica limitan la eficiencia de las PTAR en altura.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Yauli, ubicada en el distrito homónimo de la región de Huancavelica, Perú, combina procesos primarios y secundarios mediante el uso de un filtro percolador. Este sistema enfrenta cuestionamientos sobre su capacidad para remover parámetros clave, como la DBO_5, lo que podría estar comprometiendo la calidad del río Ichu, su cuerpo receptor. La altitud extrema de la zona amplifica las limitaciones operativas, ya que los procesos biológicos dependen de condiciones de oxigenación que se ven afectadas por la menor presión atmosférica. Haque[8] subraya que los desafíos tecnológicos varían según el entorno, reforzando la necesidad de estudios localizados.

Por ello, el presente trabajo se centra en determinar las concentraciones de parámetros fundamentales en el afluente y efluente de la PTAR de Yauli, incluyendo aceites y grasas (AyG), coliformes termotolerantes (CT), (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), pH y temperatura. Estos valores se contrastarán con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la normativa peruana, con el propósito de evaluar si la planta cumple con los requisitos legales de descarga. Asimismo, se calculará la eficiencia de remoción para cada uno de estos parámetros, ofreciendo una visión cuantitativa del desempeño del sistema. Se plantea la hipótesis de que la planta no cumple con todos los parámetros, especialmente la DBO, debido a las restricciones tecnológicas y operativas propias de la altitud.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el distrito de Yauli, provincia y departamento de Huancavelica, Perú, ubicado a 3383 m s.n.m. en la región andina central. Limita al este con Paucará (Acobamba), al oeste con Huancavelica, al norte con Acoria y al sur con Ccochaccasa (Angaraes).

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Yauli recibe un caudal promedio de 8,2 L/s (705,89 m^3/día) en el afluente y descarga 2,8 L/s (241,92 m^3/día) en el efluente. Su infraestructura incluye un sistema de pretratamiento, compuesto por captación de aguas residuales, bombeo, cámara de rejas y desarenador. Posteriormente, el flujo pasa por dos sedimentadores primarios y una trampa de grasa, que permiten la separación inicial de sólidos y aceites. El tratamiento biológico se realiza mediante filtros percoladores dispuestos en serie, tras los cuales el agua tratada se descarga directamente al río receptor. Los lodos generados en los sedimentadores y en los filtros se conducen a un lecho de secado para su disposición final. La planta carece de procesos de desinfección química, radiación UV y filtración terciaria, por lo que la calidad del efluente depende exclusivamente de las etapas físicas y biológicas descritas.

Los puntos de muestreo fueron georreferenciados en coordenadas UTM:

- Afluente: Lat. N 8 588 737; Long. E 516 232; Alt. 3404 m s.n.m.
- Efluente: Lat. N 8 588 702; Long. E 516 203; Alt. 3383 m s.n.m.

Estas coordenadas permiten identificar con precisión el emplazamiento de la PTAR y contextualizar las condiciones ambientales del monitoreo.

Diseño y Unidad de análisis

La investigación se llevó a cabo mediante un diseño transversal descriptivo[9], orientado a caracterizar las aguas residuales en la PTAR de Yauli. Se incluyeron campañas de muestreo realizadas bajo condiciones operativas normales de la PTAR, con caudal estable y acceso seguro, excluyendo aquellas afectadas por fallas operativas o precipitaciones intensas. El estudio se realizó entre octubre de 2019 y febrero de 2020, periodo correspondiente a la época de lluvias en la región andina. La unidad de análisis estuvo constituida por las muestras de agua residual recolectadas en el afluente y efluente de la planta, sobre las cuales se evaluaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: AyG, CT, DBO_5, DQO, SST, pH y temperatura, cuyos resultados fueron contrastados con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N.° 003-2010-MINAM[10]. Estos indicadores reflejan la calidad del agua residual y permiten valorar el desempeño del sistema de tratamiento en relación con estándares nacionales e internacionales.

Muestra

Se realizaron ocho campañas de muestreo entre octubre de 2019 y febrero de 2020, obteniéndose $n = 8$ por cada punto (afluente y efluente; total $n = 16$). En cada campaña se colectó una muestra compuesta de 24 h en el punto de entrada y otra en el punto de salida, siguiendo el protocolo establecido por la Resolución Ministerial N° 273-2013-VIVIENDA[11], que regula el monitoreo de efluentes en el contexto peruano. El caudal promedio diario registrado fue de 8,2 L/s (705,89 m^3/día) en el afluente y 2,8 L/s (241,92 m^3/día) en el efluente. Las tomas se efectuaron en horario diurno, evitando precipitaciones intensas para reducir el efecto de la dilución. Las muestras se recolectaron en recipientes estériles de polietileno, con volúmenes de 1 L para cada parámetro analizado (AyG, CT, DBO_5, DQO y SST), transportadas bajo cadena de frío a 4 °C. Los análisis microbiológicos se procesaron en un plazo máximo de 6 h desde la toma, mientras que los fisicoquímicos se conservaron hasta 24–48 h según protocolo de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*[12].

