

Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación
Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial (PUIDI)

Informe final

Membranas entrecruzadas con Cu^{+2} y Ag^{+1} y su aplicación en la filtración de agua y agente biocida

Equipo de investigación

Dr. Edward Mario Augusto Guerrero Gutiérrez

Licda. Isabel Cristina Gaitán Fernández
Licda. Keila Mariana Guerrero Gutiérrez
Br. María Raquel Abad Sandoval

Guatemala, febrero 2021

Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Escuela de Química Biológica Universidad de San Carlos de Guatemala

Contraportada (reverso de la portada)

Dr. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Inga. Liuba María Cabrera de Villagrán
Coordinadora del Programa de Investigación en Desarrollo Industrial (PUIDI)

Dr. Edward Mario Augusto Guerrero Gutiérrez
Coordinador del proyecto

Licda. Isabel Cristina Gaitán Fernández
Investigadora

Licda. Keila Mariana Guerrero Gutiérrez
Investigadora

Br. María Raquel Abad Sandoval
Auxiliar de investigación II

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación, 2020. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada por la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la Partida Presupuestaria 4.8.63.4.41. durante el año 2020 en el Programa Universitario de Investigación de en Desarrollo Industrial (PUIDI).

Índice

Índice de ilustraciones.....	V
Índice de tablas.....	V
Índice de figuras.....	V
1. Resumen.....	1
2. Palabras clave.....	1
3. Abstract and keyword.....	1
4. Introducción.....	2
5. Planteamiento del problema.....	3
6. Preguntas de investigación.....	4
6.1. General.....	4
6.2. Específicas.....	4
7. Delimitación en tiempo y espacio.....	4
8. Marco teórico.....	5
8.1. Tecnología de membranas para el tratamiento de aguas.....	5
8.2. Entrecruzamiento de polímeros.....	6
8.3. Quitosano.....	6
8.4. Acetato de celulosa.....	7
8.5. Enterobacterias.....	7
8.6. Coliformes fecales.....	8
8.7. <i>Escherichia coli</i>	8
8.8. Agua para el consumo humano.....	9
9. Estado del arte.....	9
10. Objetivo general.....	10
10.1. Objetivos específicos.....	10
11. Hipótesis.....	10
11.1. Hipótesis de Investigación.....	10
11.2. Hipótesis nula.....	10
12. Materiales y métodos.....	11
12.1. Materiales.....	11
12.2. Métodos.....	11
12.2.1. Preparación de la membrana.....	11

12.2.1.1.	Elaboración de la membrana de quitosano.....	11
12.2.1.2.	Entrecruzamiento de membranas con Cu ⁺²	11
12.3.	Caracterización de la membrana.....	12
12.3.1.	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).....	12
12.3.2.	Absorción de agua.....	12
12.3.3.	Capacidad de intercambio iónico.....	12
12.3.4.	Análisis termogravimétrico (TGA).....	12
12.3.5.	Análisis mecánico dinámico (DMA).....	13
12.3.6.	Análisis óptico.....	13
12.4.	Preparación de solución madre de <i>E. coli</i> ATCC.....	13
12.5.	Proceso de filtración de <i>E.coli</i> contenido en el agua.....	13
12.6.	Capacidad biocida de las membranas.....	14
12.7.	Procesamiento y análisis de la información.....	14
13.	Vinculación, difusión y divulgación.....	14
14.	Productos, hallazgos, conocimientos o resultados.....	15
14.1.	Preparación de la membrana.....	15
14.2.	Caracterización de la membrana.....	15
14.2.1.	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (ATR-FTIR).....	15
14.2.2.	Propiedades de equilibrio.....	17
14.2.2.1.	Absorción de agua y capacidad de intercambio iónico.....	17
14.2.3.	Propiedades termales.....	18
14.2.4.	Propiedades mecánicas.....	20
14.2.5.	Análisis de la superficie.....	21
14.3.	Proceso de filtración de <i>E. coli</i> y efecto biocida.....	23
15.	Análisis y discusión de resultados.....	26
15.1.	Propiedades químicas, termales, mecánicas y ópticas.....	26
15.2.	Proceso de filtración y capacidad biocida de las membranas.....	27
16.	Conclusiones.....	28
17.	Impacto esperado.....	28
18.	Referencias.....	28
19.	Apéndice.....	33

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Esquema de membrana utilizada para aplicaciones de tratamiento de agua	6
Ilustración 2. Estructura química del quitosano.	6
Ilustración 3. Estructura química del acetato de celulosa.....	7

Índice de tablas

Tabla 1. Delimitación en tiempo y espacio del proyecto	4
Tabla 2. Determinación de las propiedades mecánicas en tensión de la membrana de celulosa a 30°C	21
Tabla 3. Datos obtenidos para la capacidad de intercambio iónico.....	33
Tabla 4. Datos obtenidos para determinar el efecto biocida	34
Tabla 5. Datos obtenidos para determinar el efecto biocida de la membrana de quitosano.....	34
Tabla 6. Datos obtenidos para el proceso de filtración	35
Tabla 7. Datos obtenidos para la cantidad absorbida de agua.....	35

Índice de figuras

Figura 1. Membrana de quitosano [A] y quitosano-Cu ⁺² [B].....	15
Figura 2. FTIR de la membrana de celulosa y celulosa-Cu ⁺²	16
Figura 3. FTIR de la membrana de quitosano y quitosano-Cu ⁺²	17
Figura 4. Propiedades de equilibrio de las membranas: absorción de agua	18
Figura 5. Capacidad de intercambio iónico.....	18
Figura 6. Propiedades termales: proceso de degradación de la membrana de celulosa y celulosa-Cu ⁺²	19
Figura 7. Proceso de degradación de la membrana de quitosano y quitosano-Cu ⁺²	20
Figura 8. Propiedades mecánicas de las membranas.....	21
Figura 9. Imagen de la superficie de la membrana de celulosa [A] y celulosa-Cu ⁺² [B] a 500X. Magnificación de la membrana celulosa-Cu ⁺² a 3000X [C].....	22
Figura 10. Imagen de la superficie de la membrana de quitosano [A] y quitosano-Cu ⁺² [B] a 500X.....	23
Figura 11. Efecto de la me membranas de celulosa y celulosa-Cu ⁺² en el proceso de filtración	

de *E. coli*. Cultivo de la solución madre (1), membrana (2) y filtrado (3) de la
membrana de celulosa [B]24

Figura 12. Efecto biocida de las membranas de celulosa y celulosa-Cu⁺²25

Figura 13. Efecto biocida de las membranas de quitosano y quitosano-Cu⁺²25

Membranas entrecruzadas con Cu^{+2} y Ag^{+1} y su aplicación en la filtración de agua y agente biocida

1. Resumen

Esta investigación estudió la preparación de membranas compuestas de celulosa y quitosano entrecruzadas con Cu^{+2} para determinar su efecto biocida y eficiencia en la remoción de *Escherichia coli*. Las membranas quitosano se obtuvieron por medio de la técnica de evaporación del solvente. Las propiedades de absorción de agua, degradación termal y mecánicas de las membranas fueron evaluadas con el propósito de modificar la estructura química, la topografía de la superficie y estudiar su impacto como agente biocida. Los resultados muestran que la incorporación Cu^{+2} interactúa con los grupos iónicos de las membranas que inducen un cambio estructural produciendo un aumento en el módulo G^* de 190%. Además, el catión provee estabilidad termal a temperaturas menores de 200°C y le produce cambios superficiales a la membrana, especialmente a la membrana de celulosa. Adicionalmente, la membrana de celulosa- Cu^{+2} aumentó su efecto biocida contra *E. coli* hasta un 96%. El proceso de remoción por medio de la filtración aumentó 41% con la incorporación del catión. Esta investigación muestra el efecto de la interacción del catión con grupos iónicos en la membrana que mejoran las propiedades de filtración y efecto biocida contra enterobacterias dañinas para el ser humano.

