

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO
FACULTAD DE POSGRADO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:

Membranas de nanocelulosa bacteriana para la filtración de aguas residuales oleosas: efecto del tiempo de fermentación y del tratamiento de blanqueo

Autor: Luis Isaac Velasco Morales
Autor: Aarón Josué Arévalo Padilla

Tutor: Manuel Alejandro Fiallos Cárdenas

Milagro, año 2026

Resumen

La disposición inadecuada de aceites de cocina usados (UCO, del inglés *Used Cooking Oil*) representa un riesgo ambiental significativo. Esto se debe a que reduce el oxígeno disuelto en los cuerpos de agua y puede obstruir hasta el 50% de las redes de saneamiento. Los tratamientos convencionales de aguas oleosas suelen ser ineficientes o generar residuos secundarios potencialmente tóxicos. En este contexto, las membranas de nanocelulosa bacteriana (NCB), reportadas en la literatura por presentar una alta porosidad, emergen como una alternativa sostenible para la filtración aceite-agua. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del tiempo de fermentación y del agente blanqueador en el desempeño de membranas de NCB para la remoción de contaminantes en emulsiones aceite-agua. Para ello, se prepararon membranas variando el tiempo de fermentación (7, 14 y 28 días) y el agente de blanqueo (hidróxido de sodio o peróxido de hidrógeno). El desempeño se evaluó mediante ensayos de filtración por lotes a presión constante, analizando la remoción de turbidez, la retención de sólidos suspendidos y la permeabilidad al agua. Los resultados indicaron que el tiempo de fermentación fue un factor determinante: las membranas producidas durante 28 días y blanqueadas con NaOH alcanzaron remociones de turbidez superiores al 95% y una retención de sólidos del 85%. No obstante, la mayor consolidación estructural también incrementó la compactación de la membrana durante la filtración, reduciendo los caudales de permeado. En conjunto, los resultados respaldan el potencial de las membranas de NCB como una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas contaminadas con UCO.

Palabras clave: Nanocelulosa bacteriana, Membranas de filtración, Separación aceite-agua, Aceites de cocina usados, Filtración al vacío.

Bacterial nanocellulose membranes for the filtration of oily wastewater: effect of fermentation time and bleaching treatment

Abstract

Improper disposal of used cooking oil (UCO) poses a significant environmental risk. This is because it reduces dissolved oxygen in water bodies and can clog up to 50% of sanitation networks. Conventional oily wastewater treatments are often inefficient or generate potentially toxic secondary waste. In this context, bacterial nanocellulose (BNC) membranes, reported in the literature for their high porosity, are emerging as a sustainable alternative for oil-in-water filtration. The objective of this study was to evaluate the effect of fermentation time and bleaching agent on the performance of BNC membranes for contaminant removal in oil-in-water emulsions. To this end, membranes were prepared by varying the fermentation time (7, 14, and 28 days) and the bleaching agent (sodium hydroxide or hydrogen peroxide). Performance was evaluated through constant-pressure batch filtration tests, analyzing turbidity removal, suspended solids retention, and water permeability. The results indicated that fermentation time was a determining factor: membranes produced for 28 days and bleached with NaOH achieved turbidity removals exceeding 95% and solids retention of 85%. However, the greater structural consolidation also increased membrane compaction during filtration, reducing permeate flow rates. Overall, the results support the potential of NCB membranes as an environmentally friendly alternative for treating UCO-contaminated water.

Keywords: Bacterial nanocellulose, Filtration membranes, Oil-water separation, Used cooking oils, Vacuum filtration.

INTRODUCCIÓN

Los aceites de cocina constituyen uno de los ingredientes más utilizados a nivel global; favorecidos por su bajo costo y fácil acceso, han facilitado su integración en la dieta cotidiana (Soundararajan et al., 2023). Se estima que el consumo anual per cápita oscila entre 21,74 litros (≈ 60 ml/día) y 54,35 litros (≈ 149 ml/día) (Sultana, Roddick, & Pramanik, 2024). No obstante, los residuos generados tras su uso, conocidos como UCO, representan una amenaza creciente para la salud pública y el medio ambiente (Kumar et al., 2025). Su disposición inadecuada en sistemas de alcantarillado provoca obstrucciones que afectan hasta el 47 % de las redes de saneamiento en países desarrollados, con costos de mantenimiento anuales de hasta 25.000 millones en el caso de Estados Unidos (Sultana, Roddick, & Pramanik, 2024; Sultana, Roddick, Jefferson, et al., 2024). En Japón, apenas el 34 % de los municipios dispone de sistemas formales de recolección, que cubren apenas el 10 % de los hogares (Lee et al., 2023). En países en desarrollo, los hogares generan en promedio 345 litros diarios de aguas grises oleosas, de los cuales el 69 % se vierte directamente en desagües abiertos, el 9 % en suelos y solo el 7 % recibe tratamiento (Lewis et al., 2024).

El impacto ambiental del vertido de 1 kg de UCO es considerable, pudiendo contaminar hasta 1000 m² de agua superficial (Frota de Albuquerque Landi et al., 2022). Esta contaminación se manifiesta principalmente mediante la reducción de los niveles de oxígeno disuelto en cuerpos de agua, debido al incremento de la demanda química de oxígeno (DQO), lo que compromete la calidad del hábitat acuático (Lee et al., 2024). Frente a una proyección de crecimiento anual del consumo de aceites de cocina del 3,6 % hasta 2025 (FAO, 2025), se vuelve apremiante implementar soluciones eficientes para el tratamiento de estos residuos.

En la actualidad, se aplican distintos tratamientos convencionales para aguas contaminadas con aceites, incluyendo métodos físicos, como separación por gravedad y flotación por aire (Li et al., 2023); métodos químicos, como demulsificadores, coagulación y floculación (Xin et al., 2024), y métodos biológicos, como el uso de microorganismos demulsificadores (Cai et al., 2019). No obstante, estos enfoques presentan limitaciones importantes, en donde los métodos físicos muestran baja eficiencia con grandes volúmenes o emulsiones estabilizadas (Garza et al., 2023), los químicos generan subproductos potencialmente tóxicos que requieren manejo adicional, y los biológicos demandan amplias superficies de terreno (Cai et al., 2019). Asimismo, alternativas como la producción de biodiésel mediante transesterificación o la obtención de jabón por saponificación, implementadas en países como Alemania y Japón, enfrentan altos costos operativos, baja eficiencia en sistemas descentralizados y dificultades en

la recolección de residuos domésticos (Frota de Albuquerque Landi et al., 2022; Lee et al., 2024).

Estas limitaciones han impulsado el desarrollo de tecnologías de filtración por membranas, las cuales no requieren adición de químicos ni consumos energéticos elevados, constituyéndose en soluciones ambientalmente responsables (Guevara et al., 2025; Xin et al., 2024). Entre estas, las membranas de NCB han mostrado eficiencia prometedora en la separación de mezclas aceite-agua (Sai et al., 2020). Sin embargo, los estudios previos han prestado escasa atención a la caracterización integral del agua tratada, incluyendo parámetros fisicoquímicos como turbidez, pH y conductividad eléctrica. Asimismo, el desempeño de estas membranas bajo condiciones de operación más exigentes, por ejemplo, flujos continuos, emulsiones estabilizadas y aplicaciones piloto, ha sido poco explorado.