El muestreo se realizó en coordinación con la planta de tratamiento de aguas residuales de Yauli, contando con la autorización operativa correspondiente. Durante las campañas se registraron condiciones de sitio: la temperatura del agua en el afluente osciló entre 17–19,6 °C (media ≈ 18 °C) y en el efluente entre 19–22,4 °C (media ≈ 21 °C). El caudal promedio diario fue de 8,2 L/s en el afluente y 2,8 L/s en el efluente. Asimismo, se consignaron notas operativas de la planta, incluyendo mantenimiento de filtros percoladores y variaciones de carga, con el fin de contextualizar los resultados obtenidos. Se incluyeron únicamente muestras compuestas de 24 h recolectadas en afluente y efluente bajo condiciones controladas de conservación y transporte. Se descartaron muestras tomadas durante precipitaciones intensas o aquellas que no cumplieron con los tiempos máximos de procesamiento establecidos por los protocolos de referencia.

Instrumentación y procedimientos analíticos

Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos se realizaron siguiendo las pautas del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*[12].

- **Aceites y grasas (AyG):** Método 5520B, mediante extracción *Soxhlet* con benceno durante 4 h en 250 mL de muestra y pesada del residuo en balanza digital calibrada.
- **Coliformes termotolerantes (CT):** Método 9222D, filtración de 100 mL en membrana de 0,45 μm, incubación a 44,5 °C por 24 h y conteo en contador de colonias (kit MEL/MF total).
- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5):** Método 5210B, incubación en oscuridad por cinco días a 20–25 °C en botellas específicas con agitación controlada en magneto y registro del consumo de oxígeno disuelto en equipo ME-98.
- **Demanda química de oxígeno (DQO):** Método 5220D, digestión cerrada de 1 mL de muestra con dicromato de potasio en medio ácido a 150 °C por 2 h en reactor DBR-125 y lectura directa en colorímetro portátil DR-125 (Hach).
- **Sólidos suspendidos totales (SST):** Método 2540D, filtración de 250 mL con bomba de vacío (Erlenmeyer Kitasato) y papel filtro Whatman, secado a 106 °C durante 60 min y pesada en balanza digital calibrada.

Las mediciones in situ de pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad se realizaron con un multiparámetro portátil Ezodo, calibrado con soluciones patrón y aceptando desviaciones ≤ 5 %. La georreferenciación de los puntos de muestreo se efectuó con un GPS portátil Garmin eTrex 10, con precisión de ±5 m. El caudal se midió mediante el método de sección–velocidad en el afluente y volumétrico en el efluente.

https://doi.org/10.22267/rus.262802.9491

Todos los equipos fueron calibrados según manual del fabricante antes de cada serie de análisis, aceptando desviaciones ≤ 5 %.

Evaluación de la carga orgánica del filtro biológico

Se calculó la carga orgánica aplicada al filtro biológico como criterio de diagnóstico del desempeño de la unidad de tratamiento, siguiendo las recomendaciones de la literatura técnica[13,14]. Este parámetro permite evaluar si el sistema opera dentro de los rangos de carga recomendados para filtros percoladores y, por tanto, si los resultados reflejan condiciones de operación estables.

El cálculo se realizó mediante la expresión:

$$Carga\ orgánica = \frac{Q.C}{V}$$

Donde Q corresponde al caudal afluente diario, C a la concentración de DBO_5 en el afluente, y V al volumen útil del filtro. La planta cuenta con dos filtros biológicos en paralelo, cada uno con un lecho de grava de 3 m de altura[15]. Dado que no se dispone de la memoria técnica oficial, el volumen de cada filtro se estimó a partir de dimensiones típicas reportadas en la literatura, asumiendo un diámetro de 6 m, lo que corresponde a ≈ 85 m^3 por unidad. El caudal promedio de la planta fue de 705,89 m^3/día, distribuido entre ambas unidades, y las concentraciones de DBO_5 oscilaron entre 648,6 y 774,3 mg/L (promedio ≈ 700 mg/L), según los análisis realizados en el afluente.

Análisis estadístico y control de calidad

Los datos se analizaron para comparar afluente y efluente y validar su distribución. Se aplicaron pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk) adecuadas para muestras moderadas ($n = 8$), como paso previo a análisis paramétricos. Posteriormente, se utilizó la prueba *t* de *Student* ($p < 0,05$), intervalos de confianza al 95 % y el tamaño del efecto (*Cohen's d*), complementando la interpretación estadística y valorando la magnitud práctica de las diferencias. Los cálculos se realizaron en SPSS v.25, por su robustez en datos ambientales.

La eficiencia de remoción se estimó mediante la fórmula:

$$Eficiencia = \left(1 - \frac{Concentración\ en\ efluente}{Concentración\ en\ afluente}\right) x\ 100\%$$

Expresando en porcentaje la capacidad de la planta para reducir contaminantes. Los resultados se presentaron con promedios y desviaciones estándar.