2. Palabras clave

Unidades formadoras de colonias, fenómeno de transporte, degradación termal, morfología

3. Abstract and keyword

*This research studied the membrane preparation of Cu^{+2} crosslinked membranes composed of cellulose and chitosan to determine its biocidal effect and efficiency to remove *Escherichia coli*. Water absorption, thermal degradation, and G^* modulus evaluated the Cu^{+2} impact on the equilibrium, thermal and mechanical properties. These results showed that Cu^{+2} incorporation interacts with the ionic groups, inducing a structural change increasing the G^* modulus by 190%. Moreover, the cation provides thermal stability at temperatures below 200°C and produced surface changes to the membrane, especially to the cellulose membrane. Additionally, the cellulose- Cu^{+2} membranes increased 96% their biocidal effect against *E. coli*. The enterobacter filtration process increased 41% with the cation incorporation into the cellulose membrane. Therefore, this research showed the cation effect on the ionic groups in the membrane that improve the filtration properties and biocidal effect against harmful enterobacteria to humans.*

Keywords: colony-forming units, transport phenomena, thermal degradation, morphology

4. Introducción

El agua es crítica para la supervivencia del ser humano. Lamentablemente aún en este tiempo de avances tecnológicos, muchas de las personas todavía no poseen acceso a agua potable (Cabral, 2010). Esto provoca que las personas puedan adquirir infecciones patógenas por medio del consumo del agua, el cual le puede llegar a provocar hasta la muerte. En América Latina, un alto grado de su población posee infecciones causada por patógenos resistentes a medicamentos, en comparación a otras regiones del mundo. Estos patógenos son fácilmente transmitidos entre los individuos de una comunidad por medio del agua y de los alimentos (Salles et al., 2013). Las enterobacterias tales como *E. coli* son algunos de los patógenos que se encuentran en el agua (Cabral, 2010).

Tecnologías de membranas han sido utilizadas para la remoción de enterobacterias (Fane, Wang, & Hu, 2015; Qi, Liu, Wang, & Hu, 2018; Szekeres et al., 2018). Debido a los continuos avances en el desarrollo de membranas, se han conseguido membranas con mejores propiedades termal, mecánicas y de resistencia a agentes químicos (Fane, Wang, & Hu, 2015). Estos avances científicos impactan su desempeño en aplicaciones de transporte de masa a través de su estructura molecular que hacen tenga un alto potencial de ser utilizadas para procesos de desalinización, producción de agua potable, tratamiento de efluentes industriales y ruseo de agua (Fane, Wang, & Hu, 2015). El objetivo de este proyecto de investigación consistió en desarrollar membranas poliméricas de quitosano o acetato de celulosa. Estas membranas se entrecruzaron con cationes, específicamente con Cu^{+2} . El propósito de la incorporación del catión en la membrana fue modificar la topografía de la superficie y estudiar su impacto como agente biocida. Las membranas se caracterizaron por medio de propiedades de equilibrio (absorción de agua), propiedades termal y propiedades mecánicas. Adicionalmente, se determinó el efecto de la incorporación del catión en el proceso de filtración agua y su capacidad biocida ante enterobacterias como *E. coli*.

Se realizó un diseño de experimentos donde el error experimental se eliminará por medio de la aleatorización de las muestras. El diseño unifactorial consistió en la evaluación del efecto del catión en el proceso de filtración y efecto biocida con 10 repeticiones para cada una de las muestras. Las hipótesis serán evaluadas con un nivel de confiabilidad será del 95%. Las hipótesis nulas serán rechazadas si el valor de p asociado al resultado observado es igual o menor que el nivel de significancia ($p \leq 0.05$). El impacto de este proyecto consistió en desarrollar una membrana polimérica que tenga la capacidad de poder eliminar del agua enterobacterias dañinas para el ser humano, con el potencial de ser utilizada en comunidades con limitado acceso a agua potable en Guatemala.

5. Planteamiento del problema

Guatemala es un país que cuenta con grandes recursos hídricos (Cobos & Tabora, 2015). Garantizar la potabilización del agua es un proceso tecnológico de mejora continua. A pesar de que Guatemala cuenta con gran cantidad de riqueza hídrica, la falta de una legislación efectiva en contra de la contaminación de las fuentes hídricas en el país conlleva a una disminución en la disponibilidad de agua potable. Lo que incrementa la posibilidad de obtener enfermedades inducidas por agentes patógenos que pueden provocar la muerte, sobre todo en aquella población que es más vulnerable (Cobos & Tabora, 2015; Elías, 2015).

Las membranas han dominado los procesos de purificación de agua debido a su bajo costo y alta eficiencia. Comparado con otros tipos de membranas, las membranas poliméricas lideran los procesos de separación en la industria porque son económicas y prácticas para su uso. Sin embargo, aspectos químicos, mecánicos y termales restringe su aplicación (Madaeni, Ghaemi, & Rajabi, 2015). Algunas membranas poliméricas han sido obtenidas a partir de la técnica llamada *solvent casting*. Esta técnica se ha utilizado en diferentes investigaciones para obtener membranas poliméricas con una nanoestructura que favorece el transporte a través de ella (Avilés-Barreto & Suleiman, 2013, 2015; Guerrero-Gutiérrez, Pérez-Pérez, & Suleiman, 2015). Membranas poliméricas elaboradas a partir de celulosa se han utilizado como filtros de agua para la retención de virus. Modificaciones en la estructura de la membrana se realizaron al incorporar cobre. Estas modificaciones mejoraron sus propiedades de retención (Szekeres et al., 2018). El uso de cobre también se ha utilizado como un agente antibacteriano (Das & Patra, 2017) y antifúngico (Quaranta et al., 2011). Otros estudios han utilizado membranas de celulosa, pero han añadido nanopartículas de plata para remover enterobacterias del agua. Este tipo de membrana demostró su capacidad antibacterial durante el proceso de filtrado de agua (Praveena, Han, Than, & Aris, 2016). Otro material utilizado para la generación de membranas para el tratamiento de agua es quitosano. Membranas de quitosano y policaprolactona mostraron alta efectividad para reducir la bacteria *Staphylococcus aureus* presente en el agua (Cooper, Oldinski, Ma, Bryers, & Zhang, 2013). La incorporación de biocidas en la superficie de la membrana provee una estrategia efectiva en la modificación superficial de la membrana, que a su vez provee alta efectividad en contra enterobacterias (Qi, Liu, Wang, & Hu, 2018).

El proyecto busca elaborar una membrana a partir de acetato de celulosa o quitosano que se entrecrucen con Cu^{+2} . La incorporación del catión busca mejorar las propiedades biocidas, como las propiedades termales de la membrana. Estudios demuestran que la incorporación de cationes a la membrana incrementa su estabilidad termal, cambian la cantidad de agua absorbida, su capacidad de intercambio iónico (Guerrero-Gutiérrez & Suleiman, 2013; Pérez-Pérez & Suleiman, 2015) y sus propiedades mecánicas (Suleiman et al., 2014). El objetivo de esta investigación fue elaborar una membrana polimérica que contenga en su superficie biocidas que solucione la obtención de agua potable en Guatemala a un bajo costo.