Además, persiste una comprensión limitada sobre la influencia de las variables de producción de la membrana, como el tiempo de fermentación y el tipo de blanqueo, en las propiedades estructurales resultantes, incluyendo el contenido de humedad y la capacidad de rehidratación, y sobre cómo estas propiedades afectan el desempeño hidráulico y la eficiencia de remoción de contaminantes durante la filtración de emulsiones. Esta falta de conocimiento dificulta establecer criterios de diseño que permitan optimizar las condiciones de fabricación y mejorar el rendimiento de estas membranas en aplicaciones de tratamiento de aguas residuales oleosas. A pesar de que se han desarrollado membranas con eficiencias elevadas, como las basadas en quitosano (99%) o estructuras de Janus (99,36%), sus altos costos, complejidad estructural y necesidad de modificaciones funcionales, limitan su escalabilidad industrial (Jagtap et al., 2025). Por el contrario, las membranas de NCB emergen como una alternativa competitiva y sostenible, gracias a características reportadas en la literatura donde se destaca que poseen una arquitectura nanofibrilar altamente porosa y poseen un tamaño de poro generalmente pequeño, además de propiedades intrínsecas como biocompatibilidad y biodegradabilidad (Mautner & Bismarck, 2021; Turganova et al., 2025). Propiedades que permiten que la NCB funcione como una matriz porosa segura y eficiente para la remoción de contaminantes en efluentes acuosos, a la vez que su bajo costo de producción ($\approx 14,8$ USD/kg frente a 27 USD/kg de sistemas convencionales) la hace viable incluso en comunidades con infraestructura tecnológica limitada (Penloglou et al., 2023).

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto del tiempo de fermentación (7, 14 y 28 días) y del agente blanqueador (NaOH vs. H₂O₂) en el desempeño de membranas de NCB en la filtración de emulsiones aceite-agua simuladas. Se analizarán variables de respuesta como flujo de permeado, remoción de turbidez y retención de sólidos,

correlacionando estos parámetros con propiedades estructurales de las membranas. Se plantea la hipótesis de que mayores tiempos de fermentación y blanqueo con NaOH favorecerían la formación de membranas con una estructura más consolidada, lo que aumentaría la eficiencia de remoción de contaminantes, aunque también podría reducir el flujo de permeado debido a efectos de compactación. De esta manera, el estudio busca ofrecer una comprensión integral del potencial de las NCB en la filtración sostenible de UCO y establecer bases para su futura implementación a escala industrial.

METODOLOGÍA

Se implementó un diseño experimental bifactorial para evaluar el efecto del tiempo de fermentación y del agente de blanqueo sobre las propiedades de las membranas de NCB y su desempeño en la filtración de emulsiones aceite-agua. Este enfoque permitió analizar el efecto de dos variables independientes y su posible interacción sobre las propiedades de las membranas y su desempeño en el proceso de filtración.

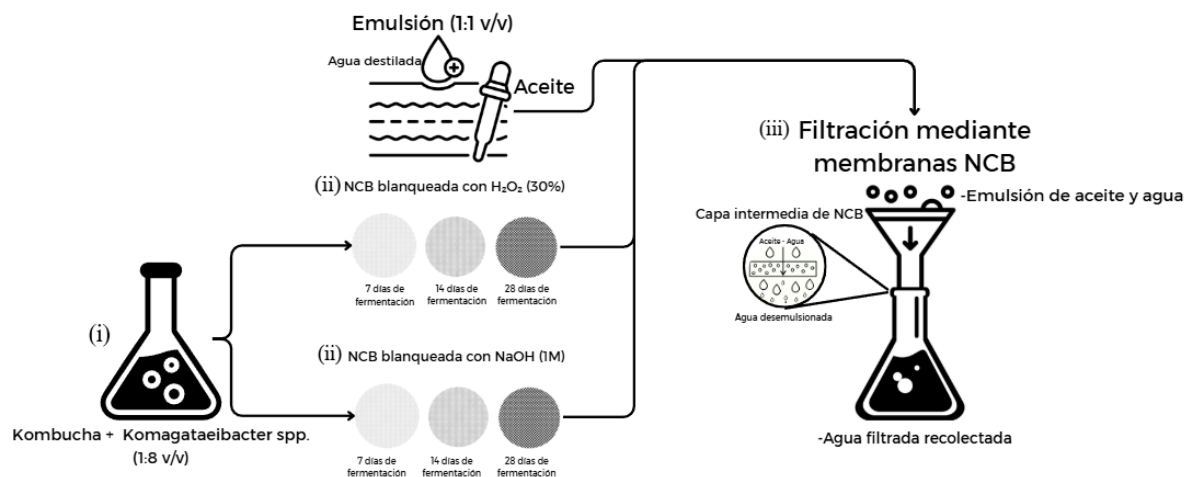
Las variables independientes fueron el tiempo de fermentación y el agente de blanqueo. El tiempo de fermentación se estableció en tres niveles (7, 14 y 28 días) con el propósito de obtener membranas con diferentes densidades y espesores. En cuanto al agente de blanqueo, se utilizaron hidróxido de sodio 1 M y peróxido de hidrógeno al 30 %, con el fin de modificar las propiedades superficiales y estructurales del material.

Las variables de respuesta incluyeron parámetros de caracterización de las membranas, como el contenido de humedad (COH), la capacidad de rehidratación (CRA) y el espesor. Además, se evaluó el rendimiento de filtración mediante la medición del flujo de permeado (FP) y de diversos parámetros fisicoquímicos del agua filtrada, entre ellos pH, sólidos disueltos totales, salinidad, conductividad eléctrica, turbidez, oxígeno disuelto y saturación de oxígeno.

La combinación de los factores experimentales dio lugar a seis tratamientos (3 tiempos de fermentación \times 2 agentes de blanqueo), cada uno realizado por triplicado, para un total de 18 unidades experimentales correspondientes a membranas de NCB producidas y evaluadas individualmente. El estudio se llevó a cabo a temperatura ambiente.

Figura 1

Representación esquemática de la síntesis, blanqueo y uso de membranas de NCB para la separación de agua contaminada con residuos oleosos



Materiales

Todos los insumos de uso general fueron adquiridos en el mercado local, mientras que los reactivos analíticos fueron obtenidos de proveedores especializados. En particular, se emplearon azúcar sin refinar (San Carlos), té verde (*Camellia sinensis*) (Ile Shop), vinagre blanco al 5% (Snob), aceite de cocina (La Favorita) y agua destilada, todos disponibles comercialmente. El peróxido de hidrógeno al 30% y el hidróxido de sodio 1 M fueron adquiridos de Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA). El inóculo, dominado por *Komagataeibacter* spp., fue proporcionado por el Laboratorio de Microbiología de la Universidad Estatal de Milagro (UNEMI).

Producción de NCB

El medio de cultivo se preparó disolviendo sacarosa (83,3 g/L), vinagre (33,3 ml) y hojas de té verde (3,67 g/l) en agua destilada (M. Y. Liu et al., 2021; Ramírez Tapias et al., 2022). La mezcla se infusionó a 100 °C durante 15 minutos en una estufa eléctrica calefactora marca TOKIWA TI-5714 (Japón), se filtró y se enfrió a 30°C antes de la inoculación con un cultivo madre de *Komagataeibacter* spp. (proporción 1:8 v/v). Posteriormente, 200 ml del medio inoculado se dispensaron en frascos de vidrio (capacidad 400 ml, diámetro 8 cm), cubiertos con gasas para facilitar el intercambio gaseoso. Las muestras se incubaron a 25 ± 2 °C durante 7, 14 y 28 días, con tres réplicas por período. La cinética de formación de la NCB se evaluó siguiendo el método descrito por Kitwetcharoen et al. (2024). Los biofilms resultantes se recolectaron, se lavaron exhaustivamente con agua destilada estéril hasta alcanzar un pH de 7.0 ± 0.2 (Zorila et al., 2025).

Tratamiento de NCB

Las membranas se trataron por inmersión durante 1 h a 25 ± 2 °C, según el protocolo de Amarasekara et al. (2024). Se aplicaron dos tratamientos alternativos: (i) peróxido de hidrógeno (30%) para un blanqueamiento eficiente con mínima degradación estructural (Bolat et al., 2023), e (ii) hidróxido de sodio (1 M) para eliminar impurezas, preservando la integridad de la nanocelulosa (Srivastava and Mathur, 2025). Posteriormente, las membranas se enjuagaron con agua destilada hasta alcanzar un pH de $7,0 \pm 0,2$ según Zorila et al. (2025), y se almacenaron en matraces de vidrio de 100 ml con 50 ml de agua destilada a temperatura ambiente con el fin de evitar la deshidratación de estas hasta su uso en ensayos posteriores.