Para garantizar fiabilidad se aplicaron controles de calidad: calibración periódica de equipos, duplicados analíticos y verificación con estándares certificados, siguiendo APHA[12] y la norma ISO/IEC 17025:2017[16]. El análisis se realizó en RCJ *Labs Universal*, acreditado bajo NTP-ISO/IEC 17025:2006 (Código 00RCJLE 096), lo que asegura la validez de los procedimientos. Durante la recolección se emplearon guantes estériles y se procesaron blancos para descartar interferencias, minimizando errores sistemáticos y asegurando resultados reproducibles.

RESULTADOS

Carga orgánica aplicada a los filtros biológicos

El caudal promedio afluente de la planta fue de 705,89 m^3/día, distribuido entre dos filtros biológicos en paralelo (≈ 352,95 m^3/día por unidad). Con una concentración promedio de DBO_5 de 700 mg/L (0,7 kg/m^3) y un volumen estimado de ≈ 85 m^3 por filtro (diámetro 6 m, altura 3 m), la carga orgánica aplicada se calculó en 2,91 kg DBO_5/(m^3·día) por unidad.

Este valor se encuentra muy por encima de los rangos de diseño reportados en la literatura para filtros percoladores:

- Baja carga: 0,08–0,32 kg DBO_5/(m^3·día).
- Alta carga: 0,32–1,12 kg DBO_5/(m^3·día)[13,14].

La comparación evidencia que los filtros de la PTAR de Yauli operan en condiciones de sobrecarga orgánica.

Concentraciones de parámetros en afluente y efluente

Las concentraciones promedio de los parámetros evaluados en el afluente y efluente, junto con sus respectivas desviaciones estándar (DE), se resumen en la Tabla 1. Estos valores reflejan la carga contaminante inicial y la calidad del agua tras el tratamiento, respectivamente. Se observa una reducción general en las concentraciones del efluente respecto al afluente para la mayoría de los parámetros, con excepciones como la temperatura, que permanece estable. Las diferencias más marcadas se evidencian en SST, mientras que parámetros como DBO_5 muestran una disminución limitada.

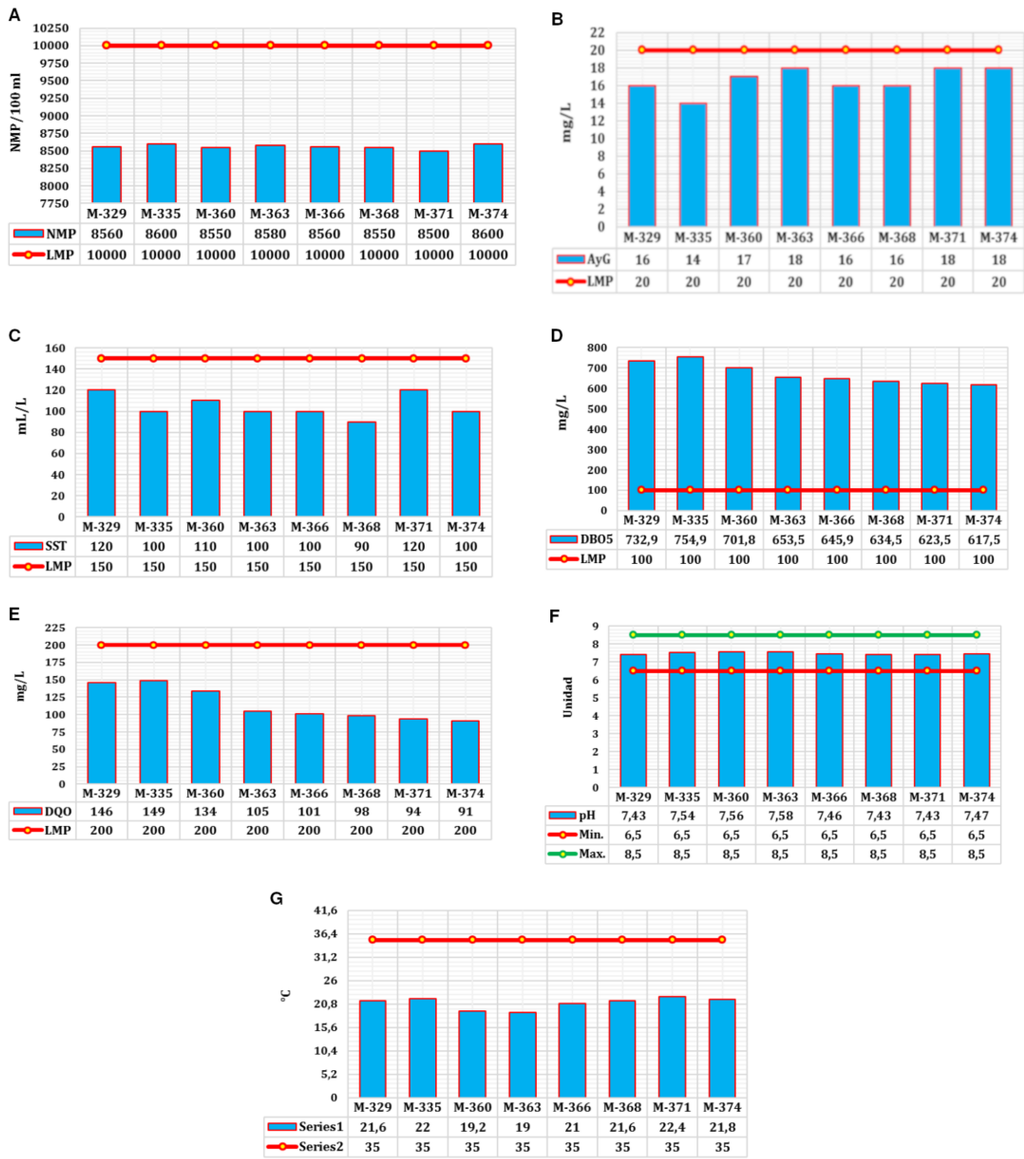
Tabla 1.
Promedios y desviaciones estándar de concentraciones en afluente y efluente

