



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA
CARRERA EN BIOTECNOLOGÍA

**DISEÑO Y ARRANQUE DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE
REACTOR CON MEMBRANA CERÁMICA TUBULAR**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:
INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA

AUTOR: LIZETH ESTEFANIA GARCIA SALAZAR

Tutor: PhD. MIGUEL HERRERA ROBLEDO

Napo-Ecuador

2023

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Tena, 14 septiembre de 2023

De mi consideración:

Yo, LIZETH ESTEFANIA GARCIA SALAZAR, con documento de identidad N° 2101178438, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de ingeniería en Biotecnología, son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendación y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,



Lizeth Estefania Garcia Salazar

CI: 2101178438

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Lizeth Estefania Garcia Salazar, con documento de identidad N° 1004099030, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: “Diseño y arranque de un sistema automatizado de reactor con membrana cerámica tubular” de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ÓRGANICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación superior.

Tena, 14 septiembre de 2023



Lizeth Estefania Garcia Salazar

CI: 2101178438

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: “Diseño y arranque de un sistema automatizado de reactor con membrana cerámica tubular” en la modalidad de: artículo, fue realizado por Lizeth Estefania Garcia Salazar, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 14 septiembre de 2023



Miguel Herrera Robledo

C.I: G39738569

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer al docente Miguel Herrera Robledo por confiar en mí. Su orientación y sus valiosas sugerencias han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Gracias por brindarme la dirección necesaria y por compartir sus conocimientos y experiencia.

A mis profesores a quienes tuve el agrado de tener como amigos y que impartieron sus conocimientos durante mi formación académica. Agradezco especialmente a mi madre su constante apoyo, ánimo y motivación han sido un pilar fundamental en mi camino. Su aliento y amor incondicional han sido un verdadero regalo que me ha impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes.

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a la persona más especial en mi vida; mi madre.

Quiero dedicar todo mi esfuerzo puesto en este trabajo a ella porque de alguna forma quiero compensar todo el sacrificio que ha tenido que hacer para darme el regalo más valioso que es la educación.

Eres mi inspiración, un ejemplo de fortaleza, sabiduría y dedicación. Tu infinita generosidad y sacrificio han forjado el camino hacia mis logros y sueños. Esta dedicación es solo una pequeña muestra de mi eterno agradecimiento hacia ti.

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA	
DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y ESPONSABILIDAD	i
AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	ii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
TABLA DE CONTENIDO	vi
PORTADA	vi
ÍNDICE DE TABLA	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
MATERIALES Y MÉTODOS	4
Aguas residuales sintéticas y métodos analíticos	4
Diseño y construcción del MBR	5
Ensayo y validación	7
Ecuaciones que rigen el régimen de filtración a presión transmembrana constante	8
Estimación de la porosidad de la torta según el modelo de Carman-Kozeny	10
Modelamiento del efecto del radio hidrodinámico y la porosidad	11
RESULTADOS	12
Evaluación de los parámetros de filtración de la membrana	12
Comportamiento transitorio flujo de permeado y resistencia específica de la torta	12
Evolución de la porosidad	14
Estructura fractal de la torta de membrana	16
DISCUSIÓN	18
Filtración de la membrana	18
Evolución de la porosidad	20
Dimensión fractal	21
CONCLUSIONES	22
REFERENCIAS	24

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1:	Caracterización fisicoquímica de mezclas de biopolímeros.....	4
Tabla 2:	Tamaño de radio hidrodinámico ϕ asumido para el modelamiento en ensayos de ultrafiltración.	11
Tabla 3:	Tamaño de partícula p asumido para el modelamiento en ensayos de ultrafiltración.	11
Tabla 4:	Evolución de la tasa de pérdida de flujo en función del volumen de permeado en pruebas de UF membrana tubular (300 kDa).	13
Tabla 5:	Propiedades microestructurales en las pruebas de UF membrana (300 KDa) con 3 distintos escenarios.	13
Tabla 6:	Análisis de dimensión fractal y densidad de materia orgánica acumulada.	16

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Diseño gráfico del sistema de reactor MBR a escala laboratorio.	6
Figura 2:	Esquema de la configuración del reactor con membrana tubular.....	6
Figura 3:	(A) Pendiente negativa del flujo de permeado volumétrico (J) en relación con el volumen de permeado. (B) Resistencia específica de la capa torta.	12
Figura 4:	Comportamiento de la capa torta y porosidad de la capa: (A) Resistencia de la capa, (B) evolución de la porosidad.	14
Figura 5:	Impacto del modelado con respecto al radio hidrodinámico de la partícula al evaluar 3 distintas condiciones.	15
Figura 6:	Dimensión fractal de la capa torta con 3 distintas soluciones	16
Figura 7:	Impacto de la densidad de las partículas sobre la dimensión fractal. (A) Solución C/P, (B) Solución con C/P + 0.04μM CaCO ₃ , (C) Solución con C/P + 0.04μM CaCO ₃ <i>B. clausii</i>	17

RESUMEN

Se ha diseñado y evaluado en laboratorio un reactor anaerobio de membrana (MBR) utilizando *B. clausii* para estudiar su influencia en las propiedades microestructurales del biofouling. El MBR es una tecnología empleada en el tratamiento de aguas residuales que combina un biorreactor con la separación mediante membranas a baja presión. Se realizaron evaluaciones rápidas de la filtrabilidad con agua ultrapura, obteniendo un flujo de 2.80 L/h en las condiciones ensayadas. Para alimentar el biorreactor en suspensión de 25 L, se acopló a una membrana cerámica tubular de ultrafiltración con soporte de TiO_2 , utilizando agua residual sintética disolviendo quitosano de bajo peso molecular (LWC) y albúmina de suero bovino (BSA) en una proporción de C/P=1.85, donde se obtuvo tres distintas soluciones (C/P, C/P + $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3 , C/P + $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3 + *B. clausii*). El experimento que incluyó *B. clausii* mostró la tasa de pérdida de flujo más baja. A través del análisis de las propiedades estructurales de capa torta, se determinó en los escenarios: C/P y C/P + $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3 + *B. clausii* que el flujo y la porosidad disminuyó con el volumen de filtrado, demostrando que estas soluciones promovieron la formación de una capa de biofouling más compleja y rugosa. Al analizar la dimensión fractal se encontró que la solución que contenía *B. clausii* formó conglomerados celulares más rugosos (2.977 frente a 2.968 y 2.972). Por lo tanto, se concluye que la adición de *B. clausii* aumenta la complejidad y estructura de la capa de torta durante la formación de biofouling en períodos prolongados de filtración.

Palabras clave: reactor, membrana cerámica tubular, ultrafiltración, *Bacillus clausii*, taponamiento

ABSTRACT

A laboratory anaerobic membrane reactor (MBR) has been designed and evaluated using *B. clausii* to study its influence on the microstructural properties of biofouling. The MBR is a technology used in wastewater treatment that combines a bioreactor with low-pressure membrane separation. Rapid filtrability assessments were conducted using ultrapure water, yielding a flow rate of 2.80 L/h under the tested conditions. To feed the 25 L suspended bioreactor, it was coupled with a tubular ultrafiltration ceramic membrane with TiO₂ support, using synthetic wastewater by dissolving low molecular weight chitosan (LWC) and bovine serum albumin (BSA) in a C/P ratio of 1.85, resulting in three different solutions (C/P, C/P + 0.04μM CaCO₃, C/P + 0.04μM CaCO₃ + *B. clausii*). The experiment that included *B. clausii* showed the lowest flux loss rate. Through the analysis of the structural properties of the cake layer, it was determined in the scenarios of C/P and C/P + 0.04μM CaCO₃ + *B. clausii* that the flux and porosity decreased with the volume of filtrate, demonstrating that these solutions promoted the formation of a more complex and rough biofouling layer. When analyzing the fractal dimension, it was found that the solution containing *B. clausii* formed rougher cellular conglomerates (2.977 compared to 2.968 and 2.972). Therefore, it is concluded that the addition of *B. clausii* increases the complexity and structure of the cake layer during prolonged periods of filtration in the biofouling formation.

Keywords: reactor, ceramic tubular membrane, ultrafiltration, *Bacillus clausii*, biofouling

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital cuya contaminación debido a actividades humanas representa un desafío crítico para lograr un futuro sostenible. Aunque el agua es renovable, se estima que para el año 2050 aproximadamente un tercio de la población mundial enfrentará problemas crónicos de escasez de agua (Sri Abirami Saraswathi et al., 2017). La descarga de grandes volúmenes de aguas residuales contaminadas provenientes de diversas industrias conlleva riesgos significativos para la salud de los organismos vivos. Por lo tanto, es de suma importancia tratar adecuadamente las aguas residuales antes de verterlas en el medio ambiente (Hosseini et al., 2016).

La tecnología de biorreactor con membrana (MBR) es utilizada para tratar aguas residuales, combinando un biorreactor y la separación por membrana a baja presión. Los biorreactores que usan membranas se han utilizado ampliamente en el tratamiento de las aguas residuales municipales e industriales en las últimas décadas, debido a sus ventajas de producción, calidad del efluente y retención completa de biomasa. (Liu et al., 2017);(Tan et al., 2019);(N. Yang et al., 2011);(Ruiz Hernández, 2014). Además, el uso de membranas tubulares de cerámica, ha aumentado debido a su capacidad para evitar el taponamiento a causa de los sistemas cross-flow (Leong et al., 2014).