6. Preguntas de investigación

6.1. General

¿Es posible obtener membranas entrecruzadas con Ag^{+1} o Cu^{+2} que puedan utilizarse en el proceso de filtración de enterobacterias contenidas en agua y a su vez posean actividad biocida?

6.2. Específicas

- ¿Las membranas elaboradas tiene la capacidad de retener dentro de su estructura enterobacterias como *E. coli*?
- ¿Las membranas elaboradas poseen un efecto biocida ante enterobacterias como *E. coli*?
- ¿La topografía de las membranas cambia con la adición de cationes como Cu^{+2} ?
- ¿El módulo de G^* incrementa al entrecruzar la membrana con Cu^{+2} ?
- ¿El patrón de degradación termal cambia con la incorporación de Cu^{+2} ?
- ¿El efecto biocida de las membranas se incrementa con la adición de Cu^{+2} ?
- ¿Se podrá obtener agua filtrada sin presencia de enterobacterias como *E. coli*?
- ¿La absorción de agua de las membranas disminuye por el entrecruzamiento con Cu^{+2} ?

7. Delimitación en tiempo y espacio

Duración del proyecto: 12 meses. Fecha de inicio: 3 de febrero 2020. Fecha de finalización: 26 de febrero 2021.

Tabla 1

Delimitación en tiempo y espacio del proyecto

No.	Espacios	Actividades	Tiempo (meses)
1	Unidad de Bioensayos, Departamento de Citohistología, Facultad	Elaboración de las membranas	3

	de Ciencias Químicas y Farmacia	Determinación de propiedades de equilibrio (absorción y solubilidad en agua)	
2	Unidad de Bioensayos, Departamento de Citohistología, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia	Elaboración de pruebas de filtración de agua y evaluación de presencia de enterobacterias.	4
3	<i>Material Characterization Center</i>	Determinación del efecto biocida de las membranas. Determinación de propiedades químicas y termales Determinación de propiedades mecánicas Microscopía óptica	3
4	Facultad de Ingeniería - Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia	Elaboración de informe final del proyecto	1
5	Facultad de Ingeniería - Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia	Divulgación de la información	1

La elaboración de las membranas y determinación de las propiedades de equilibrio, los experimentos de filtración y efecto biocida se realizaron en la Unidad de Bioensayos, en el Departamento de Citohistología, Escuela de Química Biológica (edificio T11 segundo nivel, USAC zona 12 Ciudad de Guatemala). Los análisis de TGA, FTIR, DMA y microscopía óptica se realizaron en el *Material Characterization Center*, Añasco, Puerto Rico.

8. Marco teórico

8.1. Tecnología de membranas para el tratamiento de aguas

Una membrana permite la separación de los componentes que se encuentren en el agua. Para este proceso, la membrana permite el rechazar o permitir el paso de contaminantes a través de ella. Las propiedades que se buscan en el desarrollo de nuevas membranas para el tratamiento de agua son: alta resistencia mecánica, su selectividad y su eficiencia (Judd, 2003).

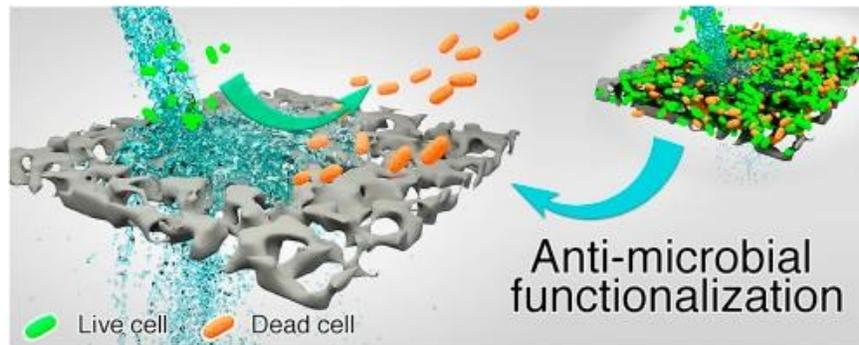


Ilustración 1. Esquema de membrana utilizada para aplicaciones de tratamiento de agua. “Polymeric antimicrobial membranes enabled by nanomaterials for water treatment”, por J. Zhu, J. Hou, Y. Zhang, M. Tian, T. He, J. Liu & V. Chen, 2018, *Journal of Membrane Science*, 550, pp. 173-19. Copyright 2018 de JMS.

8.2. Entrecruzamiento de polímeros

El entrecruzamiento en polímeros consiste en unir un enlace covalente o iónico que une un polímero a otro, por lo tanto, las cadenas de polímero se encuentran enlazadas. El entrecruzamiento provee estabilización al polímero que mejoran sus propiedades de térmicas y mecánicas (Montazer & Harifi, 2018).

8.3. Quitosano

El quitosano es un amino polisacárido que posee una estructura química conformada por cadenas lineales de polimerización con una alta densidad de carga, posee grupos hidroxilo y amino que poseen alta reactividad. Este compuesto muestra excelente biocompatibilidad, estabilidad física y procesabilidad (Islam, Bhuiyan, & Islam, 2017).

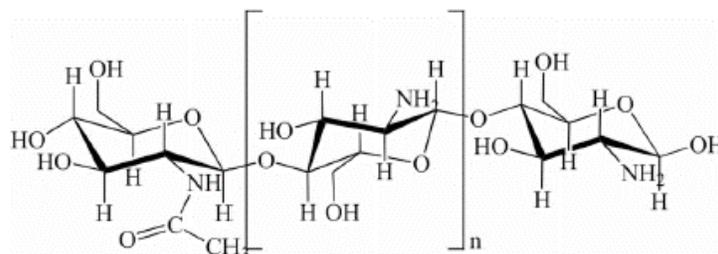


Ilustración 2. Estructura química del quitosano. “Chitin and Chitosan: Structure, Properties and Applications in Biomedical Engineering”, por S. Islam, M. A. Rahman Bhuiyan, & M. N. Islam, 2016, *Journal of Polymers and the Environment* 25, pp. 854-866. Copyright 2016 de JPE.

8.4. Acetato de celulosa

El acetato de celulosa es un plástico biodegradable. Un plástico biodegradable está compuesto de materiales que pueden ser metabolizados por microorganismos que se encuentran en el medio ambiente. El acetato de celulosa es usado como una película en fotografía, como un componente en adhesivos y como material para los marcos de los espejuelos. También es utilizada como fibra sintética, la manufacturación de cigarrillos y películas de rayos X (McKeen & McKeen, 2012).

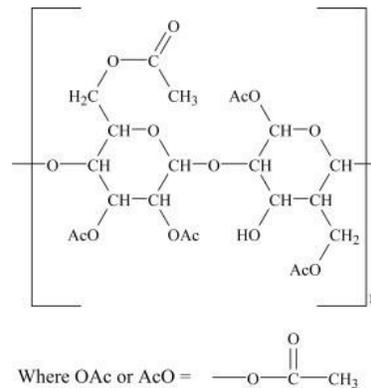


Ilustración 3. Estructura química del acetato de celulosa. “*Renewable Resource and Biodegradable Polymers*”, por L. McKeen, 2012, *Film Properties of Plastics and Elastomers*, pp. 287-304. Copyright 2012 de JPPE.