Parámetro	M Afluente	DE Afluente	M Efluente	DE Efluente	LMP
AyG (mg/L)	27,9	3,2	16,6	2,8	20
CT (NMP/100 mL)	15 412,5	1200	8562,5	950	10 000
DBO_5 (mg/L)	763,2	45,6	732,9	40,3	100
DQO (mg/L)	125,1	10,2	114,8	9,5	200
SST (mg/L)	390,6	25,4	105,0	15,6	150
pH (Unidades)	7,6	0,1	7,5	0,1	6-9
Temperatura (°C)	21,2	0,5	21,1	0,4	35

Comparación con Límites Máximos Permisibles (LMP)

La evaluación del cumplimiento normativo se realizó comparando las concentraciones en el efluente con los LMP establecidos por la normativa peruana. Los resultados muestran que parámetros como CT, AyG, DQO, SST, pH y temperatura se encuentran dentro de los límites permitidos tras el tratamiento. En contraste, la DBO_5 excede ampliamente el valor máximo permitido, evidenciando una limitación en la capacidad de la PTAR para remover la carga orgánica biodegradable. Esto se puede observar gráficamente en la Figura 1.

Figura 1.
Comparación de parámetros del efluente con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la normativa peruana. A: CT, B: AyG, C: DQO, D: DBO_5, E: SST, F: pH, G: Temperatura



https://doi.org/10.22267/rus.262802.9491

Eficiencia de remoción

La capacidad de la PTAR para reducir los contaminantes se cuantificó mediante la eficiencia de remoción, expresada en porcentajes (Tabla 2). Los valores destacan una marcada variabilidad entre parámetros: los SST muestran la mayor reducción, mientras que la DBO_5 y la DQO exhiben eficiencias notablemente menores. Estos datos reflejan diferencias en la efectividad del tratamiento según el tipo de contaminante.

Tabla 2.
Eficiencias de remoción de la PTAR

Parámetro	Eficiencia de remoción (%)	DE Afluente	M Efluente	DE Efluente	LMP
AyG	40,61	3,2	16,6	2,8	20
CT	44,48	1200	8562,5	950	10 000
DBO_5	3,95	45,6	732,9	40,3	100
DQO	8,2	10,2	114,8	9,5	200
SST	73,15	25,4	105,0	15,6	150

Análisis estadístico

Los resultados de las pruebas de normalidad aplicadas al efluente (Tabla 3) mostraron que, en general, los parámetros analizados cumplen con el supuesto de distribución gaussiana. En AyG, CT, DBO_5, SST, pH y Temperatura, los valores de significancia obtenidos en las pruebas de Kolmogorov–Smirnov y Shapiro–Wilk fueron superiores al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$), lo que permitió aceptar la hipótesis nula de normalidad. En el caso de DQO y Temperatura, los valores se encontraron cercanos al umbral, pero igualmente se consideraron adecuados para el análisis paramétrico por consistencia metodológica.

Tabla 2.
Resultados de las pruebas de normalidad (Kolmogorov–Smirnov y Shapiro–Wilk) aplicadas a los parámetros del efluente

Parámetro	Kolmogorov–Smirnov (*p*)	Shapiro–Wilk (*p*)	Normalidad
AyG	0,200	0,127	Sí
CT	0,200	0,323	Sí
DBO_5	0,142	0,186	Sí
DQO	0,061	0,055	Sí (límite)
SST	0,027	0,120	Sí
pH	0,200	0,067	Sí
Temperatura	0,057	0,053	Sí (límite)

Criterio de decisión: $p \geq 0,05 \rightarrow$ normalidad aceptada

Una vez comprobada la normalidad de los datos, se procedió a aplicar la prueba *t* de *Student* para muestras relacionadas, con un nivel de significancia de $p < 0,05$, comparando las medias de cada parámetro entre el afluente y el efluente. Este procedimiento permitió determinar si las reducciones observadas eran estadísticamente significativas y, por tanto, reflejaban la eficiencia del tratamiento en la planta.

