

Artículo Científico / Scientific Article

Eficiencia de rosetas impresas en 3D para la remoción de DBO₅ en filtros percoladores

Efficiency of 3D-printed rosettes for BOD₅ removal in trickling filters

Andrés Ricardo Cano Jerez¹ , Adán Pocasangre Collazos¹ 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dirección para recibir correspondencia: andycanojerez@gmail.com

Recibido: 25/09/2025 **Revisión:** 17/11/2025 **Aceptado:** 04/12/2025

Resumen

El tratamiento de aguas residuales requiere alternativas accesibles, eficientes y adaptables a sistemas descentralizados. Los filtros percoladores permiten remover materia orgánica mediante biopelícula adherida a medios filtrantes. El objetivo de este estudio fue comparar la eficiencia de rosetas impresas en 3D frente a rosetas comerciales en la remoción de DBO₅. Se operaron dos sistemas de filtración a escala piloto, configurados en paralelo y conformados por tres etapas en serie, bajo condiciones controladas en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. Durante 142 días se realizaron diez muestreos compuestos del afluente y de los efluentes por etapa, y se calculó la eficiencia de remoción de DBO₅. Las rosetas impresas en 3D alcanzaron una eficiencia promedio de 79.92 %, superior al 49.08 % obtenido con rosetas comerciales. Además, redujeron la concentración final de DBO₅ a 72.57 mg/L, frente a 136.29 mg/L del sistema comercial, superaron el 50 % de remoción desde el día 16 y alcanzaron una eficiencia máxima de 90.59 % al día 77. El sistema comercial superó el 50 % entre los días 119 y 128, y alcanzó una eficiencia máxima de 65.96 % al día 142. La mayor contribución a la remoción ocurrió en la primera etapa de ambos sistemas. Se concluye que las rosetas impresas en 3D constituyen una alternativa técnicamente viable para mejorar la remoción de materia orgánica en filtros percoladores, con potencial para aplicaciones descentralizadas y fabricación local.

Palabras clave: filtros percoladores; rosetas impresas en 3D; DBO₅; biopelícula; tratamiento de aguas residuales; manufactura aditiva.

Abstract

Wastewater treatment requires accessible, efficient, and adaptable alternatives for decentralized systems. Trickling filters remove organic matter through biofilm attached to filter media. This study compared the efficiency of 3D-printed rosette media and commercial rosettes for BOD₅ removal. Two pilot-scale filtration systems were operated in parallel, each configured with three stages in series, under controlled conditions at the wastewater treatment pilot plant of the Regional School of Sanitary Engineering and Water Resources. Over 142 days, ten composite samples were collected from the influent and stage effluents, and BOD₅ removal efficiency was calculated. The 3D-printed rosettes achieved an average removal efficiency of 79.92 %, higher than the 49.08 % obtained with commercial rosettes. They also reduced the final BOD₅ concentration to 72.57 mg/L, compared with 136.29 mg/L in the commercial system, exceeded 50 % removal by day 16, and reached a maximum efficiency of 90.59 % on day 77. The commercial system exceeded 50 % removal between days 119 and 128 and reached a maximum efficiency of 65.96 % on day 142. The largest contribution to removal occurred in the first filtration stage in both systems. These results indicate that 3D-printed rosettes are a technically viable alternative for improving organic matter removal in trickling filters, with potential for decentralized applications and local manufacturing.

Keywords: trickling filters; 3D-printed rosettes; BOD₅; biofilm; wastewater treatment; additive manufacturing.



Introducción

El tratamiento de aguas residuales domésticas constituye una necesidad prioritaria para proteger la salud pública y reducir la contaminación de los cuerpos receptores, especialmente en contextos donde existen limitaciones económicas, tecnológicas y operativas para implementar sistemas convencionales. En este escenario, los filtros percoladores representan una alternativa viable para el tratamiento biológico secundario, debido a que permiten remover materia orgánica biodegradable mediante el desarrollo de biopelícula adherida a un medio filtrante.

El desempeño de estos sistemas depende en gran medida de las características del medio de soporte, tales como la geometría, el área superficial disponible, la porosidad y las condiciones hidráulicas que favorecen el contacto entre el agua residual, el oxígeno y la biopelícula. Por esta razón, la selección y el diseño del medio filtrante son factores determinantes para mejorar la eficiencia del proceso y la estabilidad operativa del sistema.

La búsqueda de medios filtrantes alternativos ha cobrado relevancia debido a la necesidad de desarrollar soluciones más accesibles, adaptables y sostenibles para el tratamiento descentralizado. En este marco, la manufactura aditiva ofrece la posibilidad de fabricar medios con geometrías controladas y propiedades superficiales orientadas a favorecer la adhesión microbiana, reducir riesgos de colmatación y optimizar el área disponible para la formación de biopelícula.

A pesar del avance en el diseño de medios impresos en 3D para sistemas biológicos, aún se requiere evidencia experimental específica sobre su desempeño en filtros percoladores aplicados al tratamiento de aguas residuales domésticas. Esta necesidad es particularmente importante cuando la evaluación se centra en la remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅) y en la comparación directa con medios comerciales bajo condiciones controladas.

Con base en lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo analizar la eficiencia de rosetas impresas en 3D como medio filtrante para filtros percoladores en aguas residuales domésticas, comparando su desempeño con rosetas comerciales mediante la remoción de DBO₅ en un sistema piloto configurado en tres etapas en serie.

Antecedentes

La literatura sobre filtros percoladores evidencia que el tipo de medio filtrante incide directamente en la remoción de materia orgánica biodegradable, evaluada comúnmente mediante DBO₅. En particular, los estudios previos destacan la influencia de la geometría, el área superficial específica, la porosidad y las condiciones hidráulicas de operación sobre la formación de biopelícula y la eficiencia del tratamiento.