8.5. Enterobacterias

Las enterobacterias son un género de bacterias gramnegativas, anaeróbicas facultativas, con forma de bastón, que no forman esporas, que pertenecen a la familia Enterobacteriaceae (Davin-Regli & Pagès, 2015). Este tipo de bacterias son generalmente encontradas en el agua que producen enfermedades a los seres humanos (Cabral, 2010).

Se han descrito alrededor de unos 50 géneros que incluyen cientos de especies y subespecies, las cuales se clasifican en base a sus propiedades bioquímicas, antigénicas y su genoma. A pesar de ser un grupo tan grande y diverso, son pocas las relacionadas a patologías en humanos (Murray, Rosenthal & Pfaller, 2015).

Algunas de ellas pueden encontrarse en pequeñas cantidades como parte del tracto respiratorio superior y el aparato urogenital (Brooks et al., 2020). Las especies más comunes con significancia clínica son:

- *Citrobacter freundii*

- *C. koseri*
- *Enterobacter aerogenes*
- *E. cloacae*
- *Escherichia coli*
- *Klebsiella pneumoniae*
- *K. oxytoca*
- *Morganella morganii*
- *Proteus mirabilis*
- *Salmonella enterica*
- *Serratia marcescens*
- *Shigella sonnei*
- *S. flexneri*
- *Yersinia pestis*
- *Y. enterocolitica*

Los factores de virulencia que se asocian con frecuencia a la mayoría de las especies patógenas de enterobacterias son: la endotoxina bacteriana, cápsula, la capacidad de variación de fase antigénica, los sistemas de secreción de tipo III, la capacidad del secuestro de factores de crecimiento, la resistencia al efecto bactericida del suero y la resistencia antimicrobiana (Murray, Rosenthal & Pfaller, 2016)

8.6. Coliformes fecales

Los coliformes fecales son un grupo de bacterias fermentadores de lactosa que pueden crecer a temperatura de 45°C. En este grupo se incluye al género *Escherichia*, *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*. La Organización Mundial de la Salud los ha nombrado también como Coliformes termorresistentes y son utilizados como indicadores de la presencia de otros microorganismos entéricos (CDC, 2021).

8.7. *Escherichia coli*

Es una bacteria Gram negativa, anaerobio facultativo, oxidasa negativa, considerada un indicador de contaminación fecal en agua y alimentos por ser parte del microbiota mixto normal del tracto gastrointestinal de diferentes mamíferos. Puede producir infecciones endógenas (cuando prolifera en áreas estériles), considerándose patógenos oportunistas e infecciones exógenas como contaminante de agua, alimentos o heridas (Murray, Rosenthal & Pfaller, 2016).

Las patologías relacionadas a esta especie son infecciones del tracto urinario, gastroenteritis y sepsis; siendo las serovariedades *E. coli* enteroinvasiva (ECEI), *E. coli* enterotoxigénica (ECET), *E. coli* enteroagregativa (ECEA) y *E. coli* enterohemorrágica (ECEH) las relacionadas a los

cuadros intestinales. La ECEI y ECEH pueden producir cuadros graves de disentería (Murray, Rosenthal & Pfaller, 2016).

8.8. Agua para el consumo humano

La presencia de bacterias coliformes en agua para el consumo humano es muy frecuente, ya que diariamente el ser humano elimina grandes cantidades de estas bacterias que pueden llegar a contaminar las fuentes de agua, por lo que es necesario realizar control microbiológico del agua que llega a las poblaciones. Las normas regulatorias indican que el agua para el consumo humano no debe contener *E. coli*, el agua para uso doméstico tendrá un valor entre 100 y 2000 UFC en 100 mL (Kayser, Bienz, Eckert, & Zinkernagel, 2004).

Para obtener estos valores se realiza un análisis de agua por diferentes metodologías como la filtración por membrana o la técnica de número más probable, siendo ésta última únicamente un estimado estadístico (no un recuento real) de la cantidad de bacterias presentes en una muestra de agua.

9. Estado del arte

Aunque el uso de tecnológico de membranas en el tratamiento de aguas se encuentra ya establecido, es necesario desarrollar día con día nuevos avances tecnológicos en el tema. Existen diferentes áreas de oportunidad en el desarrollo de membranas respecto a mejorar propiedades termales, mecánicas y de desempeño (Judd, 2003). Adicionalmente, se desea optimizar las propiedades de separación, disminuir la cantidad de energía requerida para su uso y reducir su costo (Madaeni, Ghaemi, & Rajabi, 2015). Este proyecto pretende desarrollar una membrana de quitosano y modificar químicamente una membrana comercial de una mezcla de acetato de celulosa. Estos dos compuestos permitirán establecer una relación entre la química del polímero utilizado y su efecto en el proceso de filtrado y capacidad biocida. Las membranas se entrecruzaron con un agente biocidas como es Cu^{+2} . Este catión exhibe capacidad antimicrobial contra enterobacterias (Das & Patra, 2017; Qi, Liu, Wang, & Hu, 2018).

La parte innovadora del proyecto es identificar el efecto del catión en la membrana sobre el proceso de filtración de *E. coli* y su efecto biocida. Se analizará el efecto producido por el catión, y se correlacionarán con los cambios estructurales de la membrana. El proyecto pretende proveer una solución a una problemática nacional, el cual consiste el suministrar agua potable a los ciudadanos que posean limitado acceso a fuentes de agua aptas para su consumo.

10. Objetivo general

Desarrollar membranas entrecruzadas con Ag^{+1} o Cu^{+2} para procesos de filtración de agua y posean efecto biocida.

10.1. Objetivos específicos

- Obtener una membrana de acetato de celulosa entrecruzada con Ag^{+1} o Cu^{+2} .
- Realizar un análisis de la superficie de las membranas entrecruzada con Ag^{+1} o Cu^{+2} utilizando un microscopio digital a una magnificación de 3000X.
- Determinar las propiedades de equilibrio (absorción de agua e intercambio iónico), mecánicas y termales de las membranas entrecruzada con Ag^{+1} o Cu^{+2} .
- Determinar la capacidad de retención y el efecto biocida de las membranas entrecruzada con Ag^{+1} o Cu^{+2} ante enterobacterias como *E. coli*.
- Cuantificar la cantidad enterobacterias como *E. coli*, en el agua posterior al proceso de filtrado.

11. Hipótesis

11.1. Hipótesis de Investigación

- H1. La incorporación de los cationes cambia la topografía superficial de la membrana.
- H2. La incorporación de los cationes a la membrana tiene un efecto en la cantidad de agua absorbida
- H3. El intercambio iónico de la membrana disminuye con la incorporación de los cationes.
- H4. El módulo mecánico aumenta con el entrecruzamiento con Cu^{+2} .
- H5. Las propiedades termales cambian con la incorporación del catión.
- H6. La membrana posee capacidad biocida ante *E. coli*.
- H7. La capacidad de retención de enterobacterias aumenta con la incorporación del catión.
- H8. La cantidad de enterobacterias en el agua se reduce luego del proceso de filtración.

11.2. Hipótesis nula

- H1. La incorporación de los cationes no cambia la topografía superficial de la membrana.
- H2. La incorporación de los cationes a la membrana no tiene un efecto en la cantidad de agua absorbida
- H3. El intercambio iónico de la membrana no presenta cambios con la incorporación de los cationes.
- H4. El módulo mecánico no exhibe diferencias con el entrecruzamiento con Ag^{+1} o Cu^{+2} .