Los resultados de las pruebas *t* de *Student* y Cohen´s d, presentados, evidencian que la planta de tratamiento presenta una alta eficiencia en la remoción de AyG, CT y SST, parámetros que mostraron diferencias estadísticamente significativas y tamaños de efecto muy grandes. Aunque la DBO_5 y la DQO no alcanzaron significancia estadística, sus tamaños de efecto moderados a grandes sugieren tendencias de reducción que podrían confirmarse con un mayor número de observaciones. Por su parte, el pH y la temperatura se mantuvieron estables, lo que es consistente con su función como variables de control y no como indicadores de eficiencia (Tabla 4).

Tabla 4.
Comparación de parámetros entre afluente y efluente mediante *t* de *Student*, IC 95 % y *Cohen's d*

Parámetro	*p*-valor	IC 95 % inferior	IC 95 % superior	*Cohen´s d*
AyG	0,001	14,26	18,94	3,76
CT	0,003	7768,29	9356,71	6,33
DBO_5	0,120	699,21	766,59	0,70
DQO	0,085	106,86	122,74	1,05
SST	< 0,001	91,96	118,04	13,55
pH	0,320	7,42	7,58	1
Temp.	0,450	20,77	21,43	0,22

* $p < 0,05$ indica diferencias significativas entre afluente y efluente.
** IC 95 %: Intervalo de confianza al 95%.
*** Cohen's d: Tamaño del efecto (0,2 = pequeño, 0,5 = mediano, ≥0,8 = grande)

DISCUSIÓN

Los resultados mostraron diferencias significativas en parámetros como AyG, CT y SST, con eficiencias de remoción elevadas y tamaños de efecto muy grandes. En contraste, variables como la DBO_5 y la DQO no alcanzaron significancia estadística, aunque presentaron tamaños de efecto relevantes que sugieren tendencias importantes. Estas diferencias en la magnitud y significancia de los parámetros permiten contextualizar los resultados de Yauli frente a otras experiencias altoandinas, donde la eficiencia de remoción de materia orgánica ha mostrado comportamientos contrastantes según la altitud, el diseño tecnológico y las condiciones operativas.

En la PTAR de Yauli (Perú, 3404 m s.n.m.), la eficiencia de remoción fue mínima: apenas ≈3,95 % para DBO_5 y ≈8 % para DQO, sin diferencias estadísticamente significativas. Aunque el valor final de DQO cumplió con la normativa peruana (<200 mg/L), la baja eficiencia refleja las limitaciones de los filtros percoladores en condiciones de altitud extrema y bajo sobrecarga orgánica.

En contraste, en la PTAR de Pucará (Bolivia, 2455 m s.n.m.), Echeverría *et al.*[17] , reportaron eficiencias elevadas: 79,3 % para DBO_5, 88,5 % para DQO y 95,2 % para SST. Este mejor desempeño se explica por la menor altitud, que reduce las limitaciones de oxigenación, y por la mayor robustez del tren de tratamiento, que incluye RAFA, filtros percoladores, clarificadores, filtros de arena y desinfección UV. Sin embargo, la reducción de nutrientes (N y P) fue baja, confirmando que incluso sistemas más completos mantienen debilidades frente a contaminantes complejos.

De manera complementaria, Echeverría *et al.*[18] evaluaron otras cuatro PTAR en Bolivia (Villa El Carmen, Ucureña, Tolata y Colquerrancho), todas ubicadas por encima de los 2700 m s.n.m. Los resultados mostraron eficiencias variables en la remoción de DQO (93–333 mg/L) y SST (18–460 mg/L), evidenciando diferencias operativas significativas entre plantas que emplean tecnologías similares. En todos los casos, los niveles de $N\text{-}NH_3$ (41–74 mg/L) superaron el estándar referencial (<30 mg/L), lo que confirma la limitada capacidad de estas tecnologías para remover nutrientes en condiciones altoandinas. Además, la presencia de sales y la conductividad eléctrica generaron restricciones para el uso agrícola del efluente, ampliando las limitaciones más allá de la materia orgánica.

https://doi.org/10.22267/rus.262802.9491

Finalmente, en Ecuador (Acchayacu, 2689 m; Churuguzo, 2628 m), Jerves-Cobo *et al.*[7], reportaron eficiencias iniciales de 60 % – 74 % para DBO_5 y 48,9 % – 68,4 % para DQO en humedales construidos convencionales. Tras el cambio tecnológico hacia humedales de flujo subsuperficial vertical (VSSF-CW) y de flujo superficial (SF-CW), las eficiencias se incrementaron notablemente, alcanzando 83 % – 95 % para DBO_5 y 82,8 % – 89,4 % para DQO, además de mejoras en SST (≈95 %). Aunque la remoción de nutrientes siguió siendo limitada (TP 53 % - 57 %, N-amo 30% – 40 %), el cambio tecnológico demostró un potencial claro para superar las restricciones de los sistemas tradicionales en altura.