En los reactores de membrana sumergida, la membrana se encuentra dentro del reactor biológico y está en contacto directo con la solución (Flores Paltán & Velín Sagbay, 2014). Algunas de las ventajas de los biorreactores con membrana según (W. Yang et al., 2006), son: obtención de un efluente de alta calidad con posibilidades de reutilización, menor espacio requerido para su instalación, bajos tiempos de puesta en marcha, menor necesidad de mano de obra para operación y mantenimiento (Bet-moushoul et al., 2016). Sin embargo, la ultrafiltración presenta altos costes energéticos y está limitada por el ensuciamiento de las membranas, conocido como formación de capa torta. (Ganiyu et al., 2015).

Se cree que el ensuciamiento de la membrana en los MBR empieza por la adhesión de una o más bacterias y/o flóculos en la superficie de la membrana, seguido del crecimiento y multiplicación de los flóculos sésiles, lo que puede resultar en la formación de una capa torta en la superficie de la membrana. (Le-Clech et al., 2006; Meng et al., 2009).

Los contaminantes inorgánicos juegan un papel importante en la formación de la capa torta fuertemente adherida a la membrana. Por lo tanto, existe un gran interés en el desarrollo de sistemas automatizados, como los biorreactores con membrana, que permitan ampliar el rango de lodos a tratar, mejorar la eficiencia energética en los procesos de filtrado y controlar el fouling (Montalván-Estrada et al., 2019);(Park et al., 2015); (Li et al., 2018).

Por otro lado, la concentración de carbohidratos y proteínas (C/P) del efluente se considera un indicador clave para el control de los fenómenos de taponamiento o ensuciamiento. Dado que su acumulación disminuye la permeabilidad de la membrana y favorece la formación de bloques de construcción extracelulares híbridos (Herrera-Robledo, Arenas, et al., 2011).

En la ultrafiltración las interacciones entre biopolímeros y carbonato de calcio (CaCO_3) permiten la formación de una macroestructura híbrida de incrustaciones (irreversible-fouling) que son componentes estructurales importantes de la capa torta y podrían ser el origen del ensuciamiento irreversible de las membranas (Herrera-Robledo, Cid-León, et al., 2011);(Herrera-Robledo & Noyola, 2015); (Houari et al., 2010);(Lin et al., 2010).

Se conoce que el taponamiento es causado por la acumulación de productos microbianos solubles (PMS) y otras formas de materia orgánica como las sustancias poliméricas extracelulares (SPE) en la fase líquida que son liberados por la lisis celular de los microorganismos presentes en el licor de la mezcla.(N. Yang et al., 2011). Estos biopolímeros podrían actuar como un "pegamento" que facilita la formación de la capa de limo y contribuye a la resistencia de filtración de la capa torta. (Oppenheimer-Shaanan et al., 2016).

Según (Keren-Paz & Kolodkin-Gal, 2020) en las bacterias Gram-positivas, los amiloides funcionales producidos por algunos géneros de bacterias como *Staphylococcus*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Escherichia* entre ellos *Bacillus*, se han identificado como componentes estructurales de la matrix extracelular (ECM) en una variedad de biopelículas bacterianas. Recientemente, se reveló que existe un componente no orgánico de las biopelículas bacterianas, compuesto principalmente por minerales cristalinos de Ca^{+2} . Estos minerales, podrían actuar como componentes estructurales que mantienen unidas las estructuras bacterianas.

Estudios anteriores han sugerido que la formación de esta capa torta en los MBR es un proceso dinámico (Hong et al., 2013). Por lo que, el éxito de los procesos MBR depende tanto de un diseño y funcionamiento adecuado, que evalúe en tiempo real el comportamiento del biofouling. En este estudio, resulta relevante incluir a *B. clausii*, ya que es una bacteria capaz de precipitar CaCO_3 (carbohidratos y proteínas). Estos compuestos pueden ser los principales componentes de la matriz extracelular que interactúa con sales inorgánicas dando como resultado incrustaciones mineralizadas que permanecen incluso después de la limpieza física y química de las membranas. (Phillips et al., 2013); (Oviedo, 2020); (Park et al., 2015); (Oviedo, 2020).

En este contexto, el presente trabajo se centró en el diseño de un MBR a escala de laboratorio y la realización de ensayos para evaluar la funcionalidad con soluciones con quitosano de bajo peso molecular y albúmina sérica bovina LWC/BSA, respectivamente. Estos polímeros base fueron diseñados de la siguiente manera: C/P, C/P + $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3 , C/P + $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3 + *B. clausii* para comprender en qué medida interactúa *B. clausii* sobre las propiedades microestructurales del biofouling (resistencias hidráulica y específica, flux de permeado, porosidad y dimensión fractal durante de filtración a presión transmembrana constante).

MATERIALES Y MÉTODOS

Aguas residuales sintéticas y métodos analíticos

Se utilizó la concentración mayor de biopolímeros de “C/P” véase **Tabla No. 1**, siendo este el proceso más espontáneo y con la mayor densidad de carga eléctrica. La mezcla tuvo una concentración de 233 mg como masa total en 2 L utilizando agua tipo ultrapura. La densidad de carga eléctrica (ECD) constante de las sales totales fue de 10 mM, C/P, C/P + 0.04μM CaCO₃, C/P + 0.04μM CaCO₃ + *B. clausii* densidad (δ = 950, 1647.5, 1039.53 kg/m³) y tamaño de partícula invariable (tamaño = 400, 600, 960 nm), respectivamente.

Tabla 1: Caracterización fisicoquímica de mezclas de biopolímeros.

C/P ^a	[C] ^b	[P] ^b	Cargas eléctricas vinculadas a LC ^c	Cargas eléctricas vinculadas a LC ^d	Cargas eléctricas vinculadas a BSA ^e	ECD ^f para [LC] (66% negativo)	ECD ^f para [BSA]	ECD ^g total negativo
1.85	3.86E-05	6.10E-07	1.51E-01	7.54E-02	1.29E-05	1.26E-03	1.14E-07	8.33E-04

Realizado por: Herrera-Robledo, Arenas, et al., 2011.

^a Peso a peso

^b M

^c Número de cargas eléctricas negativas a lo largo del quitosano, dos por cada monómero de glucosamina

^d Número de cargas eléctricas positivas a lo largo del quitosano, una por cada monómero de glucosamina

^e Número de cargas eléctricas negativas a lo largo de la BSA

^f Densidad de carga eléctrica, [ECD] = # cargas mol/g.

^g La suma de la ECD negativa de ambos polímeros.

Diseño y construcción del MBR

El montaje experimental MBR consistió en un módulo de membrana de ultrafiltración véase **Figura No. 1** acoplada a una estructura de adquisición de datos y control del sistema. El volumen total del tanque de alimentación fue de 25 L de capacidad.

La presión aplicada se controló mediante los softwares Fernhill y una válvula que está en la conexión de la tubería que se conecta a la bomba de diafragma de 120 psi (Masterflex L/S, Cole Palmer, Vernon Hills, IL), a continuación, se encuentra un manómetro que representa la presión a la que se está trabajando. La temperatura, luz y humedad fueron controladas continuamente dentro del reactor mediante sensores en línea. Estos parámetros se pueden observar mediante los softwares Grafana y Fernhil encargados del análisis y visualización de datos de código abierto, control y adquisición del equipo, respectivamente. Sin embargo, estos 3 parámetros no fueron considerados para este trabajo, serán utilizados en la tecnología de fotocatalisis, como biorreactor.

La membrana utilizada fue una membrana cerámica tubular con soporte de TiO_2 , de 6 mm de diámetro interior, celda de ultrafiltración FILTANIUM™ de Tami industries con área afectiva de 0.0047 m^2 , longitud 25.4 cm y tamaño de poro de corte de peso molecular 300 KDa. El diseño posee una conexión eléctrica que se encuentra en una caja con dimensiones 60 x 30 x 17 mm. El sistema dispone de varios sensores y actuadores comandados por el PLC, cuya conexión eléctrica se puede observar en el siguiente diagrama. Internamente en el tablero de control se encuentra una fuente de 24VDC que garantiza el funcionamiento de sensores y actuadores. Está compuesta por un sistema de monitoreo en tiempo real.