Secado de membranas

El secado de las membranas se llevó a cabo según el protocolo descrito por Bodea et al. (2021). Se utilizó un horno marca MMM Group, (Ecocell, Alemania) configurado a una temperatura de 50 ± 1 °C. El proceso se mantuvo hasta alcanzar un peso constante, determinado mediante mediciones gravimétricas. Cabe señalar que el secado térmico puede inducir cambios estructurales en la red de NCB debido a fuerzas capilares asociadas a la eliminación de agua, lo que podría reducir la porosidad y provocar un colapso parcial de la estructura fibrilar (Marchiori et al., 2024). Por tal motivo, las membranas secadas se utilizaron únicamente para la determinación de propiedades como peso seco, peso húmedo y capacidad de rehidratación; no fueron empleadas en los ensayos de filtración, por lo que los posibles efectos del secado no afectan los resultados del desempeño.

Contenido de humedad (COH)

El COH de las muestras se determinó pesándolas antes y después del secado, siguiendo el procedimiento descrito previamente, utilizando una balanza analítica BOECO BAS 31 Plus (Alemania, precisión de ± 0.0001 g). El cálculo se realizó según el protocolo de (Galdino et al., 2020), empleando la Ecuación 1.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \left(\frac{W_{\text{húmedo}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{húmedo}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde $w_{\text{húmedo}}$ y w_{seco} son los pesos de la membrana húmeda y seca (g), respectivamente. Las mediciones se realizaron por triplicado para cada tratamiento (fermentación de 7, 14 y 28 días, blanqueadas con NaOH o H₂O₂) a 25 ± 2 °C; los datos se emplearon para caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las membranas antes de las pruebas de filtración.

Capacidad de Rehidratación (CRA)

La CRA de las membranas se determinó siguiendo el protocolo adaptado de Bodea et al. (2021). Las membranas, previamente secadas según el procedimiento descrito en la sección “Secado”, se sumergieron en 20 ml de agua destilada a 25 ± 2 °C durante 1 h. Posteriormente, se retiró el exceso de agua con papel absorbente y se pesaron en una balanza analítica modelo BOECO BAS 31 Plus (Alemania, precisión de ± 0.0001 g). La CRA (%) se calculó mediante la Ecuación 2.

$$WRV (\%) = \left(\frac{W_2 - W_0}{W_0} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Donde W_2 y W_1 son los pesos de la membrana rehidratada y seca (g), respectivamente. Las mediciones se realizaron por triplicado para cada tratamiento.

Espesor de membranas.

El espesor de las membranas se midió con un vernier (precisión $\pm 0,01$ mm), siguiendo el protocolo de Azmi et al. (2023). Se realizaron mediciones en diez puntos uniformemente distribuidos en la superficie de cada membrana, calculando el espesor promedio mediante la Ecuación 3:

$$\bar{X} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i \quad (3)$$

Donde x_i es el espesor de cada punto (mm). Las mediciones se efectuaron por triplicado para cada tratamiento.

Evaluación de flujo de permeado (FP)

El flujo de permeado (FP) se calculó según la Ecuación 4 descrita por Wei et al. (2024).

$$F = \frac{V}{A \cdot T} \quad (4)$$

Donde, V: volumen filtrado (L), A: área efectiva de la membrana (m^2), T: tiempo de permeación (horas). V se midió con una probeta graduada (precisión $<1\%$), y “A” se determinó mediante el área de la circunferencia, usando el radio de la membrana medido con un vernier (precisión ± 0.01 mm). Las mediciones se realizaron por triplicado para garantizar la reproducibilidad, siguiendo las condiciones experimentales descritas.

Emulsiones

Las emulsiones aceite-agua (1:1, 150 ml) se prepararon siguiendo el protocolo descrito por Shah et al. (2024). Las mezclas se realizaron en matraces de vidrio de 500 ml con un agitador magnético MSH-420 (Boeco, Alemania), usando una barra magnética de 41 x 8mm a 500-700 rpm durante 10 minutos a 25 ± 2 °C, conforme a Xu et al. (2024). La estabilidad de la emulsión se verificó visualmente, confirmando la ausencia de separación de fases.

Filtración de emulsiones

Los experimentos se realizaron a 25 ± 2 °C utilizando un sistema de filtración al vacío de vidrio de borosilicato (matraz de 500 ml, embudo de 300 ml) acoplado a una bomba de vacío VP260 (Colombia), a una presión constante de 0.3 ± 0.02 bar, según las condiciones reportadas por Huang et al. (2025). Las membranas de NCB, clasificadas por tiempo de fermentación (7, 14 y 28 días) y blanqueamiento con hidróxido de sodio (NaOH) o peróxido de hidrógeno (H₂O₂) (denominadas 7D NaOH, 7D H₂O₂, 14D NaOH, 14D H₂O₂, 28D NaOH y 28D H₂O₂), se colocaron entre el embudo y la base del sistema según lo descrito por Sadler y Crick (2021). La emulsión aceite-agua se vertió sobre la membrana, recolectando el permeado en el matraz inferior para análisis posterior, reemplazando las membranas tras cada ensayo (Xin et al., 2024).

Mediciones de parámetros fisicoquímicos

La calidad del agua filtrada se evaluó mediante la medición de parámetros fisicoquímicos (pH, sólidos disueltos totales, salinidad, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y saturación de oxígeno) en tres etapas del proceso: antes de la emulsión, durante la emulsificación y tras la filtración. Las mediciones se realizaron por triplicado en muestras de 300 ml utilizando un medidor multiparamétrico HACH HQ40d Multi y un Water Quality Tester C-600 (Hach, EE. UU.) para los parámetros mencionados, y un turbidímetro modelo HI98703 FAST TRACKER (Hanna Instruments, EE. UU.), calibrado con patrones de 0.1, 20 y 1000 NTU. Los resultados se compararon con los valores de referencia de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para evaluar la conformidad del agua filtrada con los estándares de calidad.

Procesamiento estadístico de la información

Los parámetros fisicoquímicos del agua filtrada se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) bifactorial para determinar los efectos del tiempo de fermentación de las membranas de NCB (7, 14 y 28 días) y el tratamiento de blanqueamiento (NaOH o H₂O₂) sobre estas variables. Se calcularon la media y la desviación estándar para caracterizar las propiedades fisicoquímicas. El análisis se realizó en RStudio (versión 4.4.0) utilizando los paquetes stats para el ANOVA y agricolae para pruebas post hoc, verificando normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene) con un nivel de significancia de $P <$

0.05. Las diferencias significativas entre grupos se identificaron mediante la prueba de Tukey HSD, cuyos resultados se presentan a continuación en tablas y se detallan en la sección de resultados.

RESULTADOS

Análisis de las propiedades físicas y químicas del agua filtrada mediante membranas de NCB blanqueadas con NaOH

La eficiencia del proceso de filtración con membranas de NCB blanqueadas con NaOH fue evaluada a través de diversos parámetros fisicoquímicos, cuyos valores antes y después del filtrado se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1

Efecto del tratamiento con membranas de NCB blanqueadas con NaOH sobre parámetros fisicoquímicos del agua

Parámetros	7D		14D		28D	
	A.F	D.F	A.F	D.F	A.F	D.F
PH	7.80 (0.10) ^a	7.60 (0.10) ^a	7.83 (0.06) ^a	5.13 (0.06) ^b	7.88 (0.01) ^a	4.99 (0.01) ^b
Turbidez (NTU)	2.04 (0.03) ^b	5.57 (0.06) ^a	1.50 (0.01) ^b	7.45 (0.01) ^b	0.66 (0.01) ^b	2.10 (0.01) ^a
Conductividad (μs/cm)	426.00 (1.00) ^a	412.67 (0.58) ^b	288.00 (1.00) ^b	332.00 (1.00) ^a	161.67 (0.58) ^a	151.67 (0.58) ^b
Solidos Disueltos (mg/l)	202.50 (0.36) ^a	199.10 (0.10) ^b	137.90 (0.10) ^b	159.80 (0.1) ^a	78.00 (1.00) ^a	78.67 (1.53) ^a
Salinidad	0.18 (0.01) ^b	0.21 (0.01) ^a	0.14 (0.01) ^b	0.16 (0.01) ^a	0.01 (0.00) ^a	0.01 (0.00) ^a
Oxígeno disuelto (mg/L)	8.03 (0.02) ^a	5.84 (0.01) ^b	7.81 (0.02) ^b	8.56 (0.01) ^a	8.23 (0.01) ^a	8.17 (0.01) ^b
Saturación	94.27	69.30	95.60	98.30	98.37	93.50
Oxígeno (%)	(0.25) ^a	(0.10) ^b	(0.10) ^b	(0.10) ^a	(0.06) ^a	(0.10) ^b