La comparación regional evidencia que, aunque existen experiencias exitosas en altitudes altoandinas, el funcionamiento de las plantas es variable y depende de la robustez del tratamiento. No obstante, persisten limitaciones en cuanto a la remoción de nutrientes, por lo que la calidad del efluente para riego sigue siendo un aspecto pendiente en la gestión de las PTAR altoandinas. Las condiciones extremas de Yauli ponen de manifiesto las restricciones más severas. Para comprender el desempeño parcial en Yauli, es necesario considerar los factores ambientales y operativos que condicionan su desempeño.

En Yauli, las condiciones propias de la altitud explican parte de la baja eficiencia observada. La menor disponibilidad de oxígeno dificulta el procesamiento de la materia orgánica, pues la fuerza impulsora para disolver oxígeno disminuye y se requiere mayor flujo de aire para mantener niveles adecuados[4]. Las bajas temperaturas también modifican la comunidad microbiana, generando ecosistemas más frágiles y sensibles a las condiciones ambientales[5]. Xu *et al.*[19], señalaron que en altura la fracción biodegradable del afluente es menor (DBO_5/DQO $< 0,4$) y la biomasa activa presenta menor cantidad y diversidad, reduciendo la capacidad de depuración. De manera complementaria, Zhang *et al.*[20], encontraron que a mayor altitud las plantas reciben afluentes con concentraciones más altas de DQO (147,9–340,2 mg/L), lo que incrementa la carga orgánica a remover. En Yauli, la DQO inicial fue moderada en comparación (97–168 mg/L), sin embargo, la remoción fue mínima, lo que confirma que la baja eficiencia no depende solo de la altitud y la calidad del afluente, sino también de limitaciones operativas y tecnológicas.

La sobrecarga orgánica en Yauli explica parte de la baja eficiencia observada. Braz *et al.*[21], demostraron que el exceso de carga en reactores anaeróbicos afecta directamente la biomasa activa: se acumulan ácidos grasos volátiles, la comunidad microbiana se altera y la metanogénesis colapsa cuando el pH desciende por debajo de 6. De manera similar, Jwara *et al.*[22], reportaron que en la planta de Darvill (Sudáfrica) la sobrecarga hidráulica redujo la eficiencia de la eliminación biológica de nutrientes, con valores promedio de 40 % para nutrientes y 64 % para fósforo reactivo soluble, siendo la eliminación de amoníaco la más afectada. Aunque en Yauli la sobrecarga fue orgánica y en Darvill hidráulica, ambos casos confirman que operar fuera de los parámetros de diseño compromete la eficiencia de los sistemas de tratamiento. Zhang *et al.*[23], añadieron que cargas excesivamente bajas también generan riesgos: mayor acumulación de nitrógeno orgánico disuelto, formación de subproductos de desinfección clorados y aumento de genes de resistencia a antibióticos. En conjunto, estos hallazgos muestran que tanto las cargas excesivas como las deficientes desestabilizan la funcionalidad de las PTAR, comprometiendo la calidad del efluente y la seguridad sanitaria.

La tecnología empleada también explica parte de las bajas eficiencias observadas en Yauli. Los filtros percoladores presentan vulnerabilidades estructurales que se acentúan en condiciones altoandinas. Ali *et al.*[24], señalaron que el clima frío reduce la tasa de degradación de contaminantes y la estabilidad del biofilm, pudiendo incluso generar obstrucciones por hielo en el medio filtrante. A ello se suma el riesgo de encharcamiento por sobrecarga orgánica, que disminuye la transferencia de oxígeno, y las cargas de choque hidráulicas en temporada de lluvias, que favorecen el desprendimiento de la biomasa activa. Oliveira-Avellar *et al.*[25] confirmaron que, aun en condiciones controladas, los filtros percoladores muestran eficacia limitada en la eliminación de nutrientes como el nitrógeno amoniacal. De manera complementaria, Abyar y Nowrouzi[26] reportaron impactos ambientales significativos asociados al consumo energético y a las emisiones de gases de efecto invernadero. En conjunto, estos hallazgos refuerzan que la baja eficiencia registrada en Yauli responde tanto a factores ambientales y operativos como a la fragilidad inherente de la tecnología frente a contaminantes complejos y exigencias de sostenibilidad.

Los resultados obtenidos en la PTAR de Yauli tienen implicaciones prácticas relevantes para la gestión de sistemas de tratamiento en zonas altoandinas. La baja eficiencia en la remoción de DBO_5 y DQO, junto con la variabilidad en parámetros como AyG y CT, evidencia que los filtros percoladores no garantizan un cumplimiento consistente de los estándares de calidad del efluente. En términos operativos, esto implica que las plantas que emplean esta tecnología requieren un rediseño que considere las condiciones ambientales de altura, la sobrecarga orgánica y las limitaciones propias del biofilm.

Desde una perspectiva de gestión, los hallazgos refuerzan la necesidad de implementar tecnologías más robustas y flexibles, capaces de mantener la eficiencia bajo condiciones adversas. La experiencia comparativa con sistemas de humedales construidos en Ecuador muestra que el cambio tecnológico puede incrementar significativamente la eficiencia de remoción, lo que sugiere que alternativas híbridas o naturales podrían ser más adecuadas para contextos altoandinos.