Entre los materiales alternativos evaluados, Aslam y colaboradores (2017) reportaron eficiencias de remoción de DBO₅ entre 69 % y 78 % al utilizar residuos agrícolas como medio filtrante, lo que evidenció el potencial de opciones de bajo costo para el tratamiento biológico de aguas residuales. De manera similar, Cáceres (2012) alcanzó remociones superiores al 90 % de DBO₅ mediante el uso de PET reciclado como medio de soporte, demostrando que los materiales no convencionales pueden competir con medios tradicionales en términos de eficiencia.

A nivel local, Ramírez (2013) evaluó la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales basada en filtros percoladores en la Universidad de San Carlos de Guatemala y determinó que aproximadamente el 71.7 % de la remoción de DBO₅ ocurre en la primera etapa del sistema. Asimismo, Huamaní Galindo y Pocasangre (2020) reportaron una remoción de materia orgánica de 89.70 % en filtros percoladores multietapa con piedra volcánica, utilizando DBO₅ y DQO como parámetros principales de evaluación. Estos hallazgos resaltan la importancia de la configuración del sistema y del medio filtrante en la distribución del proceso de degradación.

Con el avance de la manufactura aditiva, diversos estudios han explorado el uso de rosetas impresas en 3D como medios de soporte en sistemas de tratamiento biológico. Dong y colaboradores (2015) desarrollaron biocarriers mediante impresión 3D y los compararon con medios comerciales tipo K3, encontrando mayor rugosidad superficial, mayor hidrofiliidad y mejor capacidad de adhesión de biopelícula en los materiales impresos, condiciones asociadas con una mayor actividad microbiana.

En la misma línea, Nyuysoni y colaboradores (2022) desarrollaron rosetas cilíndricas impresas en 3D a partir de plástico reciclado y señalaron que el control del

diseño geométrico permite optimizar el área superficial específica y la porosidad, factores vinculados con la adherencia microbiana y la remoción de materia orgánica.

Por su parte, Banti y colaboradores (2023) analizaron el comportamiento de rosetas impresas en 3D en reactores biológicos y observaron una mayor retención de biomasa adherida en comparación con medios comerciales. Este aspecto es relevante en sistemas de película fija, ya que la estabilidad de la biopelícula influye directamente en la continuidad del tratamiento y en la reducción de pérdidas de biomasa durante la operación.

En conjunto, los estudios revisados muestran que los medios filtrantes alternativos y, en particular, las rosetas impresas en 3D, constituyen una línea prometedora para mejorar el desempeño de los sistemas biológicos. Sin embargo, persiste una cantidad limitada de estudios enfocados específicamente en filtros percoladores con aguas residuales domésticas y en la comparación directa con medios comerciales mediante DBO₅ bajo condiciones controladas, lo que justifica la evaluación experimental desarrollada en la presente investigación.

Materiales y método

Enfoque de la investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental aplicado, orientado a evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica en sistemas de tratamiento biológico mediante filtros percoladores. El estudio tuvo un alcance comparativo, al analizar el desempeño de dos tipos de medios filtrantes: rosetas impresas en 3D y rosetas plásticas comerciales, considerando como variable principal la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).

Variables de estudio

La variable principal del estudio fue la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅), utilizada como indicador de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en el agua residual.

Como variables secundarias se consideraron parámetros fisicoquímicos complementarios, tales como pH y temperatura, los cuales influyen en la

actividad microbiológica del sistema, aunque no constituyeron el eje central del análisis.

Definición de la muestra y tipo de muestreo

La muestra estuvo conformada por un conjunto de muestras compuestas de agua residual recolectadas de forma periódica en el sistema experimental. El muestreo fue de tipo no probabilístico por conveniencia, debido a que se seleccionaron puntos específicos del sistema (afluente y efluentes por etapa) en función de la accesibilidad y control experimental.

El número de muestras fue determinado con base en criterios estadísticos para garantizar un nivel de confianza del 95 %, asegurando la representatividad de los datos obtenidos.

Técnicas e instrumentos

La determinación de la DBO₅ se realizó mediante métodos estandarizados de laboratorio, utilizando equipos especializados para el análisis de parámetros fisicoquímicos del agua. Las muestras fueron recolectadas en el prototipo diseñado para la investigación, instalado posterior al sedimentador primario de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos —ERIS—, ubicada en la colonia Aurora II.

La recolección de muestras se realizó en puntos definidos del sistema experimental, específicamente al inicio del prototipo y a la salida de cada etapa de filtrado, con el propósito de evaluar el comportamiento progresivo de la remoción de DBO₅ a través de las diferentes unidades del sistema. Posteriormente, las muestras fueron analizadas bajo condiciones controladas de laboratorio, asegurando la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Adicionalmente, se emplearon instrumentos de medición para variables complementarias como pH y temperatura, con el fin de caracterizar las condiciones operativas del sistema y su posible influencia en el proceso biológico de remoción de materia orgánica.

Procedimiento experimental

El trabajo de campo se desarrolló en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), ubicada en la colonia Aurora II. Se operaron dos sistemas de filtros percoladores a escala piloto, configurados en paralelo; uno con rosetas

impresas en 3D y otro con rosetas comerciales. Cada sistema estuvo conformado por tres etapas en serie y operó bajo condiciones hidráulicas y orgánicas controladas.

Durante el periodo experimental, se realizaron muestreos periódicos del afluente y del efluente de cada etapa del sistema, con el fin de evaluar la evolución de la remoción de materia orgánica. Las muestras fueron recolectadas conforme a los lineamientos establecidos en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, sección 1060, "Collection and Preservation of Samples". Este procedimiento permitió mantener condiciones representativas del comportamiento del sistema y reducir posibles alteraciones que pudieran afectar la calidad de los datos.