- H5. Las propiedades termales cambian con la incorporación del catión.
- H6. La membrana no posee capacidad biocida ante *E. coli*
- H7. La capacidad de retención de enterobacterias no aumenta con la incorporación del catión.
- H8. La cantidad de enterobacterias en el agua no exhibe cambios luego del proceso de filtración.

12. Materiales y métodos

12.1. Materiales

Las membranas de acetato celulosa/nitro celulosa (celulosa) se adquirieron de Merck Chemicals (MF-Millipore 0.45 μm MCE Membrane), sulfato de cobre (CuSO_4) (Sigma Chemical CO, 99%), agar tripticasa soya (TS) (Merck Chemicals), ácido acético glacial (Merck Chemicals, 100%), fenolftaleína en polvo (Kosmos Hassler), ácido clorhídrico (Aldrich Chemical, 37%), polvo tampón PBS (Immuno Concepts), glicerina (Sigma Chemical), cloruro de sodio (Merck, JT Baker), quitosano (Bio Basic Canada Inc), hidróxido de sodio en pellets (EMPLURA® Merck Chemicals, pureza $\geq 97.0\%$). Todos los productos químicos se utilizaron tal como fueron recibidos.

12.2. Métodos

12.2.1. Preparación de la membrana

12.2.1.1. Elaboración de la membrana de quitosano

La preparación de la membrana de quitosano consistió en disolver 5 g de quitosano en 400 g de una solución acuosa de 25 %p/p de ácido acético glacial (Geng et al., 2005). La mezcla se mantuvo en agitación constante durante 24 h. Finalizado este proceso, se agregó 25 %p/p glicerina y se agitó durante 30 min. Luego se colocó la solución en platos de Petri y se dejó evaporar el solvente durante 3 semanas a temperatura ambiente.

12.2.1.2. Entrecruzamiento de membranas con Cu^{+2}

Las membranas se sumergieron en 10 ml de una solución 1M CuSO_4 a temperatura ambiente durante 24 h. Terminado este periodo se eliminó el exceso de la solución por medio de lavados con agua desmineralizada hasta que el pH del agua de lavado fuera 7. Luego se procedió a secarlas a 50°C durante 24 h (Shen et al., 2017).

12.3. Caracterización de la membrana

12.3.1. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

La espectroscopia infrarroja utiliza la energía vibracional para caracterizar compuestos orgánicos. Una celda de reflectancia total atenuada (ATR) con el FT-IR (ATR Nicolet™ IS™ 10) se utilizó para analizar la posición e intensidades de los grupos característicos de cada una de las membranas antes y luego de ser entrecruzadas con Cu⁺². Las membranas se colocaron sobre un ATR de diamante, luego el espectro infrarrojo se colectó utilizando 132 escaneos con una resolución de 4 cm⁻¹, una velocidad óptica de 0.4747 en un rango de 600-4000 cm⁻¹.

12.3.2. Absorción de agua

La absorción de agua se midió sumergiendo una muestra 1cm x 1cm (secada previamente a 60°C durante 24 h en un horno) en 10 ml de agua desmineralizada a temperatura ambiente. Se registró el peso de la membrana después de su inmersión en agua a diferentes intervalos de tiempo: 10, 20 y 40 minutos (E.M.A. Guerrero-Gutiérrez et al., 2015). Cada resultado representa el promedio de diez repeticiones, el porcentaje de absorción de agua fue calculado mediante la siguiente ecuación (1):

$$A = \frac{(W_1 - W_2)}{W_2} * 100\% \quad (1)$$

Donde A es el agua absorbida durante un intervalo de tiempo, W1 es el peso de la muestra durante un intervalo de tiempo y W2 es el peso de la muestra seca.

12.3.3. Capacidad de intercambio iónico

La capacidad de intercambio iónico (IEC) se obtuvo sumergiendo la membrana (previamente pesada) en una solución 1.0 M de NaCl durante 24 h. Luego se retiró la membrana y la solución se tituló con una solución 0.01 M de NaOH hasta que el pH fuera neutro. El IEC se calculó a partir de los moles de iones sustituidos divididos por la masa seca inicial de la membrana.

12.3.4. Análisis termogravimétrico (TGA)

La degradación termal y el contenido de ceniza en cada membrana se determinó utilizando un analizador termogravimétrico Mettler Toledo TGA/DSC 3+. En cada experimento se utilizó una muestra con un peso de 5-10 mg. Las temperaturas de degradación fueron determinadas luego de

calentar la muestra de temperatura ambiente hasta 650°C a 10°C/min bajo una atmósfera de inerte de nitrógeno. El contenido de ceniza se determinó calentando la muestra de 650°C hasta 800°C a 10°C/min bajo una atmósfera de aire.

12.3.5. Análisis mecánico dinámico (DMA)

El análisis dinámico mecánico se utilizó para determinar las propiedades mecánicas de las membranas entrecruzadas con Cu^{+2} . El módulo dinámico (E^*) en tensión fue determinado de 25°C a 100°C a 2°C/min y una frecuencia de 1 Hz. Adicionalmente se determinó el módulo dinámico del esfuerzo cortante de 25°C a 100°C a 3°C/min y una frecuencia de 1 Hz utilizando un DMA1 de Mettler Toledo.

12.3.6. Análisis óptico

La superficie de las membranas se observó por medio de un microscopio digital marca Keyence modelo VHX-5000 Digital (Keyence Corporation, Japan) con una magnificación de 500X y 3000X utilizando el lente VHZ500R/ W/T.

12.4. Preparación de solución madre de *E. coli* ATCC

La solución madre se realizó incubando la bacteria *E. coli* ATCC 8739 en un caldo nutritivo de TS a 37°C durante 24 h. La solución madre utilizada se obtuvo por medio de diluciones sucesivas del caldo nutritivo hasta obtener una cantidad de 25 a 250 UFC (Maturin & Peeler, 2020).

12.5. Proceso de filtración de *E. coli* contenido en el agua

El proceso de filtración de *E. coli* contenido en el agua se realizó por medio de un equipo de filtración (MF75™, NALGENE®) y una bomba de vacío (VWR Scientific LR39793). Inicialmente las membranas se esterilizaron bajo luz UV durante 22 min de cada lado. Seguidamente se colocó la membrana en el equipo de filtración, luego el agua con *E. coli* y se inició el proceso de filtrado. Al finalizar este proceso se retiró cuidadosamente la membrana y se colocó sobre una placa con agar TS. Para determinar la eficiencia de la membrana se sembraron 100 μL de la solución madre en agar TS antes y luego de la filtración. Todos los agares se incubaron a 37°C por 24 h. La eficiencia se obtuvo por medio del recuento de UFC contenidas en el agua antes y luego del proceso de filtrado. Los resultados representan el promedio de diez repeticiones (Standard Methods, 2018).

12.6. Capacidad biocida de las membranas

La capacidad biocida de las membranas se determinó por medio de la siembra de la solución madre sobre la superficie de la muestra. Para ello, las membranas se cortaron en forma circular con un diámetro de 14 mm esterilizándose bajo luz UV durante 22 minutos de cada lado. Luego, se agregaron 50 μL de la solución madre sobre la superficie de cada muestra incubándose a 37°C durante 4 h. Finalizado este periodo, las membranas se sumergieron en 1 ml de solución salina tamponada con fosfato (PBS) colocándose sobre un agitador (IUCHI, AC100V50/60Hz) a 92 rpm durante 10 min. Finalizado este tiempo, se extrajeron 50 μL de la solución de PBS y se sembraron en agar TS incubándose a 37°C por 24 h. Por último, se procedió a realizar el recuento de UFC. Adicionalmente, se realizó un control bajo las mismas condiciones con la diferencia que se eliminó el uso de membrana y se realizó una siembra directa de 50 μL de la solución madre. Los resultados representan el promedio de diez repeticiones (Zhuang et al., 2020).