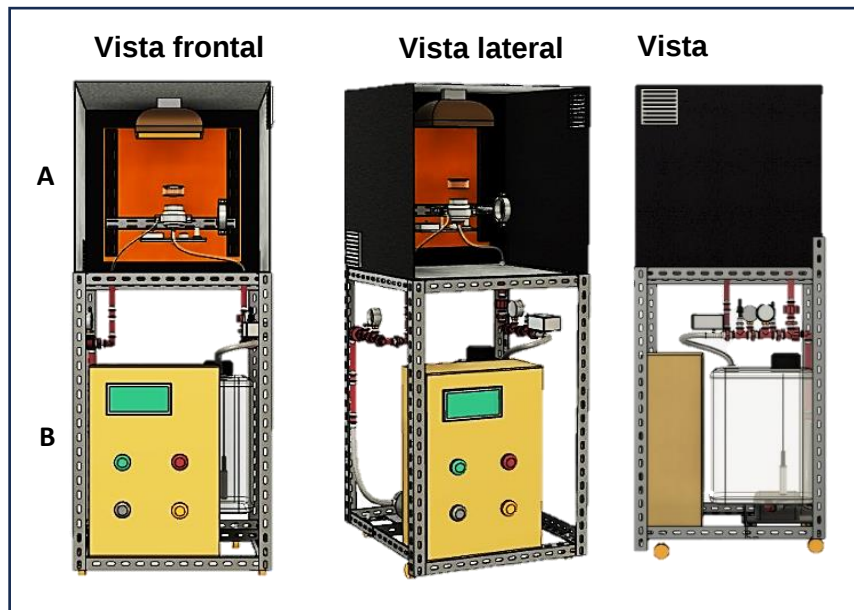


Figura 1: Diseño gráfico del sistema de reactor MBR a escala laboratorio.

Realizado por: Albéniz y Morlan, 2023, pág 2.

La estructura del MBR **Figura No. 1** se divide en 2 niveles, la primera (A) en el módulo de tratamiento de agua (caja con membrana tubular), la segunda (B) la adquisición de datos y control de sistema.

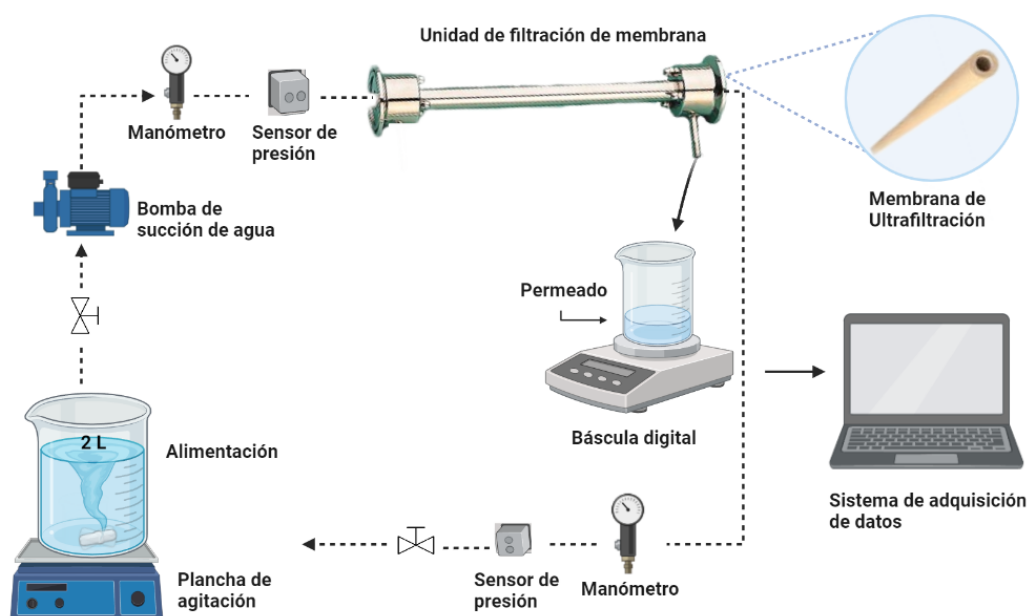


Figura 2: Esquema de la configuración del reactor con membrana tubular.

Realizado por: Garcia, Lizeth, 2023.

En la **Figura No. 2** Se observa el esquema general de la filtración con membrana cerámica tubular accionada con presión, los accesorios y equipos que componen el sistema. El flujo de permeado de la membrana (J) se midió con un pluviómetro en línea acoplado a un adaptador de entrada de impulsos y un registrador de datos (sensor en línea I2C, R2332, MQTT, ETHERNET). La presión transmembrana (TMP) se midió colocando sensores de presión (LJD, DUOC), en las líneas de alimentación del ingreso de la solución y antes del ingreso de la solución en la membrana. El reactor funcionó como un sistema discontinuo sin influente de solución C/P (con permeado de membrana reciclado de nuevo al reactor).

Ensayo y validación

En los ensayos de filtración cortos se evaluó la resistencia de membrana (R_m), TMP y flujo de permeado, con 2 Litros de volumen de agua ultrapura en un vaso de precipitación. Se evaluó el flujo de permeado en condiciones anaeróbicas durante 15 min de filtración. Utilizando el método matemático mencionado por el manual de uso de membranas se evaluó el flujo de permeado (Q_p) considerando etapas cortas de filtrado en L/h. (Blasi & Grospelly, 2018).

$$Q_p = V_t / t \quad (1)$$

Donde, V_t representa el volumen de permeado y t , el tiempo de filtración. Se evaluó la TMP en parámetros de entrada (P_e), salida (P_s) y contrapresión permeada (C_p) expresada en Psi.

$$TMP = (P_e - P_s) / 2 - C_p \quad (2)$$

Finalmente, se evaluó el flujo de agua en $L/h \cdot m^2$ dada por la siguiente ecuación

$$DE_{125} = \frac{Q_p \cdot K_t}{TMP \cdot A} \quad (3)$$

Siendo, K_t el coeficiente de corrección de temperatura ($^{\circ}C$) y A el área de la membrana (m^2).

Ecuaciones que rigen el régimen de filtración a presión transmembrana constante

Las pruebas de funcionamiento se realizaron a una presión constante de 45 psi para las corridas de evaluación durante la UF de mezclas de biopolímeros- CaCO_3 . La presión se mantuvo constante durante 1800 s y el volumen del permeado se midió cada 10 segundos.

Los datos obtenidos, se evaluaron mediante el modelo de resistencias en serie planteado por (Cheng et al., 1997) para conocer las características del ensuciamiento en términos de dos resistencias (membrana y capa torta). Se utilizó las ecuaciones (4) y (5) para la evaluación de los datos experimentales.

$$Jv = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_c)} \quad (4)$$

Donde Jv es el flujo del volumen del permeado ($\text{L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), ΔP es la presión transmembrana (Pa), μ la viscosidad del permeado (Pa s). R_m y R_c son la resistencia de la membrana y la resistencia de la torta que se está formando en la superficie de la membrana (m^{-1}), respectivamente.

Para determinar el valor de resistencia R_m se siguió la ecuación planteada por (Zuriaga-Agustí et al., 2013).

$$R_m = \frac{\Delta P}{\eta * J_{iw}} \quad (5)$$

Donde, η es la viscosidad de la solución y J_{iw} es el flujo inicial de agua pura. Estos datos se calcularon en una hoja de Excel. Por otro lado, la resistencia hidráulica específica de una torta de membrana de espesor L está descrita como:

$$\hat{R}_c = \frac{R_c}{L} \quad (6)$$

Al tener presentes las ecuaciones (4) y (6) es posible enlazarlas para determinar las propiedades microestructurales que posee la torta usando el modelo de permeabilidad que se muestra en la siguiente sección.

De acuerdo, con estudios realizados acerca de la filtración de la torta, fue posible introducir la resistencia específica de esta en la ecuación (6) basándose en la masa. (Herrera-Robledo & Noyola, 2015). Esto fue posible, debido a que la masa de la torta está definida como la resistencia hidráulica de la torta (R_c) (m/kg) por unidad de masa de la torta (M) y por unidad de superficie de la membrana A_m (Carman, 1934; Ruth et al., 2022).

$$\alpha_M = \frac{A_m}{M} R_c \quad (7a)$$

Dónde; A_m fue determinado experimentalmente por (Blasi & Grospelly, 2018) y M es proporcional a L . La comparación de las definiciones (6) y (7a) muestra que las resistencias hidráulicas específicas $\hat{R}_c$ y α_M están relacionadas a través de la densidad de la torta (ρ).

$$\alpha_M = \frac{\hat{R}_c}{\rho} \quad (7b)$$

Por otro lado, combinando (4) y (7a) y asumiendo $M = C_f V_p$ es el producto entre la concentración de las partículas de la torta y el volumen de permeado se puede obtener la expresión α_M en términos de valores que pueden medirse fácilmente en un experimento de filtración:

$$\alpha_M = \frac{A_m}{C_f V_p} \left(\frac{\Delta P}{J v} - R_m \right) \quad (8)$$

La ecuación (8) se usa para determinar la dependencia de la resistencia específica de la torta (m/kg) basada en la masa α_M con respecto al tiempo de filtración.