El monitoreo se llevó a cabo a lo largo de diferentes días de operación, permitiendo analizar tanto el proceso de arranque como el comportamiento en régimen estable. Las muestras obtenidas fueron trasladadas al laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini" para su respectivo análisis, garantizando el control de calidad en cada etapa del proceso.

Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron procesados mediante análisis estadístico descriptivo, con el objetivo de determinar el comportamiento de la remoción de DBO₅ en ambos sistemas evaluados. Se calcularon valores promedio de concentración de DBO₅ para el afluente y los efluentes de cada etapa, permitiendo identificar la eficiencia de remoción a lo largo del sistema.

La eficiencia de remoción se determinó como el porcentaje de reducción de la concentración de DBO₅ entre el afluente y el efluente, así como entre cada etapa del sistema. Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo entre el sistema con rosetas impresas en 3D y el sistema con rosetas comerciales, considerando la eficiencia promedio y el comportamiento temporal como criterios de evaluación.

Asimismo, se analizó la evolución de la eficiencia en función del tiempo de operación, con el fin de identificar el periodo de arranque del sistema y el punto de estabilidad operativa. Para efectos metodológicos, la estabilidad se definió como la etapa en la cual la

biopelícula se encontraba desarrollada y los valores de eficiencia tendían a presentar menor variación temporal.

Número de réplicas

El número de réplicas experimentales se determinó mediante el método estadístico recomendado para estudios de calidad de agua establecido en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, sección 1060 B, el cual permite definir el tamaño mínimo de muestra requerido para garantizar la representatividad de los datos con un nivel de confianza determinado.

Para este estudio, se adoptó un nivel de confianza del 95 %, empleando la siguiente expresión general para la estimación del tamaño de muestra:

$$n = \left(\frac{t \cdot s}{U} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

N = número de muestras requeridas.

t = T de Student para un nivel de confianza determinado.

S = desviación estándar estimada de la población.
nivel de confianza aceptable.

Debido a que no se contaba inicialmente con una desviación estándar conocida, se adoptó el criterio recomendado por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, sección 1060 B, el cual establece que, en estudios experimentales de aguas residuales, un tamaño mínimo de 10 muestras compuestas es adecuado para garantizar un nivel de confianza del 95 % en la estimación de parámetros como la DBO₅.

En función de lo anterior, se estableció un esquema de muestreo compuesto por al menos diez (10) réplicas por condición experimental, considerando tanto el sistema con rosetas impresas en 3D como el sistema con rosetas comerciales. Cada réplica correspondió a una muestra compuesta recolectada en el afluente y en los efluentes de cada etapa del filtro percolador.

Las réplicas fueron de tipo temporal, obtenidas a lo largo del periodo de operación del sistema, con el objetivo de capturar la variabilidad inherente a los procesos biológicos, tales como fluctuaciones en la carga orgánica, desarrollo de la biopelícula y

condiciones ambientales. Este enfoque permitió evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes momentos de operación.

El periodo experimental comprendió una duración total de 142 días, contabilizados desde el primer hasta el último muestreo realizado. Durante este intervalo se distribuyeron las 10 muestras definidas para el estudio, con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

Adicionalmente, la utilización de muestras compuestas permitió reducir la variabilidad asociada a mediciones puntuales, integrando diferentes condiciones de operación en un mismo análisis y mejorando la representatividad de los resultados obtenidos.

Características de la población

La población, entendida desde el enfoque estadístico, estuvo constituida por el agua residual doméstica tratada en la planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), ubicada en la zona 13 colonia Aurora II. Este efluente presentó características típicas de aguas residuales de origen doméstico, con presencia de materia orgánica biodegradable susceptible de ser removida mediante procesos biológicos aerobios.

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron las muestras de agua residual recolectadas en el afluente y en el efluente de cada etapa del sistema de filtros percoladores, siempre que correspondieran a condiciones normales y controladas de operación del prototipo.

En atención a los criterios de representatividad del muestreo, se excluyeron aquellas muestras que no reflejaban el comportamiento normal del sistema, incluyendo las que aparentaban estar influenciadas por descargas pluviales. Estas muestras fueron descartadas cuando se observaron incrementos repentinos del caudal, cambios visibles en la apariencia del agua residual, posible dilución de la muestra o condiciones hidráulicas no habituales durante la operación del prototipo.

Diseño y definición geométrica de la roseta

La geometría final de la roseta impresa en 3D fue el resultado de un proceso iterativo de diseño y

optimización, en el cual se desarrollaron siete versiones sucesivas a partir de un modelo inicial. Cada iteración incorporó mejoras orientadas a equilibrar la funcionalidad hidráulica, la viabilidad de fabricación, el peso de la pieza, el tiempo de impresión y el tipo de material utilizado.

La primera versión de la roseta fue fabricada en nylon, con un peso aproximado de 200 gramos y un tiempo de impresión cercano a 28 horas. A partir de este prototipo inicial se realizaron modificaciones progresivas que dieron lugar a un rediseño del medio filtrante. La geometría final tuvo un peso aproximado de 20 gramos y un tiempo de impresión de 35 minutos por unidad, empleando tereftalato de polietileno glicol (PET-G) como material de fabricación.