12.7. Procesamiento y análisis de la información

Se llevó a cabo un diseño de experimentos unifactorial. El factor analizado fue el efecto del catión sobre el proceso de filtración y la capacidad biocida. Se realizaron 5 repeticiones para cada una de las muestras dando un total de 10 unidades experimentales. Las muestras se corrieron en orden aleatorio; adicionalmente, las hipótesis fueron evaluadas con un nivel de confiabilidad será del 95%. Las hipótesis nulas se rechazaron si el valor de p asociado al resultado observado es igual o menor que el nivel de significación ($p \leq 0.05$).

13. Vinculación, difusión y divulgación

Parte de la caracterización de la membrana se llevó a cabo en las instalaciones del *Material Characterization Center*, Añasco, Puerto Rico. Este centro de investigación se especializa en el análisis de materiales poliméricos. Cuentan con los equipos y la metodología estandarizada para realizar las pruebas termales y mecánicas de las membranas.

Resultados preliminares del proyecto fueron expuestos en el II Encuentro Científico del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas (IIQB) de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC. Se presentó un poster en la modalidad de galería científica e-poster. Además, los resultados obtenidos de esta investigación se difundirán en congresos nacionales, como lo es el Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Química.

Adicionalmente, estos resultados se divulgarán en el curso de Separación por medio de Membranas Selectivas de la escuela de Ingeniería Química, USAC y en el curso de Seminario de

Investigación de la misma escuela para que conozcan sobre los resultados de esta investigación. Del mismo modo se darán a conocer los resultados en el curso de Microbiología de la escuela de Ingeniería Química y de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Además, se someterá un manuscrito con los resultados a la revista Ciencia, Tecnología y Salud.

14. Productos, hallazgos, conocimientos o resultados

14.1. Preparación de la membrana

La figura 1 nos muestra las membranas de quitosano antes y luego entrecruzarse con Cu^{+2} . Esta figura indica que la incorporación del catión a la membrana quitosano produce un cambio de color amarillo (figura 1[A]) a un color turquesa (figura 1[B]). Las membranas de celulosa no presentaron un cambio notorio perceptible al ojo humano.

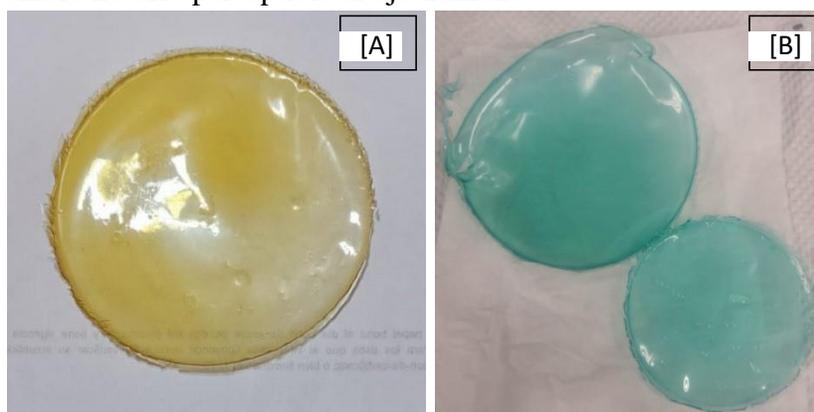


Figura 1. Membrana de quitosano [A] y quitosano- Cu^{+2} [B]

14.2. Caracterización de la membrana

14.2.1. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (ATR-FTIR)

El espectro en infrarrojo fue obtenido para todas las muestras con el objetivo de evaluar el efecto de la incorporación de Cu^{+2} en las membranas. La Figura 2 exhibe el espectro de la membrana de celulosa, el cual presenta las bandas características asociadas a este biopolímero. El agua contenida en la membrana se observa a 3500 cm^{-1} inducido por el grupo O-H. Adicionalmente, se encuentran los picos característicos al grupo C=O y C-H a $1744, 2994\text{ cm}^{-1}$ respectivamente. Finalmente, se encuentran los picos característicos que corresponden a las vibraciones de estiramiento simétricas y asimétricas de los grupos C-O y C-O-C a $1151-897\text{ cm}^{-1}$. La membrana de celulosa- Cu^{+2} exhibe los mismos picos que la membrana de celulosa; sin embargo, presenta algunas diferencias, específicamente en la intensidad y forma de los picos a 2994 y el rango $1151-897\text{ cm}^{-1}$.

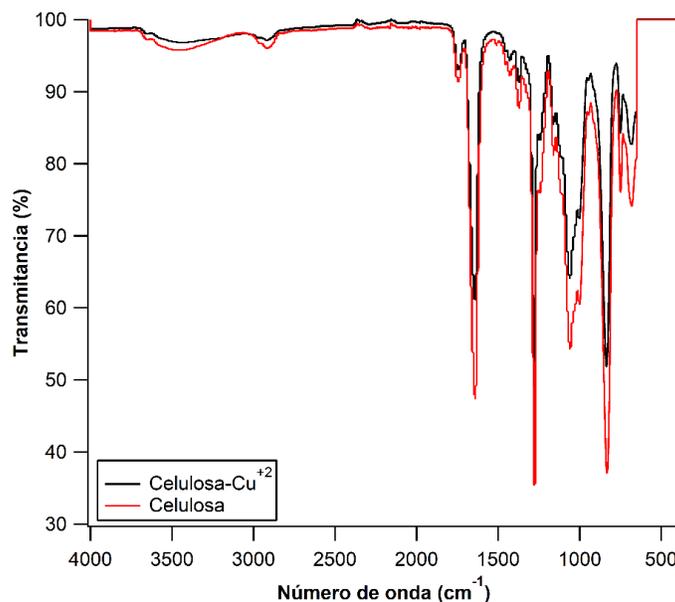


Figura 2. FTIR de la membrana de celulosa y celulosa-Cu⁺²

La caracterización química de las membranas de quitosano se realizó por medio de un ATR-FTIR. La Figura 3 muestra el espectro para las membranas quitosano y quitosano-Cu⁺². El espectro de quitosano muestra seis picos característicos; el primero es un pico ancho que corresponde al grupo O-H a 3230 cm⁻¹ que se sobrepone sobre al pico correspondiente al grupo N-H a 3328 cm⁻¹. Seguidamente, se encuentran el pico correspondiente al grupo C-H a 2872 cm⁻¹. Adicionalmente, existen tres grupos amida que se identificaron a 1644 cm⁻¹, 1569 cm⁻¹ y 1400 cm⁻¹ que corresponden al estiramiento del grupo C = O (amida I), a la flexión del grupo N-H (amida II) y al estiramiento del grupo C-N, respectivamente. Finalmente, se encuentran los picos característicos que corresponden a las vibraciones de estiramiento simétricas y asimétricas de los grupos C-O y C-O-C a 1151-897 cm⁻¹. La adición de Cu⁺² de modificó el espectro de la membrana de quitosano (Figura 3). Este catión modifica el número de onda de los picos característicos de la flexión del grupo N-H (amida II) y al estiramiento del grupo C-N (amida III) (1569 cm⁻¹ y 1400 cm⁻¹). Además, aparece un pico adicional en la región 1151-897 cm⁻¹ (grupos C-O y C-O-C).