Estimación de la porosidad de la torta según el modelo de Carman-Kozeny

La ecuación de Carman-Kozeny (Carman, 1997; Kozeny, 1927) establece que la resistencia hidráulica específica de una torta de membrana viene dada por la siguiente ecuación:

$$\hat{R}_c^{CK} = K_k \frac{S^2}{\epsilon^3} \quad (9a)$$

donde K_k es la constante de Kozeny y S la superficie específica de la torta (m^2/m^3). La ecuación (9a) se puede reescribir para especificar la dependencia del área superficial específica del tamaño de las partículas, la forma de las partículas y la porosidad de la torta de filtración (Kozeny, 1927):

$$\hat{R}_c^{CK} = K_k \frac{1}{\epsilon^3} \left[\frac{6(1-\epsilon)}{\psi d_e} \right]^2 \quad (9b)$$

Donde (ψ y d_e) describen la forma y el tamaño de las partículas que componen la torta ψ se refiere a la esfericidad ($1 \leq \psi$, $1 = \psi$ para una esfera) y d_e es el diámetro de la esfera (m). La densidad de la torta (ρ) (kg/m^3), y la porosidad de la torta (ϵ) (%) están conectadas a través de la densidad de las partículas (ρ_s) como $\rho = \rho_s (1 - \epsilon)$. Es así como, se pueden combinar las ecuaciones (7a) y (9b) para expresar la resistencia específica de la torta basada en la masa en función de las propiedades microestructurales de la torta:

$$\alpha_M^{CK} = K_k \frac{S^2}{\rho_s} \frac{1}{\epsilon^3 (1 - \epsilon)} \quad (10a)$$

Se considera que la corriente es una suspensión homogénea de partículas esféricas por lo tanto, la esfericidad y la constante de Kozeny son iguales a 1 y 5 respectivamente y la ecuación (10a) se puede reescribir como;

$$\alpha_M^{CK} = 180 \frac{1}{\rho_s d_c^2} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \quad (10b)$$

Con los valores de α_M de los experimentos de filtración (véase la ec. 9), la ec. (10b) puede utilizarse para obtener una estimación basada en el modelo de Carman-Kozeny de la porosidad media de la torta, ϵ , en función del tiempo de filtración.

Como polímeros modelo se seleccionó el quitosano (LC: 350 kDa, número de monómeros de glucosamina = 1953; 15-20% de acetilación, NR: 448869, Sigma-Aldrich, MO, EEUU) y la BSA (66,4 kDa, 583 residuos de aminoácidos, pI (punto isoeléctrico) = 4,95; estructura secundaria ~72%, 9048-46-8, Sigma-Aldrich, MO, EEUU), CaCl_2 5 mmol; NaHCO_3 5mmol, 5 ml de *B. clausii* todo esto llevándolo hasta un volumen final de 2 L, hasta obtener 3 soluciones con C/P, C/P + $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3 - C/P + $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3 + *B. clausii*.

Modelamiento del efecto del radio hidrodinámico y la porosidad

No fue posible calcular el efecto, el radio hidrodinámico y el tamaño de partícula debido a la falta de un microscopio de fuerza atómica (AFM) en la URAI. Por tanto, para el modelado se asumieron las siguientes condiciones:

Tabla 2: Tamaño de radio hidrodinámico ϕ asumido para el modelamiento en ensayos de ultrafiltración.

Radio hidrodinámico ϕ (m)			
	Valor asumido	Valor calculado	Valor asumido
C/P	200	400	800
C/P+ $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3	300	600	1200
C/P + $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3 + <i>B. clausii</i>	480	960	1920

Realizado por: Garcia, Lizeth, 2023.

Tabla 3: Tamaño de partícula p asumido para el modelamiento en ensayos de ultrafiltración.

Tamaño de partícula p (nm)			
	Valor asumido	Valor calculado	Valor asumido
C/P	475	950	1900
C/P+ $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3	823.75	1647.5	3295
C/P + $0.04\mu\text{M}$ CaCO_3 + <i>B. clausii</i>	346.51	1039.53	2079.06

Realizado por: Garcia, Lizeth, 2023.

RESULTADOS

Evaluación de los parámetros de filtración de la membrana

El flujo de la membrana en el ensayo se estabilizó en aproximadamente 2.80 L/h, después de 15 min del inicio de la filtración. La TMP se estabilizó y permaneció constante durante la operación. Se obtuvo una R_m de $1.48E+12$ (m^{-1}) similar a la establecida por Tami industries, así mismo se obtuvo un flujo de agua de 100.421 L/h $\cdot m^2$ para una TMP de 45 psi/310264 Pa a 22°C.

Comportamiento transitorio flujo de permeado y resistencia específica de la torta

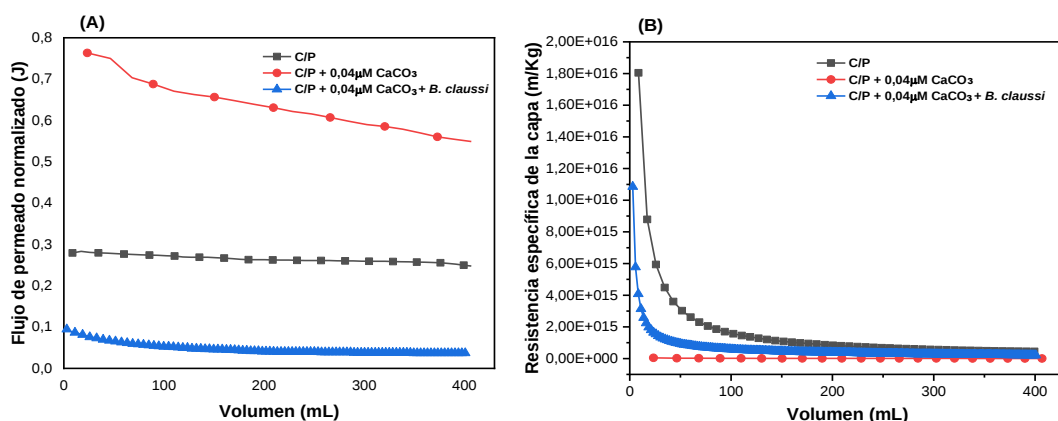


Figura 3: (A) Pendiente negativa del flujo de permeado volumétrico (J) en relación con el volumen de permeado. (B) Resistencia específica de la capa torta.

Realizado por: Garcia, Lizeth, 2023.

En la **Figura No. 3, A**. Se observa una disminución significativa del flujo a lo largo del volumen de filtrado en los tres casos. Se puede notar claramente que el flujo de líquido se mantuvo constante durante las primeras etapas del proceso de filtración.

Por otro lado, al considerar la solución que contiene C/P junto con una concentración adicional de $0.04 \mu M$ $CaCO_3$, se pudo apreciar un descenso en la velocidad del flujo de líquido. Aunque esta disminución no puede ser considerada insignificante, es importante destacar que fue más bien leve y no impactó de manera drástica en el proceso de filtración hasta después de haber pasado los primeros 200 mililitros del líquido a filtrar.

La resistencia (**Figura 3B**) se mantuvo constante a partir de los 50 mL de filtrado similar a lo ocurrido con el flujo. La solución con C/P + 0.04 μ M CaCO₃ no demostró resistencia en etapas tempranas de filtración y tampoco después de largos períodos.

Tabla 4: Evolución de la tasa de pérdida de flujo en función del volumen de permeado en pruebas de UF membrana tubular (300 kDa).

Flux (J) (m ³ /m ² /s)	Código del experimento	Volumen de permeado (mL)				
		Vp50	Vp100	Vp200	Vp300	Vp400
	C/P	0.28	0.27	0.26	0.26	0.25
	C/P + 0.04 μ M CaCO ₃	0.75	0.66	0.64	0.59	0.54
	C/P+ 0.04 μ M CaCO ₃ + <i>B. clausii</i>	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04

Realizado por: Garcia, Lizeth, 2023.

Se registraron reducciones significativas del flujo inicial (entre el 50% y el 75%) en etapas tempranas en todas las condiciones de filtrado mencionadas en la **Tabla No. 4**. No obstante, en el caso de la solución que contenía la bacteria, se observó una notable estabilidad del flujo a partir de los 400 mL de permeado, manteniéndose constante a lo largo del período de filtración.

Tabla 5: Propiedades microestructurales en las pruebas de UF membrana (300 KDa) con 3 distintos escenarios.

Propiedades microestructurales de la capa torta en pruebas de UF					
Código del experimento	Flujo inicial [Jo] ^a	Flujo de estado estacionario [Jss] ^a	Resistencia de la capa torta [Rss] ^b	Resistencia específica másica [α M] ^c	Porosidad [ϵ_{av}] ^d
C/P	0.28	0.27	2,62E-13	1,80E+16	3,98
C/P+ 0.04 μ M CaCO ₃	0.76	0.35	2,18E-12	4,350E+13	17,89
C/P+ 0.04 μ M CaCO ₃ + <i>B. clausii</i>	0.09	0,07	7,05E-14	1,09E+16	2,56
Unidades: ^a (m ³ /m ² /s), ^b (m ⁻¹), ^c (m/kg), ^d (%)					

Realizado por: Garcia, Lizeth, 2023.

La **Tabla No. 5** muestra los diferentes valores de algunos criterios relevantes encontrados sobre las propiedades microestructurales de la torta formada a partir del efluente de un biorreactor con membrana operativo. Se detalla condiciones de flujo umbral que marca una zona de bajo ensuciamiento (Etapa inicial UF) y una zona de alto ensuciamiento (Estado estacionario de UF), así como la resistencia específica de la torta en estado estacionario (ss), resistencia específica másica (resistencia de la torta) y la porosidad (% de poros de la capa torta).