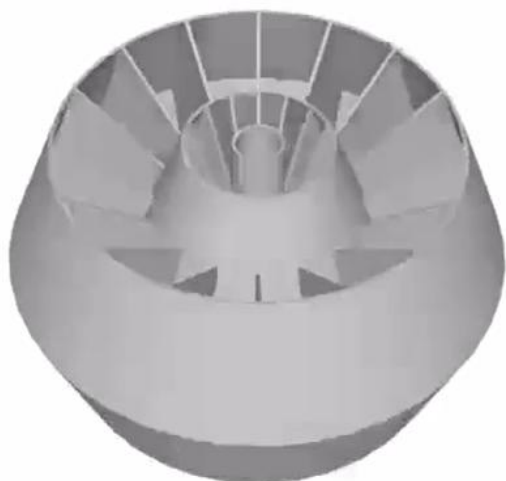
El diseño de la roseta se fundamentó en maximizar la relación entre el área superficial de contacto y el volumen del medio filtrante, con el objetivo de favorecer la adhesión y el desarrollo de la biopelícula. Esta consideración fue incorporada como criterio de diseño, dado que el área disponible para colonización microbiana es un factor relevante en sistemas de película fija.

Todos los prototipos fueron modelados mediante software de diseño asistido por computadora, utilizando Autodesk Fusion 360, lo cual permitió generar sólidos tridimensionales exportables a formatos compatibles con impresoras 3D. Desde el punto de vista hidrodinámico, la geometría final adoptó una configuración inspirada en la forma superior de una gota de agua, con el propósito de favorecer el flujo del agua a través del medio filtrante y reducir zonas de estancamiento.

Cada etapa del prototipo contó con un volumen útil de empaque de 120 L, equivalente a 0.120 m^3 de medio filtrante. Debido a que el llenado de las unidades se realizó por volumen y no mediante conteo individual durante el montaje inicial, la cantidad de medio filtrante se reportó de forma aproximada. En el sistema con rosetas impresas en 3D (ver figura 1) se colocaron aproximadamente 360 unidades por etapa, equivalentes a una densidad aparente de empaque de $3,000 \text{ unidades/m}^3$. Por su parte, en el sistema con rosetas comerciales se colocaron aproximadamente 385 unidades por etapa, correspondientes a una densidad aparente de $3,208 \text{ unidades/m}^3$. Considerando que cada

sistema estuvo conformado por tres etapas de filtrado en serie, se utilizaron aproximadamente 1,080 rosetas impresas en 3D (ver figura 1) y 1,155 rosetas comerciales (ver figura 2) en total.

Figura 1. Geometría final de la roseta prototipo impresa en 3D ($190 \text{ m}^2/\text{m}^3$)



Fuente: elaboración propia, con Autodesk Fusion 360.

Figura 2. Roseta comercial utilizada en el experimento ($160 \text{ m}^2/\text{m}^3$)



Fuente: ECODENA Guatemala.

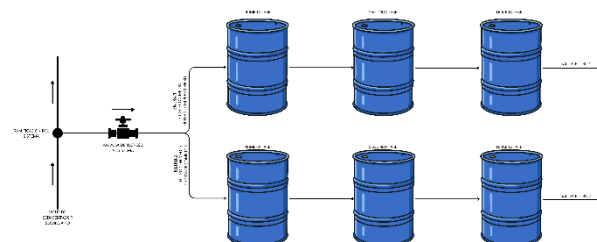
Diseño experimental

El diseño experimental consistió en la operación de dos sistemas de filtros percoladores a escala piloto,

configurados en paralelo y bajo condiciones similares de operación. Cada sistema estuvo compuesto por tres etapas en serie, permitiendo evaluar la remoción de materia orgánica en cada fase del tratamiento.

Uno de los sistemas utilizó rosetas impresas en 3D como medio filtrante, mientras que el otro empleó rosetas comerciales, con el fin de comparar su desempeño en términos de eficiencia de remoción de DBO₅. Aunque el prototipo (ver figura 3) no contó con una unidad distribuidora de caudal, ambas ramificaciones fueron instaladas con la misma configuración geométrica e hidráulica, procurando condiciones equivalentes de alimentación hacia cada batería de filtros. Durante la operación se realizaron aforos de campo en los puntos de ingreso, los cuales fueron utilizados únicamente como criterio operativo de control y no como variable de análisis posterior.

Figura 3. Diagrama de flujo del sistema de filtros percoladores instalados



Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos sobre la remoción de DBO₅ en los sistemas de filtros percoladores evaluados, así como el análisis comparativo entre las rosetas impresas en 3D y las rosetas comerciales.

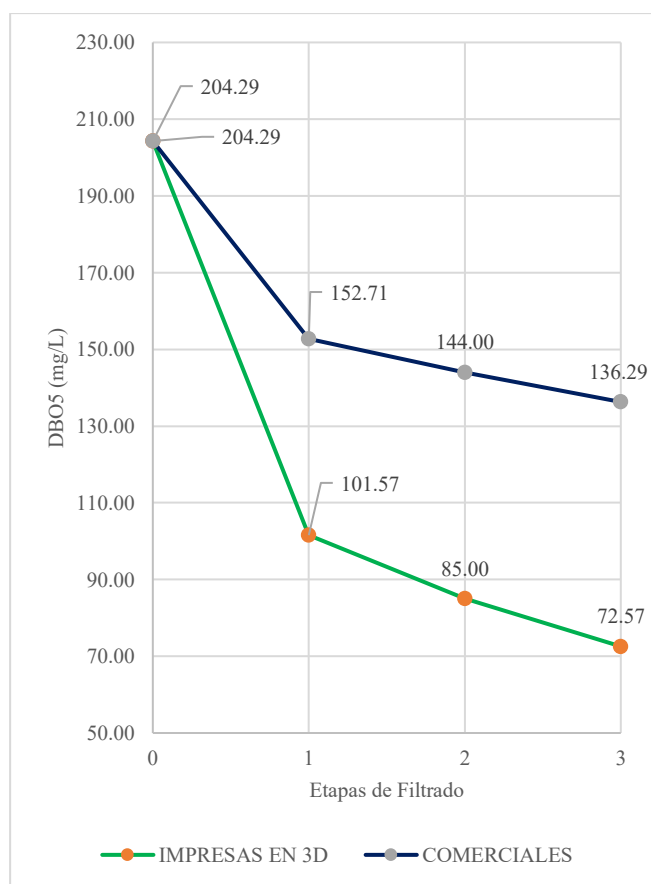
Los resultados de la Tabla 1 muestran la evolución de la concentración promedio de DBO₅ a lo largo de las etapas del filtro percolador. El afluente presentó una concentración inicial de 204.29 mg/L en ambos sistemas, lo cual permitió evaluar el desempeño bajo condiciones comparables de operación. En el sistema con rosetas impresas en 3D, la concentración disminuyó progresivamente hasta alcanzar 72.57 mg/L en el efluente, mientras que el sistema con rosetas comerciales presentó una concentración final de 136.29 mg/L.