Finalmente, la evidencia de impactos ambientales y energéticos asociados a los filtros percoladores[26] subraya que la sostenibilidad debe ser un criterio central en la selección tecnológica. En conjunto, los resultados de Yauli confirman que la mejora de las PTAR en altura requiere no solo ajustes operativos, sino también decisiones estratégicas de inversión en tecnologías más resilientes, acompañadas de una gestión regulatoria que priorice la calidad del efluente y la seguridad sanitaria en el uso agrícola del agua tratada.

Este estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas. El muestreo se realizó durante la temporada de lluvias, por lo que no se incluyó un ciclo anual completo y no se captaron posibles variaciones estacionales. El tamaño muestral fue limitado, lo que restringe la generalización de los hallazgos. Asimismo, no se evaluaron parámetros de nutrientes como nitrógeno y fósforo, que son relevantes para caracterizar la eficiencia integral de las PTAR. Por otra parte, la sobrecarga en los filtros constituye una limitación operativa que afecta directamente la interpretación de los resultados, pues introduce un sesgo hacia la subestimación de la eficiencia real del sistema. Finalmente, el muestreo se realizó exclusivamente en la entrada y salida general de la planta, lo que impidió identificar con precisión qué procesos internos presentan disfuncionalidad.

CONCLUSIONES

La PTAR de Yauli mostró baja eficiencia en la remoción de la fracción biodegradable de la carga orgánica, al no cumplir con los LMP de DBO_5. En contraste, parámetros como la DQO, AyG, CT y los SST presentaron eficiencias adecuadas y cumplieron con los valores normativos, mientras que el pH y la temperatura se mantuvieron dentro de rangos aceptables. Este desempeño evidencia que, aunque la planta logra remociones satisfactorias en varios parámetros, las limitaciones tecnológicas de los filtros percoladores, la sobrecarga orgánica y las condiciones de altitud impiden alcanzar un cumplimiento integral de la normativa, lo que demanda mejoras para reducir los impactos ambientales del efluente.

Se recomienda evaluar mejoras tecnológicas orientadas a intensificar los procesos aeróbicos y a incorporar sistemas más resilientes, como biorreactores de membrana (MBR) o humedales híbridos, que han demostrado mayor capacidad de depuración en condiciones altoandinas.

Para investigaciones futuras se sugiere implementar un monitoreo anual que considere la estacionalidad, incluir parámetros de nutrientes (N y P) y variables operativas críticas como oxígeno disuelto y caudal, y trabajar con un tamaño muestral más amplio para robustecer las inferencias. En particular, sería relevante caracterizar directamente el lecho de los filtros percoladores y realizar ensayos de capacidad degradadora en laboratorio, lo cual permitiría confirmar la hipótesis de sobrecarga orgánica y fortalecer el diagnóstico del desempeño de la planta.

https://doi.org/10.22267/rus.262802.9491

REFERENCIAS

1. Organización de las Naciones Unidas, UN Water, ON-Hábitat, Organización Mundial de la Salud. Progreso en el tratamiento de las aguas residuales. Estado mundial y necesidades de aceleración del indicador 6.6.1 de los ODS [Internet]. Ginebra (CHE): ONU, UN Water, UN Hatitat, OMS; 2021 [citado 2026 Abr 9]. Disponible en: https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/sdg6_indicator_report_631_progress-on-wastewater-treatment_2021_es.pdf
2. Rodríguez DJ, Serrano HA, Delgado A, Nolasco D, Saltiel G. De residuo a recurso Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe [Internet]. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial; 2020 [citado 2026 Abr 9]. Disponible en: https://documents1.worldbank.org/curated/en/389711595408950383/pdf/From-Waste-to-Resource-Shifting-Paradigms-for-Smarter-Wastewater-Interventions-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf
3. Ramírez Arbieto KM, Alva Huapaya CA. Technical efficiency for the treatment of domestic wastewater in the removal of Biochemical Oxygen Demand and Eschericia coli by applying artificial wetland, Lima, Peru, 2023. In: Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology [Internet]. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions; 2024 [citado 2026 Abr 9]. DOI: 10.18687/LACCEI2024.1.1.713
4. Baquero-Rodríguez GA, Martínez S, Acuña J, Nolasco D, Rosso D. How elevation dictates technology selection in biological wastewater treatment. J Environ Manage [Internet]. 2022 Abr 1; 307:114588. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114588
5. Guo M, Wang J, You J, Zong Y, Fu C. The influence of DO on the microbiological community of the A2O treatment of municipal wastewater in alpine regions. Water Air Soil Pollut [Internet]. 2022;233:470. DOI: 10.1007/s11270-022-05943-9
6. Feng Z, Liu X, Wang L, Wang Y, Yang J, Wang Y, *et al.* Comprehensive efficiency evaluation of wastewater treatment plants in northeast Qinghai–Tibet Plateau using slack–based data envelopment analysis. Environ Pollut [Internet]. 2022; 311:120008. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120008
7. Jerves-Cobo R, Maldonado E, Hidalgo-Cordero JF, García-Herazo H, Mora-Serrano D. Comparative assessment of wastewater treatment technologies for pollutant removal in high-altitude Andean sites. Water [Internet]. 2025; 17(12):1800. DOI: 10.3390/w17121800
8. Haque A. Water and wastewater treatment; Challenge: Resource recovery in water and wastewater treatment (SDG 6). SSRN [Internet]. 2024 [citado 2026 Abr 9]. DOI: 10.2139/ssrn.4758952
9. Hernández Sampieri R, Fernández Collado C, Baptista Lucio P. Metodología de la Investigación. 6a ed. (MEX): MacGraw Hill Education; 2014. Disponible en: https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf
10. Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM que Aprueba los Límites Máximos Permisibles de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales [Internet]. Lima (PER): MinAm; 2010 [citado 2026 Abr 12]. Disponible en: https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/317434-003-2010-minam
11. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. Resolución Ministerial N° 273-2013-VIVIENDA [Internet]. Lima (PER): MiVivienda; 2013 [citado 2026 Abr 12]. Disponible en: https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/13762-273-2013-vivienda
12. American Public Health Association, Americal Water Works Association, Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd ed. Washington (USA): APHA, AWWA, WEF; 2022. Disponible en: https://www.standardmethods.org/doi/book/10.2105/smww.2882
13. Metcalf & Eddy Inc. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. 3rd ed. Aravaca: McGraw Hill; 1995.
14. United States Environmental Protection Agency. Wastewater treatment/Environmental design manual: Trickling filter design. Washington (USA): EPA; 1993.
15. Gonzales Ccanto EM. Informe visita técnica planta de tratamiento de agua residual de la municipalidad del distrito Yauli de la provincia de Huancavelica [Internet]. Universidad Nacional de Huancavelica; 2018 [citado 2026 Abr 12]. Disponible en: https://es.scribd.com/document/519937219/Petar-Yauli-Informe