Evolución de la porosidad

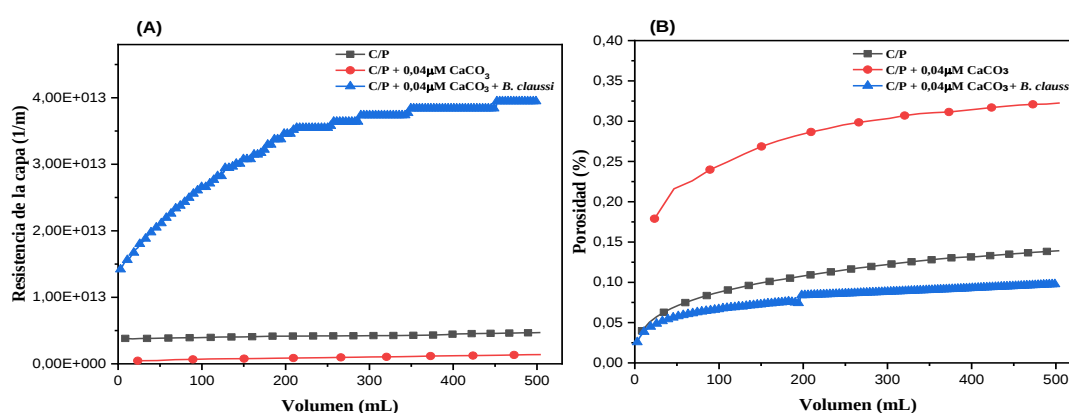


Figura 4: Comportamiento de la capa torta y porosidad de la capa: (A) Resistencia de la capa, (B) Evolución de la porosidad.

Realizado por: García, Lizeth, 2023.

En la **Figura No. 4** se muestra el comportamiento de la capa torta y la variación de la porosidad con respecto al volumen de permeado. En las tres condiciones, se observa un desarrollo constante de la torta. Los valores de resistencia de torta **Fig. 4A** muestran que en la condición con *B. clausii*, la resistencia de la capa crece en etapas tempranas de la filtración hasta alcanzar un estado estacionario, mientras que las demás condiciones permanecen estacionarias desde etapas tempranas (50 mL). **Fig. 4B**, la porosidad aumentó con el volumen de filtración hasta llegar a un estado estacionario a partir de los 500 mL. En el escenario (C/P + 0.04 μM CaCO₃), la porosidad aumentó con el volumen de filtración, lo cual indica un efecto contrario al observado al agregar *B. clausii*.

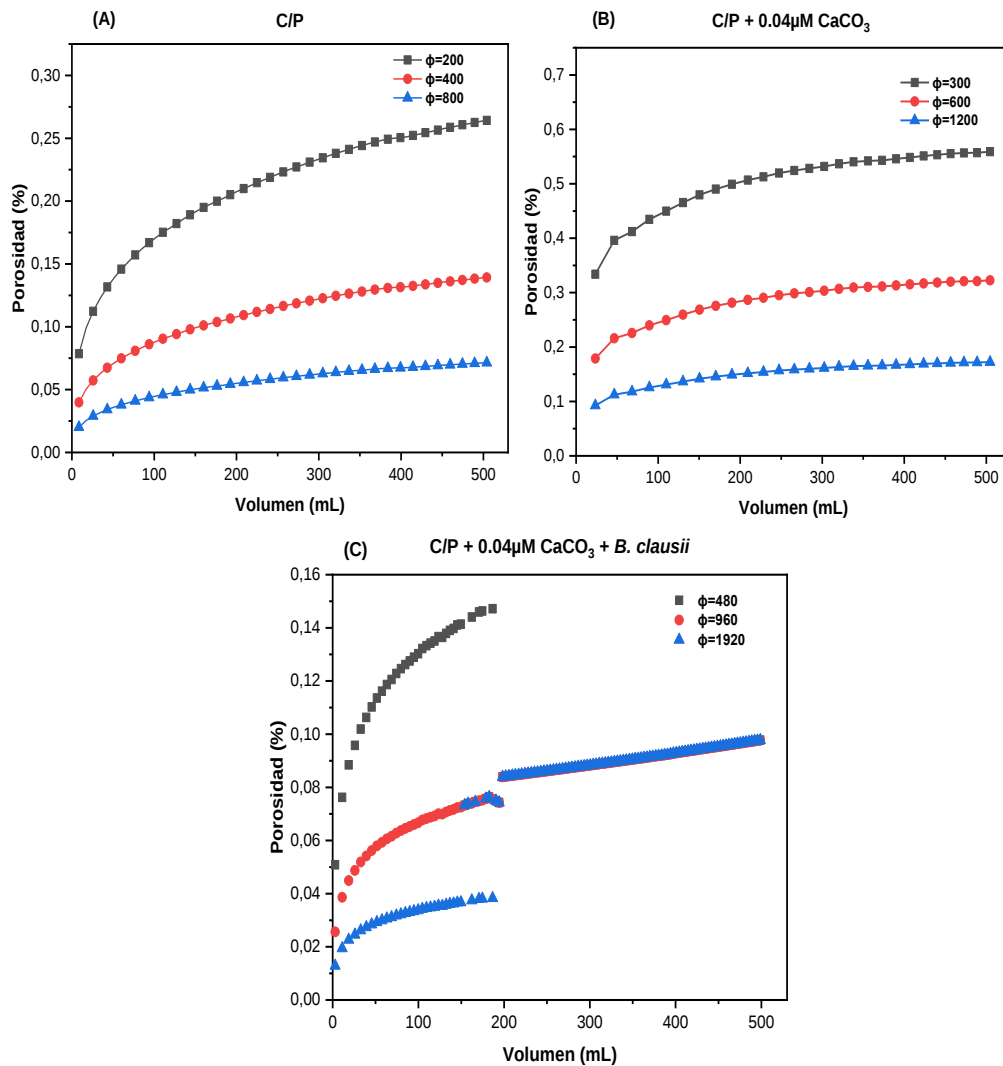


Figura 5: Impacto del modelado con respecto al radio hidrodinámico de la partícula al evaluar 3 distintas condiciones.

Realizado por: García, Lizeth, 2023.

En la **Figura No. 5** se representa el análisis del impacto del tamaño del radio sobre la porosidad de la capa. Se observa que a medida que el radio hidrodinámico se hace más pequeño, la porosidad aumenta a lo largo del volumen de filtrado en todos los casos. Al incrementar el tamaño del radio hidrodinámico, se observa una tendencia general a la disminución de la porosidad en todos los casos. No obstante, en la situación específica de la solución con *B. clausii*, tanto el menor como el mayor tamaño aparente del radio hidrodinámico convergen hacia el valor calculado a partir de una filtración de 200 mL.

Estructura fractal de la torta de membrana

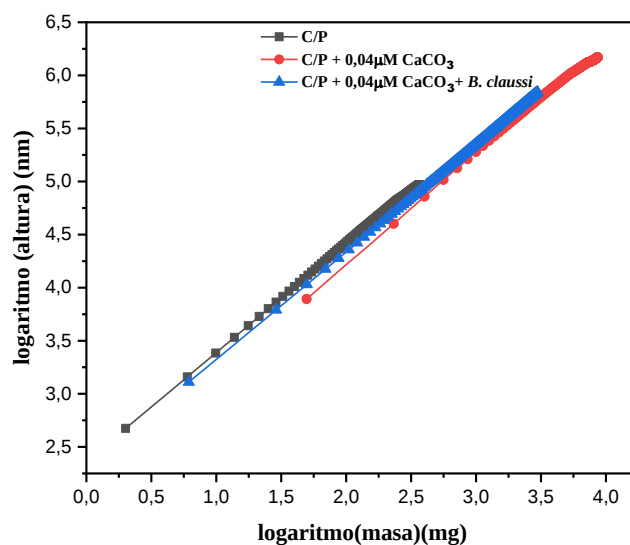


Figura 6: Dimensión fractal de la capa torta con 3 distintas soluciones

Realizado por: García, Lizeth, 2023.

En la **Figura No. 6** se muestra la relación logarítmica entre la masa depositada y el grosor de la capa torta que representa la dimensión fractal (Δ_F). Se puede inferir que a mayor volumen de permeado se depositan mayores cantidades de partículas en la membrana. En la **Tabla No. 6**, se observa que, para todas las condiciones de análisis, se encontraron altas dimensiones fractales de las tortas.

Tabla 6: Análisis de dimensión fractal y densidad de materia orgánica acumulada.

	Log (mg)		
Log (nm)	C/P	C/P + 0.04 µM CaCO ₃	C/P + µM CaCO ₃ + <i>B. clausii</i>
2.9	4.002	NA	NA
4.0	39.047	NA	47.342
4.25	68.646	74.012	83.072
4.5	119.019	188.861	145.503
4.75	209.517	318.237	257.925
5.0	NA	561.875	449.418
Δ_F 4-> 5	3.020	3.068	2.977
Δ_F global	2.972	2.968	2.977
Unidad: adimensional			

Realizado por: García, Lizeth, 2023.

De acuerdo con los valores de Δ_F presentados en la **Tabla No. 6** se observó la alta acumulación de materia orgánica en la solución con *B. clausii* en comparación con las soluciones que contenía sales y únicamente C/P (2.977 frente a 2.968 y 2.972). La solución con C/P + 0.04 μM CaCO_3 mostró una dimensión fractal menor a nivel global. Por otro lado, la adición de *B. clausii* en la solución resultó en una dimensión fractal mayor y constante en el tiempo. Además, al evaluar la Δ_F en el rango 4 a 5 se determinó que la condición que incluía CaCO_3 presentó la mayor acumulación de masa.