Tabla 1. Concentración promedio de DBO₅ por sistema

Etapas de filtrado	Rosetas prototipo impresas en 3D (mg/L)	Rosetas comerciales (mg/L)
0 (Afluente)	204.29	204.29
1	101.57	152.71
2	85.00	144.00
3 (Efluente)	72.57	136.29

La Figura 4 confirma esta tendencia, evidenciando una reducción más pronunciada de la DBO₅ en el sistema con rosetas impresas en 3D. La mayor diferencia entre ambos sistemas se observa desde la primera etapa de filtrado, lo que indica un mejor desempeño inicial del medio filtrante impreso.

Figura 4. Concentración promedio de DBO₅ por sistema



De acuerdo con la Tabla 2, la eficiencia promedio de remoción de DBO₅ fue de 79.92 % para el sistema equipado con rosetas prototipo impresas en 3D, mientras que el sistema con rosetas comerciales presentó una eficiencia promedio de 49.08 %. Dichos valores fueron determinados mediante el cálculo de la media aritmética de las eficiencias de remoción

registradas para cada medio filtrante una vez superada la etapa de arranque del sistema. En este sentido, los muestreos 1 y 2 fueron excluidos del análisis estadístico debido a que correspondieron al periodo inicial de colonización microbiana y estabilización de la biopelícula sobre los medios de soporte, condición que puede generar variaciones transitorias en el desempeño del tratamiento. Por consiguiente, los promedios reportados consideran únicamente los resultados obtenidos entre los muestreos 3 y 10, permitiendo una evaluación más representativa del comportamiento operativo de los filtros percoladores y evidenciando una mayor capacidad de remoción de materia orgánica biodegradable en el sistema con medio filtrante impreso en 3D.

Tabla 2. Eficiencias de remoción obtenidas

Muestreo	Rosetas prototipo impresas en 3D (%)	Rosetas comerciales (%)
1	0.00	0.00
2	51.15	10.14
3	65.31	29.39
4	79.18	42.35
5	90.59	62.04
6	83.13	46.88
7	82.32	45.73
8	80.46	44.44
9	79.11	55.82
10	79.30	65.96
Promedio	79.92	49.08

La Tabla 3 muestra la eficiencia máxima alcanzada durante el periodo de estudio para cada uno de los medios filtrantes evaluados. El sistema con rosetas prototipo impresas en 3D logró una eficiencia máxima de remoción de DBO₅ de 90.59 %, en contraste con el 65.96 % obtenido por el sistema con rosetas comerciales. Estos resultados indican que, bajo las mejores condiciones observadas durante la operación del prototipo, el medio filtrante impreso en 3D presentó una mayor capacidad de respuesta para la remoción de materia orgánica biodegradable.

Es importante señalar que la eficiencia máxima no representa el comportamiento promedio del sistema, sino el mayor valor registrado durante el periodo experimental. La diferencia observada entre ambos sistemas se relaciona con el desempeño registrado durante la operación del prototipo, mientras que la explicación de sus posibles causas se desarrolla en la sección de discusión.

Tabla 3. Eficiencia máxima de remoción de DBO₅

Sistema	Eficiencia (%)
Rosetas impresas en 3D	90.59
Rosetas comerciales	65.96

La Tabla 4 y la Figura 5 muestran la distribución porcentual de la remoción de DBO₅ por etapa de filtración para ambos medios evaluados. En los dos sistemas, la mayor contribución a la remoción total se concentró en la primera etapa, con valores de 78 % para las rosetas prototipo impresas en 3D y 77 % para las rosetas comerciales.

Tabla 4. Distribución de remoción por etapas

Etapas de filtrado	Rosetas prototipo impresas en 3D (%)	Rosetas comerciales (%)
1	78	77
2	12	12
3	10	11

En las etapas posteriores se observó una menor contribución relativa, con 12 % en la segunda etapa para ambos sistemas, y valores de 10 % y 11 % en la tercera etapa para las rosetas impresas en 3D y comerciales, respectivamente.

La Figura 6 muestra la distribución acumulada de la remoción de DBO₅ entre las etapas del sistema. En ambos sistemas, el 100 % corresponde a la suma de la contribución relativa de cada etapa al proceso de remoción, y no a una eficiencia total del 100 %. En el sistema con rosetas impresas en 3D, la remoción acumulada alcanzó 78 % en la primera etapa, 90 % al finalizar la segunda y 100 % al completar la tercera. En el sistema con rosetas comerciales, los valores acumulados fueron 77 %, 89 % y 100 %, respectivamente.