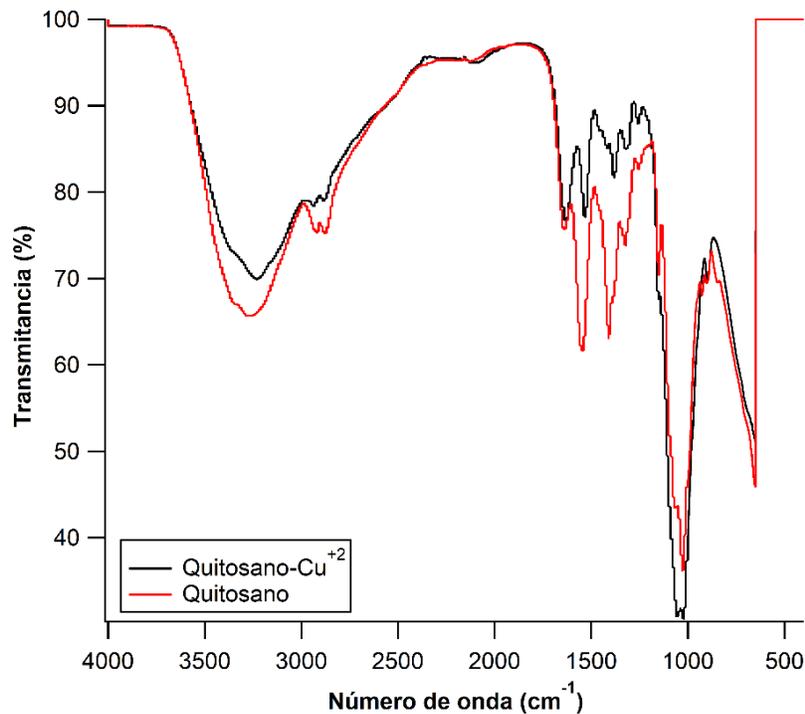


Figura 3. FTIR de la membrana de quitosano y quitosano-Cu⁺²

14.2.2. Propiedades de equilibrio

14.2.2.1. Absorción de agua y capacidad de intercambio iónico

La figura 4 muestra la capacidad de absorción de agua de las membranas. La Figura 4[A] muestra el porcentaje de absorción de agua en función del tiempo. Estos resultados muestran que las membranas alcanzan el equilibrio luego de 20 minutos sumergidas en agua. Las membranas de quitosano, celulosa y celulosa-Cu⁺² no mostraron una diferencia significativa en la cantidad absorbida de agua, alcanzando un máximo de absorción de 620%. La membrana de quitosano-Cu⁺² exhibió la mayor reducción en la cantidad absorbida de agua a los 40 min (Figura 4[B]). La incorporación del catión a la membrana de quitosano redujo un 91% la cantidad absorbida de agua, mostrando una diferencia significativa.

La figura 5 nos muestra la capacidad de intercambio iónico de las membranas de celulosa. Estos resultados muestran que la capacidad de intercambio iónico de la membrana de celulosa es de 0.15 mmol g⁻¹. Sin embargo, este valor se redujo 85% con la incorporación del catión.

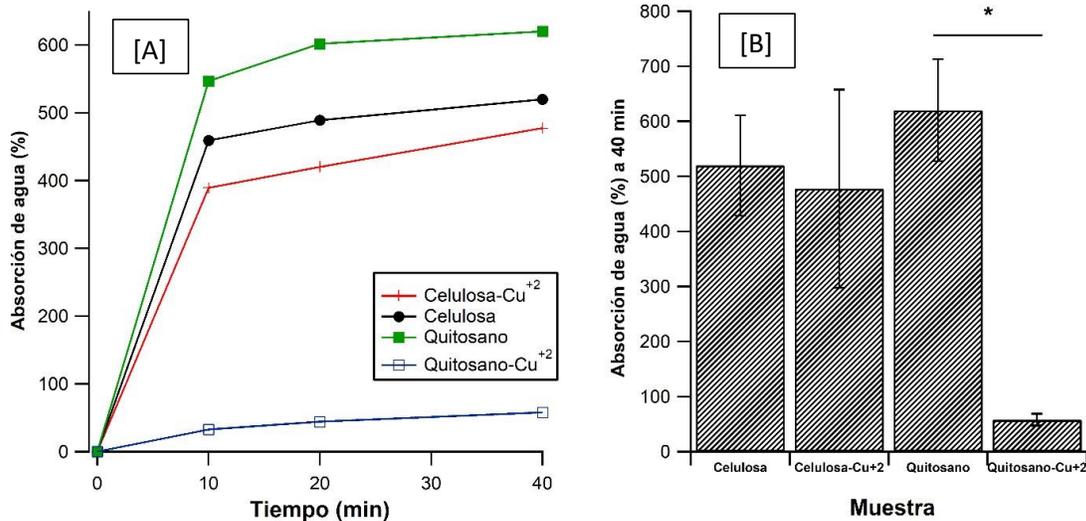


Figura 4. Propiedades de equilibrio de las membranas: absorción de agua

Nota. El * representa diferencia significativa entre las muestras ($p \leq 0.05$)

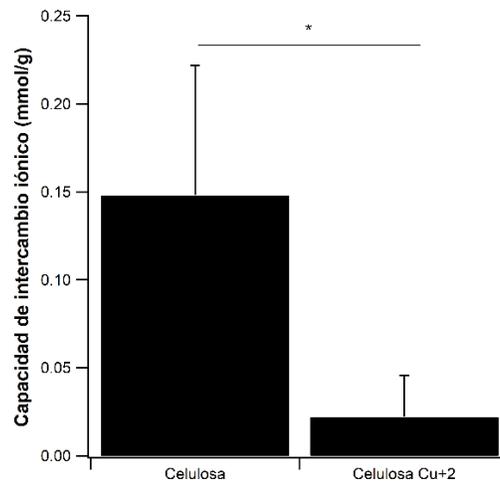


Figura 5. Capacidad de intercambio iónico

Nota. El * representa diferencia significativa entre las muestras ($p < 0.05$)

14.2.3. Propiedades termales

El proceso de degradación de las membranas se obtuvo por medio de un análisis termogravimétrico. La figura 6 muestra el proceso de degradación de las membranas de celulosa y celulosa-Cu⁺². Estos resultados muestran que la membrana de celulosa posee tres etapas de degradación (Figura 6[A]). La primera ocurrió a los 200°C con una pérdida en peso de 84%. La segunda etapa de degradación se presentó en el rango de temperatura de 200-400°C con una pérdida de peso adicional del 8%. La última etapa de degradación ocurrió 400-550°C con una pérdida de

peso adicional del 3%. Además, el contenido de ceniza de la membrana fue de 5%. La incorporación del catión a la membrana modificó el patrón de degradación: solamente presentó dos etapas degradación y aumentó la cantidad de ceniza. La membrana de celulosa-Cu⁺² presentó su primera etapa de degradación a los 200°C; sin embargo, la pérdida por peso se redujo un 5% en comparación con la membrana de celulosa. La segunda etapa de degradación se produjo en el rango de temperatura de 200-600°C con una pérdida de peso adicional del 3%. El contenido de ceniza aumentó de 5% a un 21%. La figura 6[B] muestra el comportamiento la absorción de calor de la muestra en función de la temperatura. A 200°C se presenta un pico exotérmico para ambas membranas. La membrana de celulosa presenta un pico adicional a los 515°C, el cual confirma la temperatura a la cual se produce la mayor rapidez de degradación en 400-550°C. Sin embargo, la membrana de celulosa-Cu⁺² presentó dicha transición a un rango de temperatura menor (350-425°C), lo cual confirma la segunda etapa de degradación para esta membrana.