Nota: Los resultados se expresan como media () desviación estándar. Las diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos se indican mediante letras superíndice diferentes, asignadas tras un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) seguido de la prueba post hoc de Tukey. Las abreviaturas en la parte superior de cada columna corresponden al tiempo de fermentación (7D: 7 días; 14D: 14 días; 28D: 28 días). Las subcolumnas indican los estados del proceso de filtración con NCB: antes del filtrado (A.F.) y después del filtrado (D.F.).

El tiempo de fermentación tuvo un efecto significativo sobre la calidad del agua filtrada, siendo las membranas de 28 días las que mostraron el comportamiento más diferenciado durante la filtración. Se observó una disminución progresiva del pH en el permeado a medida que aumentó el tiempo de fermentación, pasando de 7.60 a 4.99. De forma consistente, la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales disminuyeron con el incremento del tiempo, alcanzando sus valores más bajos en las membranas de 28 días.

La salinidad presentó variaciones menores entre tratamientos, mientras que el oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación se mantuvieron relativamente estables, con ligeros incrementos en las membranas de mayor tiempo de fermentación. En contraste, las membranas de 7 días mostraron una reducción notable en la saturación de oxígeno.

En conjunto, estos resultados evidencian que el tiempo de fermentación influye en el desempeño de las membranas durante la filtración, afectando parámetros clave asociados a la calidad del permeado.

Análisis de las propiedades físicas y químicas del agua filtrada mediante membranas de NCB blanqueadas con H₂O₂

La eficiencia del proceso de filtración con membranas de NCB blanqueadas con H₂O₂ fue evaluada a través de diversos parámetros fisicoquímicos, sus valores antes y después del filtrado se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2

Resultados del análisis fisicoquímico del agua tras el tratamiento con membranas de NCB blanqueadas con peróxido de hidrógeno

Parámetros	7D H2O2		14D H2O2		28D H2O2	
	A.F	D.F	A.F	D.F	A.F	D.F
PH	7.56 (0.01) ^a	4.96 (0.02) ^b	7.97 (0.06) ^b	8.50 (0.1) ^a	7.53 (0.06) ^a	5.33 (0.06) ^b
Turbidez (NTU)	0.93 (0.03) ^b	5.70 (0.10) ^a	1.25 (0.02) ^b	5.12 (0.01) ^a	1.15 (0.01) ^b	2.69 (0.01) ^a
Conductividad (μs/cm)	116.33 (0.58) ^b	215.00 (1.00) ^a	275.00 (1.00) ^a	267.33 (2.08) ^b	269.00 (1.00) ^b	291.67 (0.58) ^a
Sólidos Disueltos (mg/l)	58.00 (1.00) ^b	110.67 (0.58) ^a	130.77 (0.67) ^a	128.10 (0.10) ^b	128.53 (0.06) ^b	140.67 (0.58) ^a
Salinidad	0.47 (0.01) ^a	0.11 (0.00) ^b	0.14 (0.01) ^a	0.13 (0.01) ^a	0.12 (0.01) ^a	0.13 (0.01) ^a
Oxígeno disuelto (mg/L)	7.76 (0.01) ^a	5.96 (0.05) ^b	8.05 (0.02) ^a	6.64 (0.02) ^b	7.87 (0.01) ^a	6.94 (0.02) ^b
Saturación Oxígeno (%)	90.8 (0.20) ^a	69.00 (0.44) ^b	94.47 (0.21) ^a	78.93 (0.06) ^b	94.10 (0.10) ^a	78.60 (0.78) ^b

Nota: Los resultados se expresan como media () desviación estándar. Las diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos se indican mediante letras superíndice diferentes, asignadas tras un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) seguido de la prueba post hoc de Tukey. Las abreviaturas en la parte superior de cada columna corresponden al tiempo de fermentación (7D: 7 días; 14D: 14 días; 28D: 28 días). Las subcolumnas indican los estados del proceso de filtración con NCB: antes del filtrado (A.F.) y después del filtrado (D.F.).

El tratamiento con peróxido de hidrógeno mostró un comportamiento diferenciado en las membranas durante la filtración. El pH del permeado varió según el tiempo de fermentación, con valores ácidos en las membranas de 7 y 28 días y un incremento en las de 14 días.

Se registró además un aumento general de la turbidez en los permeados, acompañado por incrementos en los sólidos disueltos totales y la conductividad en la mayoría de los tratamientos, excepto en las membranas de 14 días, donde se observó una ligera reducción.

Por otro lado, el oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación disminuyeron de forma consistente en todos los tratamientos.

Estos resultados indican que el agente de blanqueo modifica el comportamiento de las membranas durante la filtración, afectando directamente la calidad del agua tratada.

Análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua filtrada mediante correlaciones de Pearson.

Se analizaron las propiedades fisicoquímicas del agua filtrada mediante correlaciones de Pearson, evaluando las relaciones entre las variables del proceso y las características del filtrado. Las variables que permitieron valorar el rendimiento del proceso y la calidad del agua filtrada presentes en la Figura 2, se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3

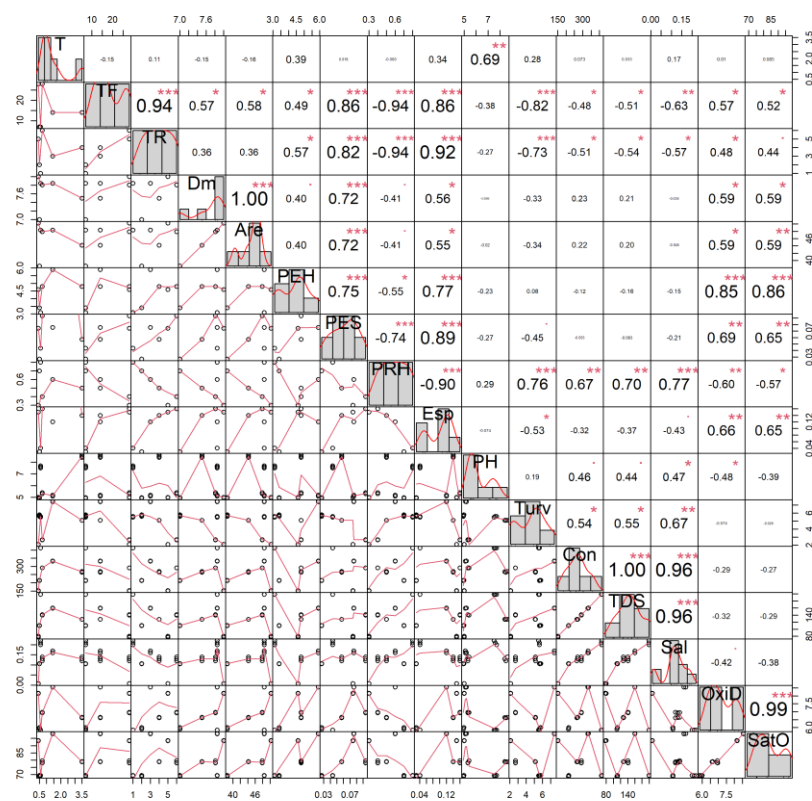
Significado de las abreviaturas utilizadas en el análisis de correlación de Pearson