Figura 5. Porcentaje de remoción de DBO₅ por etapa de filtrado por sistema

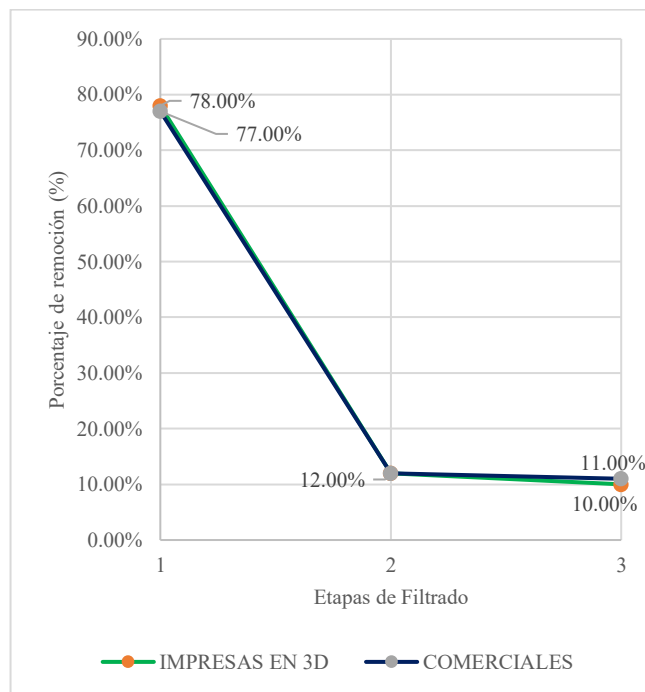
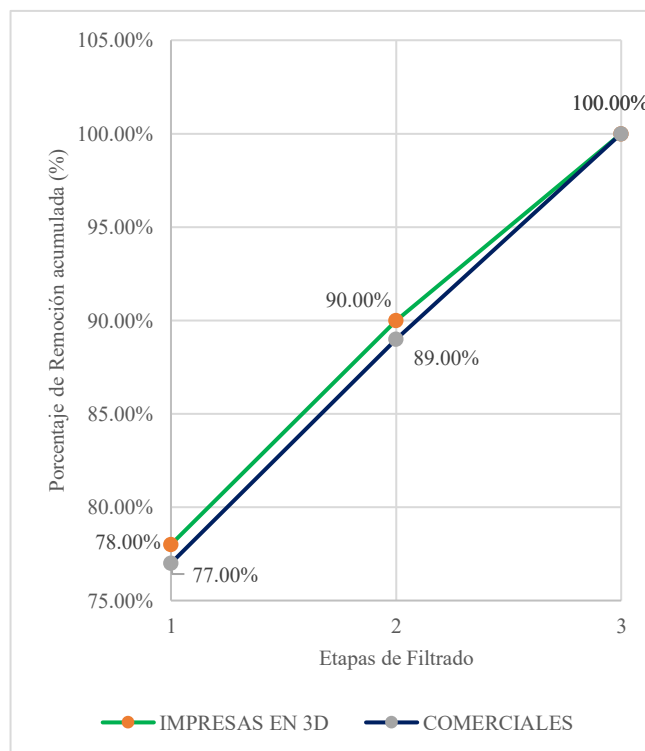


Figura 6. Porcentaje de remoción acumulada de DBO₅ por etapa de filtrado por sistema



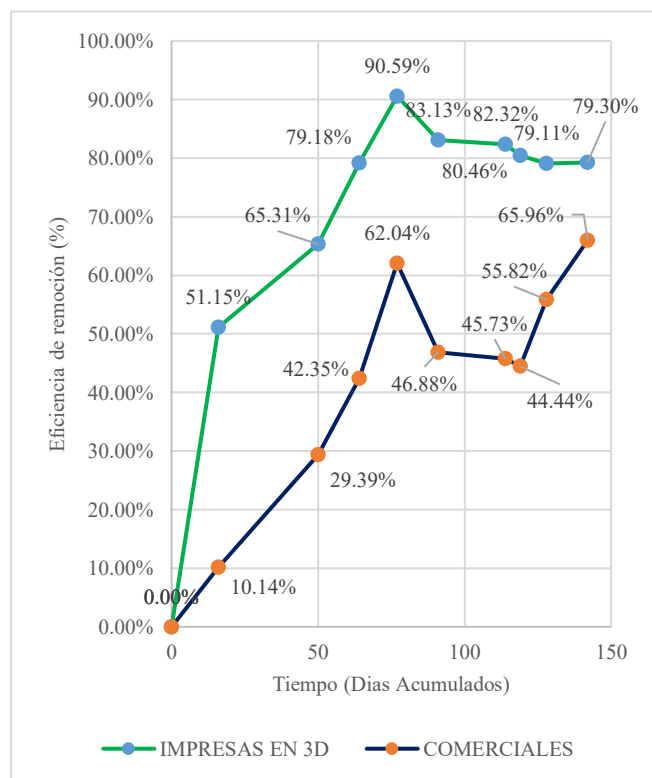
La Tabla 5 y la Figura 7 muestran la evolución de la eficiencia de remoción de DBO₅ en función del tiempo de operación. El sistema con rosetas impresas en 3D

superó el 50 % de remoción desde el día 16, mientras que el sistema con rosetas comerciales alcanzó 10.14 % en ese mismo periodo. Posteriormente, el sistema con rosetas impresas alcanzó su eficiencia máxima de 90.59 % en el día 77 y mantuvo valores cercanos al 80 % durante la etapa final del estudio.