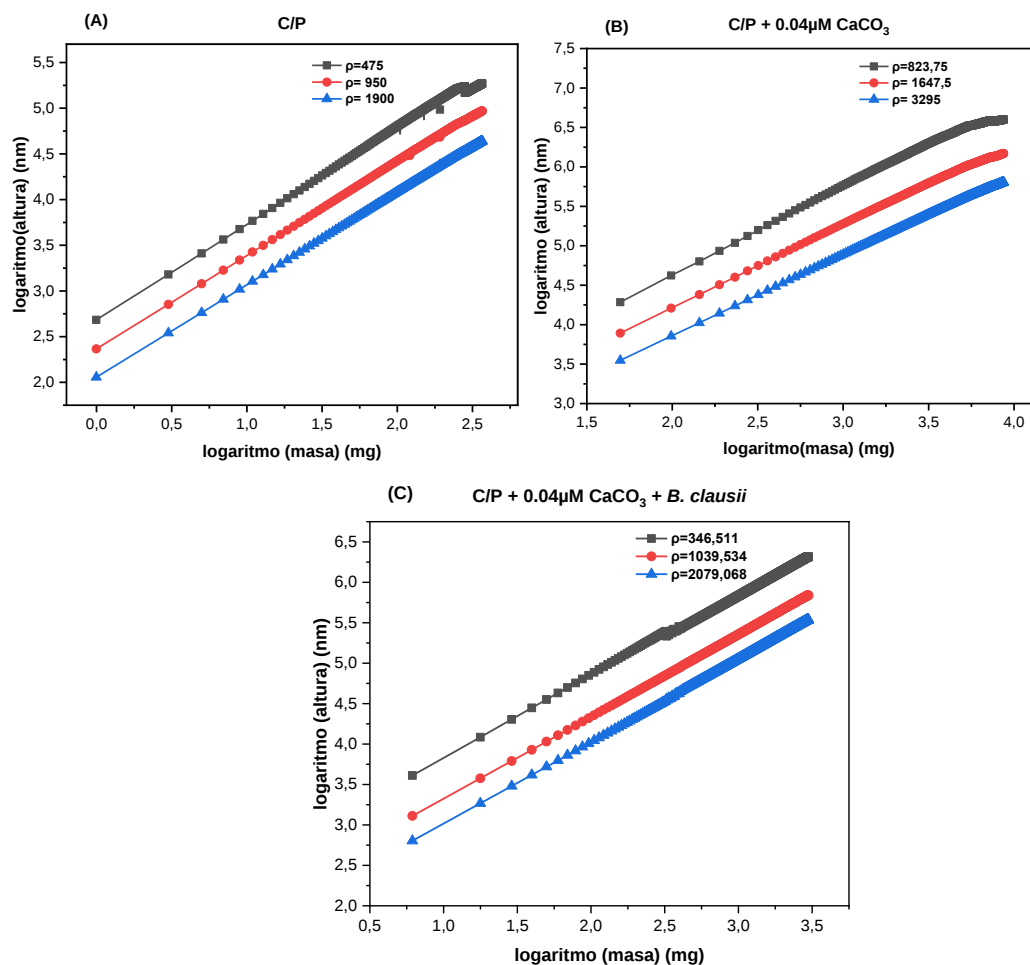


Figura 7: Impacto de la densidad de las partículas sobre la dimensión fractal. (A) Solución C/P, (B) Solución con C/P + 0.04 μM CaCO_3 , (C) Solución con C/P + 0.04 μM CaCO_3 *B. clausii*.

Realizado por: Garcia, Lizeth, 2023.

En la **Figura No. 7** se puede apreciar que la variación de la densidad de las partículas tiene un impacto significativo y proporcional en la dimensión fractal en los experimentos de ultrafiltración. Se observa que a medida que la densidad de las partículas disminuye, las dimensiones fractales también disminuyen. Por otro lado, cuando se aumenta la

densidad de las partículas, la dimensión fractal tiende a aumentar. Este patrón se observa en todos los casos analizados.

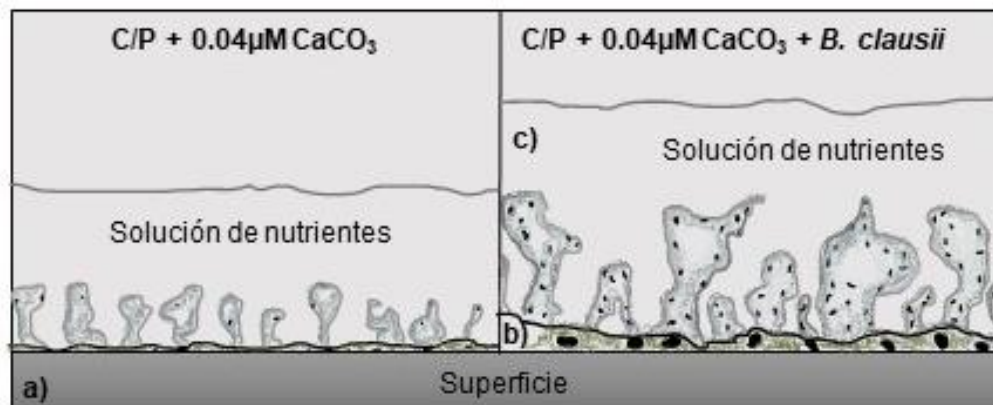


Figura 8: Gráficos de corte lateral de membrana a) Superficie de la membrana, b) Microorganismos y SPE c) Solución de nutrientes.

Realizado por: García, Lizeth, 2023.

La **Figura No. 8** representa gráficamente como se observaría la estructura de la capa torta, luego de evaluar con distintas condiciones experimentales, entre las que destaca en la figura la estructura al agregar sales y al agregar una bacteria, considerando los efectos de los parámetros como el tamaño y densidad de las partículas, la concentración de la suspensión y las condiciones de flujo.

DISCUSIÓN

Filtración de la membrana

Este patrón de comportamiento (flujo de permeado, enfrentamiento al ensuciamiento) ha sido identificado anteriormente por (Defrance & Jaffrin, 1999) en situaciones donde se mantienen una velocidad de flujo constante y el flujo viene impuesto principalmente por la bomba de permeado. Lo que sugiere que el MBR está siendo operado en condiciones de bajo flujo (Howell, 1995), lo que es de esperar, debido a que mantiene un flujo fiable antes de que se produzca un ensuciamiento irreversible a largo plazo. Los sistemas MBR comerciales a escala real que utilizan un retrolavado de membranas automatizado y frecuente han registrado un flujo de 45 litros por metro cuadrado hora. (Miller et al., 2008).

Por otro lado, al evaluar los valores de flux (J) que se alcanzan aproximadamente entre 200 - 400 mL de permeado corresponden al estado estacionario **Figura 3A**, y refleja la consolidación de una torta en la superficie de filtración. Este valor también permite identificar el flux crítico que marca una zona de bajo ensuciamiento a una transición hacia un alto ensuciamiento. Sin embargo, no asegura un crecimiento fractal. (Flores Paltán & Velín Sagbay, 2014).

En los tres casos, se observa una disminución de la α_M **Figura 3B** con respecto al volumen de filtración, lo que indica evidentemente un crecimiento fractal o capa torta sobre la membrana. Estudios anteriores (Amjad et al., 2015; Ozofor et al., 2021) han señalado este fenómeno como el resultado del crecimiento de la estructura fractal de la torta después de largos períodos de filtrado. Por otro lado, (Amjad et al., 2015) informaron acerca de una tendencia opuesta atribuyendo este comportamiento a la compresión de la torta. En este estudio, las condiciones experimentales dieron lugar al crecimiento de la capa torta estructuralmente fuerte, compacta e irreversible en 2 escenarios con; C/P y C/P+ 0.04 μ M CaCO₃ + *B. clausii*.

Al sobrepasar los 400mL de filtrado, la α_M entra en un estado estacionario irreversible a lo largo del volumen de filtrado. Aunque la resistencia de la torta aumenta con el tiempo, reflejado en la disminución del flujo de permeado, la porosidad muestra tendencias opuestas. Esto sugiere que se desarrolló una estructura más compleja y rígida en la capa incrustante al agregar una bacteria, debido a las asociaciones de biopolímeros y cationes son los que dan lugar a bloques mineralizados de SPE (Herrera-Robledo et al., 2010).

Varios estudios han demostrado que la mineralización biológica puede producir biominerales por interacción orgánico-mineral que mejoran las propiedades mecánicas del biofouling. De acuerdo con esta hipótesis se puede afirmar que los compuestos inorgánicos que se encuentran en la solución podrían ser susceptibles de precipitación en sitios específicos dentro de la matriz SPE y esto podría actuar como sitios epitaxiales para una mayor cristalización heterogénea, provocando un ensuciamiento irreversible y con mayor compresibilidad. (Villarreal-Ramírez et al., 2009); (Mann 2001; (Reyes-Grajeda et al. 2002). En la mezcla que contiene *B. clausii* la porosidad resultó menor en comparación con los otros escenarios; la adición de la bacteria y sales no modifica la tendencia a que se desarrolle una torta.