Abreviaturas	Significados
T	Tiempo de filtración expresado en (h)
TF	Tiempo de fermentación empleado (7, 14, 28 días)
TR	Tratamientos utilizados (1 = 7d NaOH, 2 = 7d H ₂ O ₂ , 3 = 14d NaOH, 4 = 14d H ₂ O ₂ , 5 = 28d NaOH, 6 = 28d H ₂ O ₂),
DM	Diámetro de las membranas expresado en (mm)
Are	Áreas de las membranas expresado en (cm ²)
PEH	Peso húmedo de las membranas expresado en gramos (g)
PES	Peso seco de las membranas expresado en (g)
PRH	Peso de las membranas rehidratados expresado en (g)
Esp	Espesor de las membranas expresado en (mm)
pH	Potencial de hidrógeno del agua filtrada
Turv	Turbidez del agua filtrada expresado en (NTU)
Con	Conductividad del agua filtrada expresada en (µS/cm)
TDS	Solidos disueltos totales presentes en el agua filtrada expresados en (mg/L)
Sal	Salinidad del agua filtrada expresada en (ppt)
OxiD	Oxígeno disuelto del agua filtrada expresado en (mg/L)
SatO	Saturación de oxígeno disuelto del agua filtrada expresado en (%)

Nota: Estas métricas permitieron valorar el rendimiento del proceso y la calidad del agua filtrada (Figura 2).

Figura 2

Matriz de correlaciones de Pearson entre variables fisicoquímicas analizadas



Nota: Matriz de correlación de Pearson de variables fisicoquímicas del agua tras la filtración por NCB. La diagonal de la matriz muestra histogramas de las variables, mientras que el triángulo inferior muestra gráficos de dispersión que ilustran las relaciones entre las variables. El triángulo superior presenta los coeficientes de correlación de Pearson junto con sus niveles de significación: (***) $p < 0,001$, (**) $p < 0,01$, (*) $p < 0,05$, (.) $p < 0,10$.

Las correlaciones identificadas evidencian relaciones claras entre las propiedades de las membranas y su desempeño durante la filtración. Se observó una fuerte asociación entre variables físicas como área, diámetro y masa, así como entre conductividad, sólidos disueltos totales y salinidad, lo que confirma la coherencia interna de los parámetros medidos.

Asimismo, el tiempo de filtración se relacionó positivamente con el tamaño y la masa de las membranas, mientras que el espesor mostró una relación inversa con la turbidez, indicando una mayor retención de partículas en membranas más gruesas.

En cuanto a los factores del estudio, el tiempo de fermentación y los tratamientos químicos se asociaron con cambios en las propiedades físicas de las membranas y en su interacción con el agua. En conjunto, estas relaciones respaldan la influencia de las variables evaluadas sobre el comportamiento de las membranas en el proceso de filtración.

DISCUSIÓN

Efecto de las membranas de NCB blanqueadas con NaOH en las propiedades fisicoquímicas del agua

Hasta la actualidad, múltiples estudios han evaluado las membranas de NCB tratadas con NaOH en distintos sistemas acuosos, incluyendo emulsiones aceite-agua, soluciones salinas y aplicaciones antibacterianas, y han reportado alta eficiencia en la retención de partículas y microgotas de aceite (de Medeiros et al., 2025; Rini et al., 2023). Sin embargo, no investigan de forma integral los efectos combinados del tratamiento químico y del tiempo de fermentación, ni evalúan un conjunto amplio de propiedades fisicoquímicas del agua filtrada. En este sentido, los resultados obtenidos en el presente estudio amplían la información disponible y contribuyen a proporcionar datos experimentales en un campo donde la información aún es limitada.

pH y Acidez

El aumento de acidez con fermentaciones más prolongadas se puede explicar por cambios estructurales que favorecen el intercambio de protones e iones hidroxilo (Carmona et al., 2023). Este patrón coincide con hallazgos de membranas de NCB en soluciones acuosas o salinas, donde la química superficial influye en el pH del permeado (de Medeiros et al., 2025), lo que es consistente con los resultados obtenidos en este estudio, que muestran que el tiempo de fermentación modula este efecto, un hallazgo específico para emulsiones de aceite-agua preparadas experimentalmente.

Turbidez

La reducción en la turbidez observada en membranas de fermentación prolongada sugiere una matriz polimérica más consolidada, lo que favorece la retención de partículas coloidales y microgotas de aceite (Mahsuli et al., 2019; Galdino et al., 2020). Estudios previos sobre membranas de celulosa en sistemas acuosos o emulsiones simples también destacan la relación entre densidad estructural y retención de partículas (de Medeiros et al., 2025), lo que permite extender esta observación a las emulsiones preparadas experimentalmente.

Conductividad eléctrica

La conductividad disminuyó en membranas de 7 días, mientras que en las de 28 días se observó una elevada eficiencia de eliminación iónica (Mahsuli et al., 2019; Galdino et al., 2020). Esto concuerda parcialmente con estudios que muestran que la compactación de la membrana y la presencia de interacciones hidrofílicas mejoran la retención de iones (Rini et al., 2023). En conjunto, esta evidencia permite demostrar cómo el tiempo de fermentación modula la

estructura de la membrana, influyendo directamente en su capacidad para retener iones durante el filtrado de emulsiones aceite en agua.

Sólidos disueltos

La liberación de solutos disminuyó conforme aumentó el tiempo de fermentación, evidenciando una mayor estabilidad química en membranas con fermentaciones prolongadas. En contraste, aquellas con menor tiempo de fermentación mostraron un incremento en los sólidos disueltos totales, asociado a una estructura menos consolidada que podría haber facilitado el paso de compuestos solubles (Jagtap et al., 2025; Mahsuli et al., 2019).

Salinidad

Las membranas de fermentación prolongada mostraron cambios insignificantes, posiblemente debido a una mayor integridad estructural (Mahsuli et al., 2019). Sin embargo, se observó un leve aumento en la salinidad con membranas de 7 y 14 días, posiblemente por NaOH residual (Sederavičiūtė et al., 2019).

Oxígeno disuelto y saturación de oxígeno

El oxígeno disuelto y su saturación se mantuvieron estables, salvo en el tratamiento con membranas de 7 días, que presentó una disminución significativa, probablemente relacionada con características estructurales de la membrana que podrían restringir el intercambio gaseoso (Mahsuli et al., 2019). Un fenómeno no reportado previamente en emulsiones preparadas experimentalmente.

Efecto de las membranas de NCB blanqueadas con H₂O₂ en las propiedades fisicoquímicas del agua

Aunque algunas investigaciones han evaluado membranas de NCB blanqueadas o tratadas con H₂O₂, estos estudios se han centrado principalmente en propiedades de la membrana y desempeño de filtración, como permeabilidad al agua pura, tamaño de corte, rechazo de partículas modelo, comportamiento antifouling y caracterización estructural (Holland et al., 2020). Sin embargo, no se han reportado datos sobre las propiedades fisicoquímicas del agua filtrada en emulsiones o aguas reales tratadas con este tipo de membranas. En este contexto, los resultados que se presentan a continuación constituyen información inédita sobre cómo el tratamiento con H₂O₂ y el tiempo de fermentación afectan directamente la calidad del agua tratada y el desempeño de las membranas en emulsiones aceite-agua preparadas experimentalmente.

pH y Acidez

Las membranas de 7 y 28 días mostraron un incremento en la acidez del agua filtrada, lo que podría estar asociado tanto con la presencia de residuos de H_2O_2 como a modificaciones químicas superficiales que favorecen la formación de grupos funcionales capaces de liberar protones (H^+) (Mohammadkazemi et al., 2019). En contraste, las membranas de 14 días mostraron un ligero aumento del pH, lo que podría atribuirse a cambios en la química superficial de la membrana que modula su interacción con especies ácidas o básicas (Mohammadkazemi et al., 2019).