Tabla 5. Eficiencia de remoción de DBO₅ de los sistemas en el tiempo de estudio

Tiempo (días)	Rosetas prototipo impresas en 3D (%)	Rosetas comerciales (%)
0	0.00	0.00
16	51.15	10.14
50	65.31	29.39
64	79.18	42.35
77	90.59	62.04
91	83.13	46.88
114	82.32	45.73
119	80.46	55.82
128	79.11	44.44
142	79.30	65.96

Figura 7. Eficiencia de remoción de DBO₅ de los sistemas en el tiempo de estudio



En síntesis, los resultados evidencian que el sistema con rosetas impresas en 3D presentó un mejor desempeño global en la remoción de DBO₅, reflejado

en una menor concentración final del efluente, una mayor eficiencia promedio (79.92 %) y una mayor eficiencia máxima (90.59 %) en comparación con el sistema comercial. Asimismo, el medio filtrante impreso superó el 50 % de remoción desde el día 16 y mantuvo valores cercanos al 80 % hacia la etapa final del periodo experimental.

Discusión de resultados

Los resultados evidenciaron que el sistema con rosetas impresas en 3D presentó un desempeño superior al sistema con rosetas comerciales en la remoción de DBO₅. Esta diferencia se reflejó tanto en la concentración final del efluente, que fue de 72.57 mg/L para las rosetas impresas y de 136.29 mg/L para las rosetas comerciales, como en la eficiencia promedio reportada en la Tabla 2, equivalente a 79.92 % y 49.08 %, respectivamente. La eficiencia promedio del medio impreso se ubica dentro del rango documentado por Aslam et al. (2017), quienes reportaron remociones entre 69 % y 78 % al emplear residuos agrícolas como medio filtrante, y se aproxima a valores observados en sistemas biológicos optimizados. En este sentido, los resultados obtenidos respaldan lo planteado en los antecedentes sobre el potencial de los medios no convencionales para alcanzar eficiencias competitivas en filtros percoladores.

La diferencia entre ambos sistemas puede relacionarse con las características geométricas y superficiales del medio filtrante. Las rosetas impresas en 3D presentaron un área superficial específica de 190 m²/m³, superior a los 160 m²/m³ de las rosetas comerciales utilizadas en el experimento, lo que pudo favorecer una mayor superficie disponible para la adhesión microbiana y el contacto entre el agua residual y la biopelícula. Esta interpretación es coherente con Dong et al. (2015), quienes indicaron que los biocarriers fabricados mediante impresión 3D pueden presentar mayor rugosidad superficial, hidrofiliidad y capacidad de adhesión de biopelícula en comparación con medios comerciales. Asimismo, coincide con Nyuysoni et al. (2022), quienes señalaron que el control de la geometría, el área superficial específica y la porosidad permite optimizar el desempeño de medios impresos en 3D para sistemas biológicos.

El comportamiento por etapas, presentado en la Tabla 4 y la Figura 5, mostró que la mayor proporción de la remoción ocurrió en la primera etapa del sistema.

En el medio impreso en 3D, esta etapa concentró el 78 % de la remoción total, mientras que en el sistema comercial concentró el 77 %. Estos valores son coherentes con Ramírez (2013), quien determinó que aproximadamente el 71.7 % de la remoción de DBO₅ ocurre en la primera etapa de filtros percoladores. La coincidencia entre ambos estudios sugiere que, independientemente del tipo de medio filtrante, la etapa inicial tiene un papel dominante debido a la mayor disponibilidad de sustrato orgánico biodegradable al ingreso del sistema.

No obstante, las etapas segunda y tercera también contribuyeron al proceso de tratamiento. En conjunto, aportaron 22 % de la remoción total en el sistema con rosetas impresas en 3D y 23 % en el sistema con rosetas comerciales. Por lo tanto, aunque su contribución relativa fue menor, estas unidades funcionaron como etapas de pulimiento y permitieron reducir la materia orgánica residual hasta las concentraciones finales observadas en la Tabla 1. Este comportamiento es consistente con los antecedentes de Huamaní Galindo y Pocasangre (2020), quienes reportaron altas remociones en filtros percoladores multietapa con piedra volcánica, destacando la relevancia de la configuración por etapas en el desempeño global del sistema.

El comportamiento temporal, presentado en la Tabla 5 y la Figura 7, evidenció diferencias importantes en el periodo de arranque. El sistema con rosetas impresas en 3D superó el 50 % de remoción desde el día 16, mientras que el sistema con rosetas comerciales alcanzó 10.14 % en ese mismo día y superó el 50 % hasta el intervalo comprendido entre los días 119 y 128. Esta diferencia sugiere una colonización más temprana o una estabilización más rápida de la biopelícula sobre el medio impreso. Esta interpretación es compatible con Banti et al. (2023), quienes observaron una mayor retención de biomasa adherida en medios impresos en 3D respecto a medios comerciales, aspecto que puede favorecer el arranque y la continuidad del proceso biológico.

La eficiencia máxima del sistema con rosetas impresas en 3D fue de 90.59 %, alcanzada en el día 77, mientras que el sistema con rosetas comerciales alcanzó una eficiencia máxima de 65.96 % al día 142, según la Tabla 3 y la Tabla 5. El valor máximo obtenido con el medio impreso supera el rango reportado por Aslam et

al. (2017) y se aproxima a las remociones superiores al 90 % informadas por Cáceres (2012) al utilizar PET reciclado como medio de soporte. Esta comparación refuerza la relevancia del diseño geométrico y de la manufactura aditiva como herramientas para mejorar el desempeño de medios filtrantes en sistemas de película fija.

La distribución acumulada de remoción, mostrada en la Figura 6, indicó un comportamiento muy similar entre ambos sistemas en términos de contribución relativa por etapa: 78 %, 90 % y 100 % para las rosetas impresas en 3D, y 77 %, 89 % y 100 % para las rosetas comerciales. Por ello, la diferencia principal entre ambos medios no se observó en la distribución porcentual de la remoción por etapas, sino en la magnitud global de la remoción alcanzada y en la velocidad de arranque del proceso. Esta distinción es importante, ya que evita interpretar el 100 % acumulado como eficiencia total y permite relacionar la ventaja del medio impreso con su capacidad de lograr mayores eficiencias bajo una configuración hidráulica semejante.