Evolución de la porosidad

En la **Figura No. 4**, en la mezcla que contiene *B. clausii* la porosidad resultó menor en comparación con los otros escenarios, esto demuestra que la adición de la bacteria y sales no modifica la tendencia a que se desarrolle una torta. Estos resultados concuerdan con estudios anteriores (Ozofor et al., 2021) que atribuyen el aumento inicial de la porosidad de la torta al empaquetamiento aleatorio de las partículas en la superficie de membrana.

La concentración de la solución detallada en la **Tabla No. 1**, que tiene una mayor fuerza iónica, debe conducir a un tamaño aún menor de las partículas primarias, es decir es más probable la formación de compuestos iónicos. Esto es de esperar, ya que según (Amjad et al., 2015) los agregados muy ramificados y sueltos, caracterizados por dimensiones fractales bajas, tienen más probabilidades de reestructurarse en agregados apretados en condiciones de mayor floculación.

En el estudio mencionado, agregados conformados por material orgánico-inorgánico de alginato y calcio forman tortas más porosas y gruesas en comparación con el alginato solo, y que su permeabilidad se compensa por la masa depositada en la torta, lo que resulta en una resistencia general más elevada. A partir de esto, se puede concluir que a mayores relaciones LWC/BSA (mayor cantidad de proteínas), la porosidad disminuye.

La porosidad de la torta se puede dividir en dos niveles jerárquicos: porosidad de las partículas primarias, la porosidad intra-agregada (de los flóculos que componen la torta) y la porosidad inter-agregada (correspondiente a los huecos entre los flóculos) (Amjad et al., 2015).

A medida que aumenta el volumen de permeado, **Figura No. 4** se estima la formación de flóculos en la torta. Los flóculos al contener huecos en su estructura pueden experimentar un efecto de relleno o “filler” debido a la secreción de SPE por parte de *B. clausii*, lo que reduce la porosidad. Según, (Oppenheimer-Shaanan et al., 2016) la acumulación de CaCO_3 dentro de las arrugas y la formación de arrugas demuestran que la mineralización dentro de las arrugas de *B. clausii* probablemente ocurre en un ambiente intracelular tamponado y controlado de modo que estos flóculos van a permitir el paso de las partículas entre ellas, provocando un proceso de inter-agregación. (Keren-Paz & Kolodkin-Gal, 2020); (Miño & Robledo, 2022).

A altas concentraciones, las sales ejercen efectos específicos sobre las proteínas, dando lugar a la desnaturalización de las proteínas, así como en su salinización (precipitación o cristalización) (Arakawa & Timasheff, 1984). Los aditivos afectan a la solubilidad y estabilidad de las proteínas. Es decir, cuando se inyecta sales a una solución con biopolímeros, tienden a inactivar las cargas del polímero volviéndolo soluble en la solución (Herrera-Robledo, Arenas, et al., 2011).

Se estima que la solución (C/P) y la solución (C/P+ 0.04 μ M CaCO_3 + *B. clausii*) forman una torta más compleja y rugosa, debido a su menor porosidad. Estas condiciones pudieron haber sido resultado de agregados de tamaño de entre 400-800 μ m o a en la formación de nuevas estructuras tridimensionales al unir moléculas entre sí.

Si tenemos una condición libre de sales y bacterias **Figura No. 5**, al parecer teóricamente si se modifica el radio hidrodinámico puede ocurrir en teoría es probable que se formen estructuras más compactas y densas en la capa de torta (Lee et al., 2005).

Dimensión fractal

La dimensión fractal **Figura No. 6** de C/P + 0.04 μ M CaCO_3 sugiere que la capa formada es más delgada que las capas formadas en las demás condiciones, algo similar expuso (Lee et al., 2005b), este fenómeno puede dar lugar a una compresión de la torta menos severa, debido a que los enlaces entre las partículas se rompen más fácilmente por el mayor grado de solapamiento de los flóculos. Mientras que la solución que contenía bacteria presentó una dimensión fractal mayor. Esto se debe probablemente a la formación de cristales entre los iones Ca^{+2} y Na^{+} cargados positivamente, en presencia de un exceso de superficies cargadas negativamente en este caso que contiene una bacteria (Phoenix & Konhauser, 2008).

El resultado arrojado al evaluar del rango de 4 a 5 fue elevado para la solución con C/P + 0.04 μ M CaCO_3 . Esto sugiere que una alta densidad de materia en la torta genera agregados de partículas estables que se están depositando en la membrana (Ozofor

et al., 2021); (Lee et al., 2005) expuso algo similar en sus experimentos, indicando que la distribución del tamaño de los flóculos puede afectar en la resistencia específica media de la torta.

En la **Tabla No. 4** se evidencia la formación de conglomerados celulares más rugosos y complejos con la solución que contenía *B. clausii* debido a que es más cercana a 3. La dimensión fractal es una medida de la rugosidad del límite de la agrupación celular. Una dimensión fractal más grande indica una superficie más irregular de agrupación celular. En el espacio tridimensional, la dimensión fractal varía de uno a tres. Siendo 3 el valor con mayor complejidad y rugosidad de las partículas (Gómez, 2020).

Cuando la densidad de partículas en la capa de torta es baja **Figura No. 7**, es decir, cuando las partículas están dispersas, es más probable que se formen estructuras suaves y menos complejas, lo que resulta en una menor dimensión fractal. Esto sugiere una menor eficiencia de retención de partículas y una mayor permeabilidad en la capa de torta. Por el contrario, cuando la densidad de partículas es alta, es decir, las partículas están más cercanas y se agrupan, es probable que se formen estructuras rugosas y complejas, lo que conduce a una mayor dimensión fractal. En este caso, la capa de torta puede tener una mayor eficiencia de retención de partículas, pero también una menor permeabilidad (Amjad et al., 2015).

CONCLUSIONES

El reactor automatizado realizado en este trabajo demostró un flujo estable de 2.80 L/h con una TMP constante. Esto indica que operar el MBR en condiciones de bajo flujo, controlado por la bomba de permeado, es beneficioso para mantener un flujo confiable y prevenir el ensuciamiento irreversible. La adición de *B. clausii* afecta las propiedades microestructurales de la capa de torta de la membrana durante ultrafiltración de una suspensión multicomponente (orgánico-mineral). Esto se evidenció mediante la dimensión fractal mayor (2.977 frente a 2.968 y 2.972).

La presencia de bacterias y la adición de CaCO_3 tienen un impacto en la disminución del flujo durante la filtración. Se sugirió que la mineralización biológica y la interacción orgánico-mineral podrían ser responsables de la formación de una capa más compacta y de menor porosidad. Las adhesinas superficiales, como las proteínas asociadas a biopelículas, pueden mediar en las interacciones célula-célula y célula-tejido dentro de la biopelícula, proporcionando cohesión y complejidad a la capa de torta. Por lo tanto, parece razonable concluir que la adición de *B. clausii* brindó mayor complejidad a la capa torta durante la formación de biofouling a largos períodos de filtración.

En resumen, este trabajo demostró que el flujo de permeado, la porosidad de la torta y la dimensión fractal son parámetros importantes para considerar en la filtración de membrana en un sistema MBR. Estos resultados contribuyen al entendimiento de los procesos de ensuciamiento y proporcionan información relevante para el diseño y la operación de sistemas de MBR.

REFERENCIAS

- Amjad, H., Khan, Z., & Tarabara, V. V. (2015). Fractal structure and permeability of membrane cake layers: Effect of coagulation–flocculation and settling as pretreatment steps. *Separation and Purification Technology*, 143, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.020>
- Arakawa, T., & Timasheff, S. N. (1984). Mechanism of protein salting in and salting out by divalent cation salts: Balance between hydration and salt binding. *Biochemistry*, 23(25), 5912-5923. <https://doi.org/10.1021/bi00320a004>
- Bet-moushoul, E., Mansourpanah, Y., Farhadi, Kh., & Tabatabaei, M. (2016). TiO₂ nanocomposite based polymeric membranes: A review on performance improvement for various applications in chemical engineering processes. *Chemical Engineering Journal*, 283, 29-46. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.124>
- Blasi, B., & Grospelly, L. (2018). DIRECCIONES TÉCNICAS PARA LAS MEMBRANAS CERÁMICAS TUBULARES INSIDE CéRAM™ Y FILTANIUM™.
- Carman, P. C. (1934). *A study of the mechanism of filtration* [University College London]. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1570357>
- Carman, P. C. (1997). Fluid flow through granular beds. *Chemical Engineering Research and Design*, 75, S32-S48. [https://doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80003-2)
- Cheng, T. W., Yeh, H. M., & Gau, C. T. (1997). Resistance Analyses for Ultrafiltration in Tubular Membrane Module. *Separation Science and Technology*, 32(16), Article 16. <https://doi.org/10.1080/01496399708006960>
- Defrance, L., & Jaffrin, M. Y. (1999). Comparison between filtrations at fixed transmembrane pressure and fixed permeate flux: Application to a membrane bioreactor used for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 152(2), 203-210. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(98\)00220-8](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(98)00220-8)
- Flores Paltán, F. G., & Velín Sagbay, J. P. (2014). *Diseño y construcción de un BIORREACTOR anaerobio en fase líquida para tratar aguas residuales de curtiembre* [Bachelor Thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3500>
- Ganiyu, S. O., van Hullebusch, E. D., Cretin, M., Esposito, G., & Oturan, M. A. (2015). Coupling of membrane filtration and advanced oxidation processes for removal of pharmaceutical residues: A critical review. *Separation and Purification Technology*, 156, 891-914. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.09.059>