16. International Organization for Standardization. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva (CHE): ISO; 2017. Disponible en: https://www.iso.org/standard/66912.html
17. Echeverría I, Vargas V. Coagulación-floculación como estrategia de pulimento para efluentes secundarios en plantas de tratamiento municipales. I&D [Internet]. 2025 Aug 25; 25(1):43–54. DOI: 10.23881/idupbo.025.1-4i
18. Echeverría I, Aliaga G, Saavedra O. Evaluación de la calidad de agua residual tratada para riego en el Valle Alto de la ciudad de Cochabamba. I&D [Internet]. 2024 Jul 31; 24(1):35–45. DOI: 10.23881/idupbo.024.1-3i
19. Xu J, Wang P, Li Y, Niu L. Performance and characterization of the microbial community structures in the activated sludge from wastewater treatment plant at high altitudes in tibet of China. Desalination Water Treat [Internet]. 2018 Feb 1; 106:108–115. DOI: 10.5004/dwt.2018.21995
20. Zhang R, Liu Y, Li H, Xiong J, Zhang Q, Li P, *et al.* Metagenomic Analysis of Bacterial Community Structure and Pollutant Removal Process in High-Altitude Municipal Wastewater Treatment Plants of Tibet, China. Water [Internet]. 2025 May 1; 17(9):1284. DOI: 10.3390/w17091284
21. Braz GHR, Fernandez-Gonzalez N, Lema JM, Carballa M. Organic overloading affects the microbial interactions during anaerobic digestion in sewage sludge reactors. Chemosphere [Internet]. 2019 May 1; 222:323–332. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.124
22. Jwara TYS, Musonge P, Bakare BF. Effects of hydraulical overload on biological nutrient removal efficiencies in wastewater treatment systems. In: 18th SOUTH AFRICA Int'l Conference on Agricultural, Chemical, Biological & Environmental Sciences (ACBES-20). Johannesburg (ZAF): Universal Researchers; 2020. p. 272–275. DOI: 10.17758/eares10.eap1120128
23. Zhang C, Li S, Sun H, Li X, Fu L, Zhang C, *et al.* Assessing the impact of low organic loading on effluent safety in wastewater treatment: Insights from an activated sludge reactor study. J Hazard Mater [Internet]. 2024; 465:133083. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133083
24. Ali I, Khan ZM, Peng C, Naz I, Sultan M, Ali M, *et al.* Identification and elucidation of the designing and operational issues of trickling filter systems for wastewater treatment. Pol J Environ Stud [Internet]. 2017; 26(6):2431–2444. DOI: 10.15244/pjoes/70627
25. de Oliveira-Avellar BR, Marçal K, dos Santos GA, Bogo CR, Ribeiro RP, Aisse MM. Low-rate trickling filter with natural ventilation: Diagnosis in a full-scale WWTP set in southern Brazil. Environ Sci Pollut Res [Internet]. 2025; 32:27037–27051. DOI: 10.1007/s11356-025-36921-3
26. Abyar H, Nowrouzi M. Trickling filter systems for sustainable water supply: An evaluation of eco-environmental burdens and greenhouse gas emissions. Environ Res [Internet]. 2023; 237:117011. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117011