Finalmente, la estabilidad operativa observada en el sistema con rosetas impresas se evidenció en la tendencia registrada después del día 77, cuando las eficiencias se mantuvieron cercanas al 80 % hasta el final del periodo experimental. En contraste, el sistema comercial mostró un aumento más gradual y alcanzó su valor máximo al cierre del estudio. Este comportamiento permite inferir que el medio impreso no solo alcanzó mayores eficiencias, sino que también logró un desempeño más temprano y sostenido durante la operación. En conjunto, los resultados obtenidos son coherentes con los antecedentes revisados, al confirmar que el área superficial, la geometría, la porosidad y la capacidad de retención de biopelícula son factores determinantes en la eficiencia de filtros percoladores. Además, aportan evidencia experimental local sobre el uso de rosetas impresas en 3D como alternativa técnicamente viable para el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas.

Conclusiones

Las rosetas impresas en 3D presentaron un mejor desempeño que las rosetas comerciales en la remoción de DBO₅ en filtros percoladores. El sistema con medio impreso alcanzó una eficiencia promedio de 79.92 %, frente a 49.08 % del sistema comercial, y redujo la

concentración final de DBO₅ hasta 72.57 mg/L, en comparación con 136.29 mg/L.

La mayor proporción de remoción se concentró en la primera etapa de filtrado en ambos sistemas, con 78 % para las rosetas impresas en 3D y 77 % para las rosetas comerciales. Las etapas segunda y tercera aportaron una remoción complementaria, funcionando como unidades de pulimiento del proceso.

El sistema con rosetas impresas en 3D mostró un arranque más rápido y un desempeño más sostenido. Superó el 50 % de remoción desde el día 16, alcanzó una eficiencia máxima de 90.59 % en el día 77 y mantuvo valores cercanos al 80 % hacia el final del estudio. En cambio, el sistema comercial superó el 50 % entre los días 119 y 128 y alcanzó su eficiencia máxima de 65.96 % al día 142.

Los resultados indican que las rosetas impresas en 3D constituyen una alternativa técnicamente viable para mejorar la remoción de materia orgánica en filtros percoladores. Su diseño geométrico, mayor área superficial específica y posibilidad de fabricación local mediante manufactura aditiva favorecen su aplicación en sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales.

Se recomienda evaluar este medio filtrante a mayor escala y bajo condiciones reales de operación, incorporando otros parámetros de calidad del agua, como DQO, sólidos suspendidos y nutrientes, así como análisis de durabilidad, colmatación y comportamiento hidráulico.

Agradecimientos

Los autores agradecen al MSc. Ing. Julián Duarte Jiménez, MSc. Zenón Much Santos e Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, Ph. D., por su orientación técnica; al Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina” y al personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II por el apoyo brindado durante la fase experimental; y al FABLAB de la Dirección General de Investigación (DIGI) por facilitar el uso de sus instalaciones e impresoras 3D para la fabricación de los prototipos.

Financiamiento

La investigación fue desarrollada con fondos propios del autor y contó con el respaldo del

Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y del FABLAB, perteneciente a la Dirección General de Investigación (DIGI).

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés que haya influido en el desarrollo o los resultados de la presente investigación.

Como citar este documento

Cano Jerez, A. R., & Pocasangre Collazos, A. E. (2025). Eficiencia de rosetas impresas en 3D para la remoción de DBO₅ en filtros percoladores. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 20(1), 1–12. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v20i1.2134>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Diseño de la investigación, trabajo de campo y laboratorio, recolección y análisis de datos, así como la elaboración del documento: A.R.C.J.

Supervisión de investigación y revisión del manuscrito: A.E.P.C.

Referencias

- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). American Public Health Association.
- Aslam, M. M. A., Khan, Z. M., Sultan, M., Niaz, Y., Mahmood, M. H., Shoaib, M., & Shakoor, A. (2017). Performance evaluation of trickling filter-based wastewater treatment system utilizing cotton sticks as filter media. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(5), 1955–1962. <https://doi.org/10.15244/pjoes/69443>
- Banti, D. C., Samaras, P., Chioti, A. G., Mitsopoulos, A., Tsangas, M., Zorpas, A., & Sfetsas, T. (2023). Improvement of MBBR performance by the addition of 3D-printed biocarriers fabricated with 13X and bentonite. *Resources*, 12(7), 81. <https://doi.org/10.3390/resources12070081>
- Cáceres, J. (2012). Implementación de material de desecho PET como elemento filtrante en filtros biológicos. *Agua, Saneamiento & Ambiente*,

- 7(1), 18–22.
<https://doi.org/10.36829/08ASA.v7i1.1461>
- Dong, Y., Fan, S.-Q., Shen, Y., Yang, J.-X., Yan, P., Chen, Y.-P., Li, J., Guo, J.-S., Duan, X.-M., Fang, F., & Liu, S.-Y. (2015). A novel bio-carrier fabricated using 3D printing technique for wastewater treatment. *Scientific Reports*, 5, 12400. <https://doi.org/10.1038/srep12400>
- Huamaní Galindo, Z., & Pocasangre Collazos, A. E. (2020). Estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 15(1), 53–67. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v15i1.1133>
- Nyuysoni, S. B., Mutua, J. M., & Home, P. G. (2022). Mathematical model development and 3D printing of cylindrically shaped biofilm carrier media from recycled plastic waste for wastewater treatment. *Journal of Environmental Protection*, 13, 15–31. <https://doi.org/10.4236/jep.2022.131002>
- Ramírez, S. (2013). Determinación de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 8(1), 20–24. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v8i1.1479>