- Gómez, P. I. G. (2020). *Tratamiento de aguas residuales de piscicultura con fines de reutilización y análisis de mecanismos de bloqueo de poro*. Universidad Regional Amazónica Ikiam.
- Herrera-Robledo, M., Arenas, C., Morgan-Sagastume, J. M., Castaño, V., & Noyola, A. (2011). Chitosan/albumin/CaCO₃ as mimics for membrane bioreactor fouling: Genesis of structural mineralized-EPS-building blocks and cake layer compressibility. *Chemosphere*, 84(2), 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.04.059>
- Herrera-Robledo, M., Cid-León, D. M., Morgan-Sagastume, J. M., & Noyola, A. (2011). Biofouling in an anaerobic membrane bioreactor treating municipal sewage. *Separation and Purification Technology*, 81(1), 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.06.041>
- Herrera-Robledo, M., Morgan-Sagastume, J. M., & Noyola, A. (2010). Biofouling and pollutant removal during long-term operation of an anaerobic membrane bioreactor treating municipal wastewater. *Biofouling*, 26(1), 23-30. <https://doi.org/10.1080/08927010903243923>
- Herrera-Robledo, M., & Noyola, A. (2015). The evolution of pore-blocking during the ultrafiltration of anaerobic effluent-like mixtures. *Separation and Purification Technology*, 147, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.04.027>
- Hong, H., Peng, W., Zhang, M., Chen, J., He, Y., Wang, F., Weng, X., Yu, H., & Lin, H. (2013). Thermodynamic analysis of membrane fouling in a submerged membrane bioreactor and its implications. *Bioresource Technology*, 146, 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.040>
- Hosseini, S. S., Bringas, E., Tan, N. R., Ortiz, I., Ghahramani, M., & Alaei Shahmirzadi, M. A. (2016). Recent progress in development of high performance polymeric membranes and materials for metal plating wastewater treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 78-110. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.11.005>
- Houari, A., Seyer, D., Couquard, F., Kecili, K., Démocrate, C., Heim, V., & Martino, P. D. (2010). Characterization of the biofouling and cleaning efficiency of nanofiltration membranes. *Biofouling*, 26(1), 15-21. <https://doi.org/10.1080/08927010903277749>
- Howell, J. A. (1995). Sub-critical flux operation of microfiltration. *Journal of Membrane Science*, 107(1-2), 165-171. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(95\)00114-R](https://doi.org/10.1016/0376-7388(95)00114-R)
- Keren-Paz, A., & Kolodkin-Gal, I. (2020). A brick in the wall: Discovering a novel mineral component of the biofilm extracellular matrix. *New Biotechnology*, 56, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.11.002>

Kozeny, J. (1927). *Über Kapillare Leitung des Wassers im Boden* Stizurgsberichte [Royal Academy of Science].

[https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1664263](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1664263)

Le-Clech, P., Chen, V., & Fane, T. A. G. (2006). Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 284(1-2), 17-53. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.08.019>

Lee, S. A., Fane, A. G., & Waite, T. D. (2005a). Impact of Natural Organic Matter on Floc Size and Structure Effects in Membrane Filtration. *Environmental Science & Technology*, 39(17), 6477-6486. <https://doi.org/10.1021/es050148o>

Lee, S. A., Fane, A. G., & Waite, T. D. (2005b). Impact of Natural Organic Matter on Floc Size and Structure Effects in Membrane Filtration. *Environmental Science & Technology*, 39(17), 6477-6486. <https://doi.org/10.1021/es050148o>

Leong, S., Razmjou, A., Wang, K., Hapgood, K., Zhang, X., & Wang, H. (2014). TiO₂ based photocatalytic membranes: A review. *Journal of Membrane Science*, 472, 167-184. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.08.016>

Li, X., Jiang, L., & Li, H. (2018). Application of Ultrafiltration Technology in Water Treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 186, 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/3/012009>

Lin, H. J., Xie, K., Mahendran, B., Bagley, D. M., Leung, K. T., Liss, S. N., & Liao, B. Q. (2010). Factors affecting sludge cake formation in a submerged anaerobic membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 361(1-2), 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.05.062>

Liu, C., Lee, J., Ma, J., & Elimelech, M. (2017). Antifouling Thin-Film Composite Membranes by Controlled Architecture of Zwitterionic Polymer Brush Layer. *Environmental Science & Technology*, 51(4), 2161-2169. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05992>

Meng, F., Chae, S.-R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.-S., & Yang, F. (2009). Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*, 43(6), 1489-1512. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044>

Miller, P., van't Oever, R., & van Hoof, S. (2008). *Side Stream Air Lift MBR Development and Successful Application of a New Generation of MBR*.

Miño, K., & Robledo, M. H. (2022). *Efecto de la relación carbohidrato/proteína-mineral sobre las propiedades microestructurales del biofouling durante la ultrafiltración de efluentes de*

biorreactores con membrana [Universidad Regional Amazónica Ikiam].
https://repositorio.ikiam.edu.ec/jspui/handle/RD_IKIAM/625

- Montalván-Estrada, A., Desdín-García, L., Peláez-Abellan, E., Brígido-Flores, O., Sananastacio-Rebollar, I., Montalván-Estrada, A., Desdín-García, L., Peláez-Abellan, E., Brígido-Flores, O., & Sananastacio-Rebollar, I. (2019). Estado actual en el desarrollo de reactores fotocatalíticos de membranas, para el tratamiento de contaminantes orgánicos persistentes en el agua y las aguas residuales. *Tecnología Química*, 39(2), 421-443.
- Oppenheimer-Shaanan, Y., Sibony-Nevo, O., Bloom-Ackermann, Z., Suissa, R., Steinberg, N., Kartvelishvily, E., Brumfeld, V., & Kolodkin-Gal, I. (2016). Spatio-temporal assembly of functional mineral scaffolds within microbial biofilms. *Npj Biofilms and Microbiomes*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/npjbiofilms.2015.31>
- Oviedo, C. V. R. (2020). *Precipitación de carbonatos inducida microbiológicamente como alternativa para remediar entornos naturales contaminados con metales y metaloides tóxicos*. 122.
- Ozofor, I. H., Tarabara, V. V., Da Costa, A. R., & Morse, A. N. (2021). Analysis of microstructural properties of ultrafiltration cake layer during its early stage formation and growth. *Journal of Membrane Science*, 620, 118903. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118903>
- Park, H.-D., Chang, I.-S., & Lee, K.-J. (2015). *Principles of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment* (0 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18368>
- Phillips, A. J., Gerlach, R., Lauchnor, E., Mitchell, A. C., Cunningham, A. B., & Spangler, L. (2013). Engineered applications of ureolytic biomineralization: A review. *Biofouling*, 29(6), 715-733. <https://doi.org/10.1080/08927014.2013.796550>
- Phoenix, V. R., & Konhauser, K. O. (2008). Benefits of bacterial biomineralization. *Geobiology*, 6(3), 303-308. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2008.00147.x>
- Ruiz Hernández, L. M. (2014). *Modelado y simulación de sistemas de depuración biológica de aguas residuales urbanas mediante de biorreactores de membrana (MBR)*. Universidad de Granada. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/34059>
- Ruth, B. F., Montillon, G. H., & Montonna, R. E. I. (2022). Studies in Filtration—I. Critical Analysis of Filtration Theory. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 25(1). <https://doi.org/10.1021/ie50277a018>
- Sri Abirami Saraswathi, M., Kausalya, R., Kaleekkal, N. J., Rana, D., & Nagendran, A. (2017). BSA and humic acid separation from aqueous stream using polydopamine coated PVDF ultrafiltration membranes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2937-2943. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.051>

- Tan, X., Acquah, I., Liu, H., Li, W., & Tan, S. (2019). A critical review on saline wastewater treatment by membrane bioreactor (MBR) from a microbial perspective. *Chemosphere*, 220, 1150-1162. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.027>
- Villarreal-Ramírez, E., Moreno, A., Mas-Oliva, J., Chávez-Pacheco, J. L., Narayanan, A. S., Gil-Chavarría, I., Zeichner-David, M., & Arzate, H. (2009). Characterization of recombinant human cementum protein 1 (hrCEMP1): Primary role in biomineralization. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 384(1), 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2009.04.072>
- Yang, N., Wen, X., Waite, T. D., Wang, X., & Huang, X. (2011). Natural organic matter fouling of microfiltration membranes: Prediction of constant flux behavior from constant pressure materials properties determination. *Journal of Membrane Science*, 366(1-2), 192-202. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.10.003>
- Yang, W., Cicek, N., & Ilg, J. (2006). State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America. *Journal of Membrane Science*, 270(1-2), 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.07.010>
- Zuriaga-Agustí, E., Bes-Piá, A., Mendoza-Roca, J. A., & Alonso-Molina, J. L. (2013). Influence of extraction methods on proteins and carbohydrates analysis from MBR activated sludge flocs in view of improving EPS determination. *Separation and Purification Technology*, 112, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.03.048>