Turbidez

Aunque todos los tratamientos incrementaron la turbidez, las membranas de 7 y 14 días mostraron un aumento significativo, posiblemente asociado a la liberación de microgotas de aceite durante la filtración (Suryanto et al., 2018). Las membranas de 28 días mostraron un aumento menor, lo que sugiere un mejor desempeño en la retención de impurezas, potencialmente relacionado con una mayor compactación o consolidación estructural (Mahsuli et al., 2019).

Conductividad eléctrica

Las membranas de 7 y 28 días aumentaron la conductividad eléctrica del agua filtrada, indicando menor eficiencia en la retención de iones (Yanuhar et al., 2022). Por el contrario, las membranas de 14 días redujeron la conductividad, lo que podría estar relacionado con las modificaciones superficiales inducidas por el tratamiento de H_2O_2 que favorecen la interacción con solutos (Hernández et al., 2021).

Sólidos disueltos totales (TDS)

De manera similar a la conductividad, las membranas de 7 y 28 días incrementaron los TDS, lo que podría indicar una menor retención de solutos (Yanuhar et al., 2022). En contraste, las membranas de 14 días mostraron una reducción de los TDS, un resultado que podría estar relacionado con una mayor eficiencia en la retención de compuestos disueltos, posiblemente asociada a modificaciones superficiales de la membrana (Hernández et al., 2021).

Salinidad

La salinidad mostró variaciones mínimas, consideradas insignificantes, lo que podría indicar que las membranas no modifican de manera apreciable la composición iónica del agua tratada bajo las condiciones evaluadas (Yanuhar et al., 2024).

Oxígeno Disuelto (DO) y Saturación

El oxígeno disuelto y la saturación disminuyeron consistentemente en todos los tratamientos, lo que podría estar asociado tanto a la interacción de la membrana con la fase acuosa como a la posible transferencia de oxígeno hacia la fase oleosa de la emulsión, donde podría participar en procesos de oxidación (Roppongi et al., 2021).

Interpretación de las correlaciones de Pearson

Relación entre características estructurales de las membranas

Se observó una correlación positiva perfecta entre el área y el diámetro de las membranas de NCB, confirmando su relación directa. El PEH y el PES mostraron correlaciones positivas moderadas con el área, indicando que membranas de mayor tamaño retienen más humedad y masa seca (Cazón et al., 2020). Por otro lado, el PRH presentó una correlación negativa fuerte con el espesor, sugiriendo que membranas más delgadas tienen mayor capacidad de absorción o hinchamiento en agua, lo que podría influir en la permeabilidad y dinámica de flujo en aplicaciones de filtración (Carmona et al., 2023).

Desempeño de filtración y tiempo requerido

El tiempo total de filtración mostró una correlación positiva fuerte con el área y el peso seco de las membranas de NCB, indicando que membranas más grandes o densas requieren mayor tiempo de filtración (Galdino et al., 2020). Una correlación positiva moderada con el espesor refuerza que las características estructurales influyen directamente en la eficiencia del proceso de separación de emulsiones aceite-agua (Jagtap et al., 2025).

Calidad del agua filtrada

El análisis reveló asociaciones significativas entre las propiedades fisicoquímicas del agua filtrada y las características de las membranas de NCB. La conductividad, los sólidos TDS y la salinidad mostraron correlaciones positivas muy fuertes, consistentes con su relación directa con el contenido iónico.

Asimismo, el oxígeno disuelto y la saturación de oxígeno presentaron una correlación positiva extrema, reflejando la dependencia directa de la saturación con la concentración de oxígeno. Por otro lado, el espesor de la membrana exhibió una correlación negativa moderada con la turbidez, sugiriendo que membranas más gruesas mejoran la retención de sólidos suspendidos, produciendo agua más clara (Mahsuli et al., 2019; Galdino et al., 2020).

Efecto del tratamiento químico y tiempo de fermentación

El TR mostró correlaciones moderadas con el área y el peso seco de las membranas de NCB, indicando que el agente blanqueador modifica la estructura final de la membrana (Srivastava and Mathur, 2025). Por su parte, el TF presentó una correlación positiva fuerte con el peso seco y una correlación negativa débil con el oxígeno disuelto, lo que podría estar relacionado con cambios en la estructura física de la membrana que podrían restringir el flujo de oxígeno (Mahsuli et al., 2019).

CONCLUSIÓN

- Este estudio revela el potencial de las membranas de NCB como una solución sostenible, biodegradable y económica para tratar aguas contaminadas con UCO.
- El tiempo de fermentación y el uso de blanqueadores inciden notablemente en las propiedades estructurales de las membranas, afectando su rendimiento en filtración.
- Las membranas fermentadas durante 28 días y tratadas con NaOH exhiben una estructura polimérica más densa, logrando mayor eficiencia en la eliminación de sólidos, iones y turbidez.
- La relación inversa entre el espesor de la membrana y la turbidez del agua filtrada subraya cómo la morfología determina su eficacia.
- Estos hallazgos posicionan a la NCB como una tecnología prometedora para sistemas de tratamiento de aguas, tanto descentralizados como industriales.
- Finalmente se recomienda optimizar los parámetros de producción a escala piloto y validar su desempeño en condiciones reales para impulsar su aplicación en biorremediación

Declaración de contribución de autoría de CRediT

Isaac Velasco: Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Software, Escritura – revisión y edición.

Aaron Arévalo: Adquisición de financiación, Recursos, Validación, Visualización, Escritura – borrador original.

Fiallos Cárdenas: Conceptualización del diseño experimental, Supervisión del Trabajo, análisis de resultados, revisión crítica.

Expresiones de gratitud

Los Autores agradecen a la Universidad Estatal de Milagro por proporcionar la infraestructura necesaria para el trabajo de investigación.

Disponibilidad de Datos

El código de RStudio utilizado para los análisis estadísticos está disponible en el repositorio *Mendeley Data* en el enlace DOI: 10.17632/dtc8d235c3.1

REFERENCIAS

- Amarasekara, A. S., Shrestha, A. B., & Wang, D. (2024). Chemical modifications of kombucha SCOBY bacterial cellulose films by citrate and carbamate cross-linking. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 8, 100595. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2024.100595>
- Bodea, I. M., Beteg, F. I., Pop, C. R., David, A. P., Dudescu, M. C., Vilău, C., Stănilă, A., Rotar, A. M., & Cătunescu, G. M. (2021). Optimization of moist and oven-dried bacterial cellulose production for functional properties. *Polymers*, 13(13), 2088. <https://doi.org/10.3390/POLYM13132088/S1>
- Bolat, F., Ghitman, J., Necolau, M. I., Vasile, E., & Iovu, H. (2023). A Comparative Study of the Impact of the Bleaching Method on the Production and Characterization of Cotton-Origin Nanocrystalline Cellulose by Acid and Enzymatic Hydrolysis. *Polymers 2023, Vol. 15, Page 3446*, 15(16), 3446. <https://doi.org/10.3390/POLYM15163446>
- Cai, Q., Zhu, Z., Chen, B., & Zhang, B. (2019). Oil-in-water emulsion breaking marine bacteria for demulsifying oily wastewater. *Water Research*, 149, 292–301. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2018.11.023>
- Cazón, P., Velázquez, G., & Vázquez, M. (2020). Bacterial cellulose films: Evaluation of the water interaction. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100526. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100526>
- de Medeiros, A. D. M., da Silva Junior, C. J. G., Cavalcanti, Y. de F., Cavalcanti, M. H. C., dos Santos, M. R., Resende, A. H. M., da Silva, I. A., de Amorim, J. D. P., Costa, A. F. de S., & Sarubbo, L. A. (2025). Multifunctional Performance of Bacterial Cellulose Membranes in Saline and Oily Emulsion Filtration. *Fermentation*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/fermentation11110635>
- FAO. (2025). *Monthly price update. Oilseeds, Oils and Meals, No. 190 | May 2025*. FAO ; <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd5330en>
- Frota de Albuquerque Landi, F., Fabiani, C., Castellani, B., Cotana, F., & Pisello, A. L. (2022). Environmental assessment of four waste cooking oil valorization pathways. *Waste Management*, 138, 219–233. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.11.037>

- Galdino, C. J. S., Maia, A. D., Meira, H. M., Souza, T. C., Amorim, J. D. P., Almeida, F. C. G., Costa, A. F. S., & Sarubbo, L. A. (2020). Use of a bacterial cellulose filter for the removal of oil from wastewater. *Process Biochemistry*, *91*, 288–296. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2019.12.020>
- Guevara, K. M., Martínez-Valenzuela, G., Sánchez-Vásquez, V., Guerrero-Ruiz, K., & Fiallos-Cárdenas, M. (2025). Trends and perspectives on bacterial nanocellulose: A comprehensive analysis from the three helixes of innovation. *Materials Today Sustainability*, *30*, 101090. <https://doi.org/10.1016/J.MTSUST.2025.101090>
- Holland, M. C., Eggensperger, C. G., Giagnorio, M., Schiffman, J. D., Tiraferri, A., & Zodrow, K. R. (2020). Facile Postprocessing Alters the Permeability and Selectivity of Microbial Cellulose Ultrafiltration Membranes. *Environmental Science & Technology*, *54*(20), 13249–13256. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00451>
- Huang, J., Zhou, K., Chen, B., Li, S., Wang, Q., Lin, X., Xie, Y., Xu, P., Lin, X., & Lin, C. (2025). Construction of lignin-containing cellulose nanofibers based superhydrophobic membrane for effective oil-water separation. *Journal of Water Process Engineering*, *69*, 106863. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2024.106863>
- Jagtap, A., Krushnatray, A., & Dastager, S. G. (2025). Bacterial nanocellulose (BNC) produced from sorbitol as a sustainable nano-filter for oil-water separation. *International Journal of Biological Macromolecules*, *284*, 137953. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.137953>
- Kitwetcharoen, H., Phannarangsee, Y., Klanrit, P., Thanonkeo, S., Tippayawat, P., Klanrit, P., Klanrit, P., Yamada, M., & Thanonkeo, P. (2024). Functional kombucha production from fusions of black tea and Indian gooseberry (*Phyllanthus emblica* L.). *Heliyon*, *10*(24), e40939. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E40939>
- Kumar, A., Bhayana, S., Singh, P. K., Tripathi, A. D., Paul, V., Balodi, V., & Agarwal, A. (2025). Valorization of used cooking oil: challenges, current developments, life cycle assessment and future prospects. *Discover Sustainability* *2025 6:1*, *6*(1), 1–31. <https://doi.org/10.1007/S43621-025-00905-7>
- Lee, H., Sakamoto, Y., & Yoshizawa, Y. (2023). Analysis of information to promote participation in waste separate collection: Used cooking oil in Japan. *Cleaner Waste Systems*, *6*, 100119. <https://doi.org/10.1016/J.CLWAS.2023.100119>
- Lee, H., Sakamoto, Y., & Yoshizawa, Y. (2024). Analysis of factors influencing participation in the separate collection of waste cooking oil. *Environmental Challenges*, *15*, 100905. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2024.100905>

- Lewis, R., Scott, R., Bala, B., Jahan, H., Bartram, J., & Radu, T. (2024). Household water use and greywater management in Khulna city, Bangladesh. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 259, 114376. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEH.2024.114376>
- Li, B., Qi, B., Guo, Z., Wang, D., & Jiao, T. (2023). Recent developments in the application of membrane separation technology and its challenges in oil-water separation: A review. *Chemosphere*, 327, 138528. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.138528>
- Liu, Y., Liu, H., & Shen, Z. (2021). Nanocellulose Based Filtration Membrane in Industrial Waste Water Treatment: A Review. *Materials 2021, Vol. 14, Page 5398, 14(18)*, 5398. <https://doi.org/10.3390/MA14185398>
- Mahsuli, T., Suryanto, H., Larasati, A., & Muhajir, M. (2019). Mechanical properties of bacterial nanocellulose membrane from pineapple peel waste after homogenization process. *AIP Conference Proceedings*, 2120(1). <https://doi.org/10.1063/1.5115695/1024472>
- Marchiori, L., Santos, L. S., Schuler, T., Bernardes, J. C., Mattos, B. O., Onishi, B. S. D., Bortoletto-Santos, R., Rodrigues-Filho, U. P., Domenegueti, R. R., Ullah, S., Rambo, C. R., Ferreira-Neto, E. P., & Ribeiro, S. J. L. (2024). Effect of drying methods on the structure and properties of bacterial nanocellulose/MoS₂ hybrid gel membranes and sphere-like particles for enhanced adsorption and photocatalytic applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 110(3), 635–653. <https://doi.org/10.1007/s10971-024-06380-2>
- Mautner, A., & Bismarck, A. (2021). Bacterial nanocellulose papers with high porosity for optimized permeance and rejection of nm-sized pollutants. *Carbohydrate Polymers*, 251, 117130. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.117130>
- Meléndez-Hernández, P. A., Hernández-Beltrán, J. U., Hernández-Guzmán, A., Morales-Rodríguez, R., Torres-Guzmán, J. C., & Hernández-Escoto, H. (2021). Comparative of alkaline hydrogen peroxide pretreatment using NaOH and Ca(OH)₂ and their effects on enzymatic hydrolysis and fermentation steps. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(5), 1897–1907. <https://doi.org/10.1007/S13399-019-00574-3/TABLES/1>
- Mohammadkazemi, F., Khademibarangenani, R., & Koosha, M. (2019). The Effect of Oxidation Time and Concentration on Physicochemical, Structural, and Thermal Properties of Bacterial Nano-Cellulose. *Polymer Science - Series A*, 61(3), 265–273. <https://doi.org/10.1134/S0965545X19030088/FIGURES/6>
- Penloglou, G., Basna, A., Pavlou, A., & Kiparissides, C. (2023). Techno-Economic Considerations on Nanocellulose's Future Progress: A Short Review. *Processes 2023, Vol. 11, Page 2312, 11(8)*, 2312. <https://doi.org/10.3390/PR11082312>

- Ramírez Tapias, Y. A., Di Monte, M. V., Peltzer, M. A., & Salvay, A. G. (2022). Bacterial cellulose films production by Kombucha symbiotic community cultured on different herbal infusions. *Food Chemistry*, 372, 131346. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131346>
- Ramírez-Carmona, M., Gálvez-Gómez, M. P., González-Perez, L., Pinedo-Rangel, V., Pineda-Vasquez, T., & Hotza, D. (2023). Production of Bacterial Cellulose Hydrogel and its Evaluation as a Proton Exchange Membrane. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(6), 2462–2472. <https://doi.org/10.1007/S10924-023-02759-4/FIGURES/1>
- Rini, Suryanto, H., Hari, P. D., Syukri, D., Jaswandi, Kurniawan, F., & Makky, M. (2023). Application of Nanocellulose Biofilter from Pineapple Peel Waste for Water Microbes Removal. *Journal of Environmental and Public Health*. <https://doi.org/10.1155/2023/5823207>
- Rodríguez-de la Garza, J. A., Pérez-Rodríguez, P., González-Méndez, L. M., & Martínez-Amador, S. Y. (2023). Recent Advances in Biological Wastewater Treatment. *Current Status of Fresh Water Microbiology*, 205–240. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5018-8_9
- Roppongi, T., Miyagawa, Y., Fujita, H., & Adachi, S. (2021). Effect of Oil-Droplet Diameter on Lipid Oxidation in O/W Emulsions. *Journal of Oleo Science*, 70(9), 1225–1230. <https://doi.org/10.5650/JOS.ESS21145>
- Sadler, E., & Crick, C. R. (2021). Suction or gravity-fed oil-water separation using PDMS-coated glass filters. *Sustainable Materials and Technologies*, 29, e00321. <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2021.E00321>
- Sai, H., Jin, Z., Wang, Y., Fu, R., Wang, Y., & Ma, L. (2020). Facile and Green Route to Fabricate Bacterial Cellulose Membrane with Superwettability for Oil–Water Separation. *Advanced Sustainable Systems*, 4(7), 2000042. <https://doi.org/10.1002/ADSU.202000042;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:23667486;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Said Azmi, S. N. N., Samsu, Z., 'Asyiqin, Mohd Asnawi, A. S. F., Ariffin, H., & Syed Abdullah, S. S. (2023). The production and characterization of bacterial cellulose pellicles obtained from oil palm frond juice and their conversion to nanofibrillated cellulose. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, 100327. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2023.100327>
- Sederavičiūtė, F., Bekampienė, P., & Domskienė, J. (2019). Effect of pretreatment procedure on properties of Kombucha fermented bacterial cellulose membrane. *Polymer Testing*, 78, 105941. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2019.105941>
- Shah, S. T. U. R., Haq, F. U., Hussain, T., Bajwa, S. Z., Bekchanov, D., Din, M. I., Mujahid, A., & Afzal, A. (2024). Expanded polystyrene (EPS) waste upcycling and efficient oil/water

- emulsion separation with advanced EPS-cotton membranes. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100647. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100647>
- Soundararajan, P., Parthasarathy, S., Sakthivelu, M., Karuppiyah, K. M., Velusamy, P., Gopinath, S. C. B., & Raman, P. (2023). Effects of Consuming Repeatedly Heated Edible Oils on Cardiovascular Diseases: A Narrative Review. *Current Medicinal Chemistry*, 31(40), 6630–6648. <https://doi.org/10.2174/0109298673250752230921090452>
- Srivastava, S., & Mathur, G. (2025). Investigating the effect of alkali treatment on physicochemical characteristics of bacterial cellulose synthesized by *Komagataeibacter saccharivorans* BC-G1. *The Microbe*, 7, 100340. <https://doi.org/10.1016/J.MICROB.2025.100340>
- Sultana, N., Roddick, F. A., & Pramanik, B. K. (2024). Fat, oil and grease wastewater and dishwashers: Uncovering the link to FOG deposition. *Science of The Total Environment*, 907, 168032. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.168032>
- Sultana, N., Roddick, F., Jefferson, B., Gao, L., Bergmann, D., Papalois, J., Guo, M., Tzimourtas, K., & Pramanik, B. K. (2024). Effectiveness of grease interceptors in food service establishments for controlling fat, oil and grease deposition in the sewer system. *Science of The Total Environment*, 912, 169441. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169441>
- Suryanto, H., Sutrisno, T. A., Muhajir, M., Zakia, N., & Yanuhar, U. (2018). Effect of peroxide treatment on the structure and transparency of bacterial cellulose film. *MATEC Web of Conferences*, 204, 05015. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201820405015>
- Turganova, R., Tuleyeva, R., Belkozhayev, A., Gizatullina, N., Yelemessova, G., Taubatyrova, A., Mussalimova, M., Shynykul, Z., & Toletay, G. (2025). Bacterial cellulose for sustainable food packaging: Production pathways, structural design, and functional modification strategies. *Polymers*, 17(23). <https://doi.org/10.3390/polym17233165>
- Wei, X., Chen, T., Chen, S., Chen, Z., Jia, Q., Zhang, H., Yang, Y., Mazlan, N. A., Yang, S., & Huang, Y. (2024). Two-dimensional superhydrophobic metal–organic monoacid framework composite meshes with exceptional chemical stability for oil/water separation. *Separation and Purification Technology*, 346, 127356. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2024.127356>
- Xin, Y., Qi, B., Wu, X., Yang, C., & Li, B. (2024). Different types of membrane materials for oil-water separation: Status and challenges. *Colloid and Interface Science Communications*, 59, 100772. <https://doi.org/10.1016/J.COLCOM.2024.100772>
- Xu, Z., Zheng, X., Bao, S., Xu, T., Ji, B., Mei, J., & Li, Z. (2024). ZCS-TiO₂ modified bacterial cellulose multifunctional membranes for highly effective and antibacterial oil-water separation. *Process Safety and Environmental Protection*, 181, 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.11.042>

- Yanuhar, U., Suryanto, H., Amin, M., Maulana, J., Mohamad Lal, M. T., & Caesar, N. R. (2024). The impact of copper oxide nanoparticles reinforced nanocellulose acetate membrane on antibacterial and dye removal Potency. *Results in Engineering*, 23, 102788. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102788>
- Yanuhar, U., Suryanto, H., Sardjono, S. A., Ningrum, I. K., Aminnudin, A., & Binoj, J. S. (2022). Effect of Titanium Dioxide Nanoparticle on Properties of Nanocomposite Membrane Made of Bacterial Cellulose. *Journal of Natural Fibers*, 19(16), 13914–13927. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2112797>;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:WJN F20;SUBPAGE:STRING:ACCESS
- Zorila, F. L., Toader, G., Alexandru, M., Rusen, E., Mocanu, A., Isopenecu, G., Brincoveanu, O., Bacalum, M., Stoica, I., Podaru, A., & Diacon, A. (2025). Bio-inspired bacterial cellulose-based hydrogel films for controlled ciprofloxacin release. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 10, 100796. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2025.100796>

Saberes del Conocimiento hace constar que:

La revista científica *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento-RECIMUNDO* ISSN: 2588-073X; CERTIFICA, que los investigadores: *Luis Isaac Velasco Morales; Aarón Josué Arévalo Padilla; Manuel Alejandro Fiallos Cárdenas*, autores del manuscrito titulado: “**Membranas de nanocelulosa bacteriana para la filtración de aguas residuales oleosas: efecto del tiempo de fermentación y del tratamiento de blanqueo**” el mismo que ha sido recibido el 10 de enero del 2026, siendo aprobado mediante consejo editorial de Saberes del Conocimiento el 19 de febrero del 2026 y la revisión por pares académicos externos el 15 de marzo del 2026; a publicarse en su edición *Vol. 10, n°2; abril-junio (2026)*, el 23 de abril del 2026.

Edición que será indexado en las siguientes bases de datos.

Latindex: <https://www.latindex.org/latindex/ficha/2478>

MIAR: <http://miar.ub.edu/issn/2588-073X>

Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=26323>

Google Académico:
https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=recimundo&btnG=

Para que así conste, firmo la presente en la ciudad de Guayaquil, a los 15 días del mes de marzo del año 2026.

Lenin Suasnabas Pacheco
EDITOR

Revista Científica de Investigación y actualización del mundo de las ciencias (RECIMUNDO)

URL: <http://recimundo.com/index.php/es>

Dirección: Guayas – Guayaquil - Milagro - Ecuador.

Contáctenos a: 0978883211

Email: director.recimundo@gmail.com

Saberes del Conocimiento hace constar que:

Los investigadores: *Luis Isaac Velasco Morales; Aarón Josué Arévalo Padilla; Manuel Alejandro Fiallos Cárdenas*, son autores del artículo científico titulado: “**Membranas de nanocelulosa bacteriana para la filtración de aguas residuales oleosas: efecto del tiempo de fermentación y del tratamiento de blanqueo**” el cual fue publicado en el Vol. 10, n°2; abril 2026, de la *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento-RECIMUNDO*, publicada el 23 de abril del 2026 con ISSN 2588-073X, indexada y registrada en las siguientes bases de datos y repositorios: **Latindex Catalogo, MIAR, Google Académico.**

Disponible en:

URL: <https://recimundo.com/index.php/es/article/view/2948>

DOI: [10.26820/recimundo/10.\(2\).abril.2026.198-215](https://doi.org/10.26820/recimundo/10.(2).abril.2026.198-215)

Para que así conste, firmo la presente en la ciudad de Guayaquil, a los 23 días del mes de abril del año 2026.

Lenin Suasnabas Pacheco

EDITOR

Revista Científica de Investigación y actualización del mundo de las ciencias (RECIMUNDO)

URL: <http://recimundo.com/index.php/es>

Dirección: Guayas – Guayaquil - Milagro - Ecuador.

Contáctenos a: 0978883211

Email: director.recimundo@gmail.com

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

¡Evolución académica!

@UNEMIEcuador