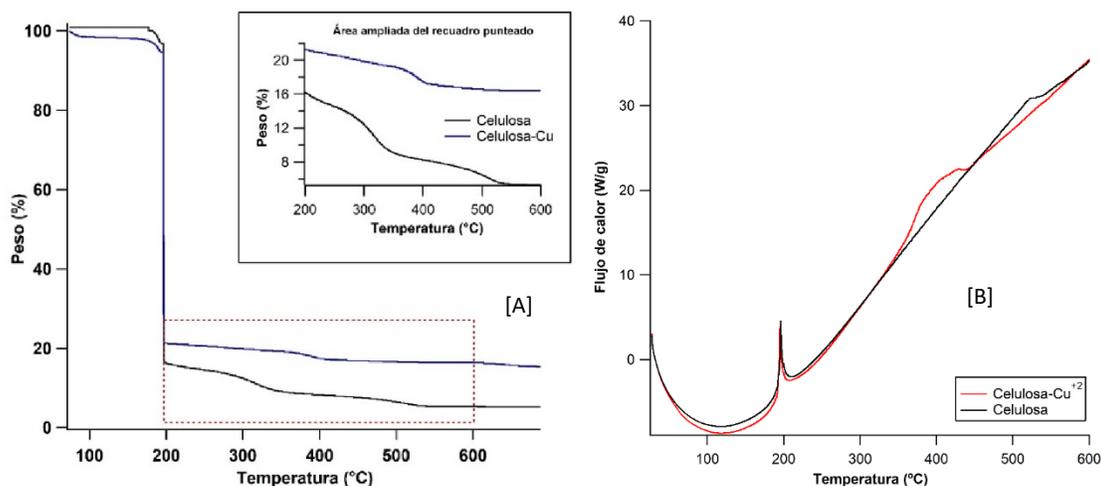


Figura 6. Propiedades termales: proceso de degradación de la membrana de celulosa y celulosa-Cu⁺²

La figura 7 muestra el proceso de degradación de las membranas de quitosano y quitosano-Cu⁺². Estos resultados muestran que la membrana de quitosano posee tres etapas de degradación (Figura 6[A]). La degradación inicial ocurrió alrededor de 30-100°C con una pérdida de peso del 10%. La segunda degradación ocurrió en el rango de 140-240°C donde la máxima degradación fue observada a 175°C con una pérdida en peso adicional de 11%. La tercera degradación ocurrió en el rango de 240-400°C. Esta etapa obtuvo la máxima degradación a los 288°C con una pérdida en peso de 30%. La muestra se calentó hasta los 600°C donde obtuvo una pérdida adicional de 10% en peso. A partir de esta temperatura la muestra se oxidó calentándose bajo una atmósfera de aire donde la cantidad de ceniza obtenida fue del 14.6%. La membrana de quitosano-Cu⁺² exhibió un comportamiento termal diferente a la membrana de quitosano; solamente la primera etapa de degradación permaneció en el mismo rango de temperatura. La segunda etapa de degradación

empezó a los 130°C, pero al calentarse a los 200°C se alcanzó un cambio abrupto en la pérdida en peso, alcanzando una pérdida de 26%. La tercera etapa se presentó en el rango de 250-300°C donde la máxima degradación ocurrió a 275°C con un 12% en pérdida en peso. La adición del catión indujo una cuarta etapa en la degradación de quitosano-Cu⁺² que ocurrió en el rango 300-600°C. Además, la máxima degradación ocurrió a los 515°C y esta etapa presentó el mayor porcentaje en pérdida de peso (39%) de esta membrana. Adicionalmente, el contenido de ceniza incrementó un 16.44% en comparación con la membrana sin cobre. La figura 7[B] muestra el flujo de calor de las membranas quitosano en función de la temperatura. La muestra de quitosano muestra solamente el pico exotérmico del proceso de oxidación con aire a los 650°C; sin embargo, la membrana con cobre muestra la transición termal a los 515°C que confirma la presencia de la cuarta etapa de degradación de esta membrana.

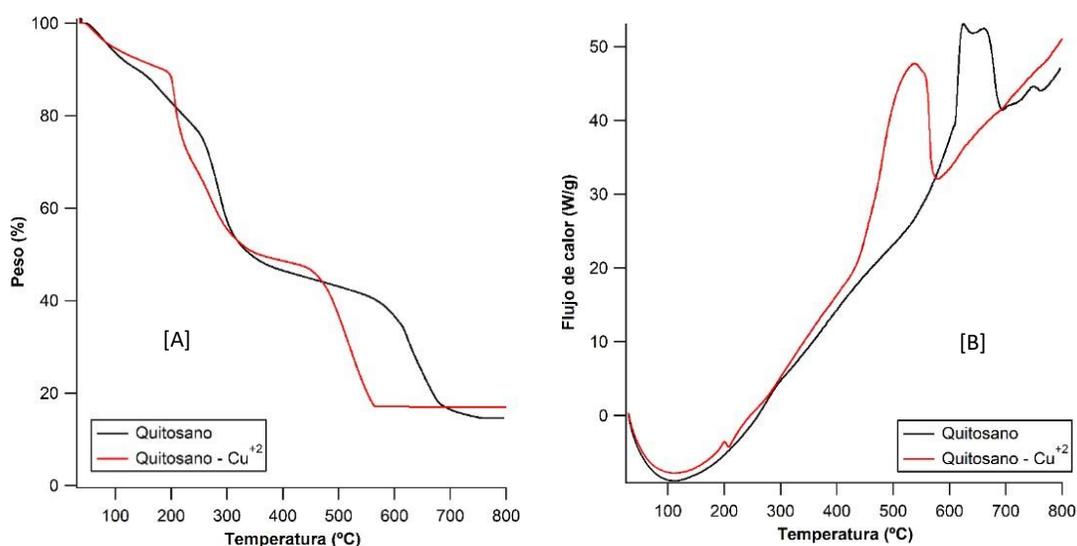


Figura 7. Proceso de degradación de la membrana de quitosano y quitosano-Cu⁺²

14.2.4. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la membrana se obtuvieron por medio del DMA en modo de tensión y de esfuerzo cortante. La Tabla 2 muestra el módulo complejo (E^*) en modo tensión de la membrana de celulosa a 30°C. El módulo E^* de la membrana de celulosa fue de 39.74 MPa; sin embargo, la incorporación de Cu⁺² a la membrana indujo un incremento en el módulo de 190%. Adicionalmente, se determinó el módulo E^* en modo de esfuerzo cortante en función de la temperatura (Figura 8). Estos resultados muestran que el módulo E^* decrece linealmente en función de la temperatura para ambas muestras. Sin embargo, el módulo de la membrana celulosa - Cu⁺²

fue 33.60% mayor que la membrana de celulosa (1.22 MPa) a 30°C. A temperaturas mayores de 90°C ambas membranas presentaron valores similares en el módulo en modo de esfuerzo cortante.

Tabla 2

Determinación de las propiedades mecánicas en tensión de la membrana de celulosa a 30°C

Muestra	E* (MPa)	DS
Celulosa	39.74	1.90
Celulosa - Cu ⁺²	115.28	66.33

Nota. DS es la desviación estándar del promedio para cada muestra.

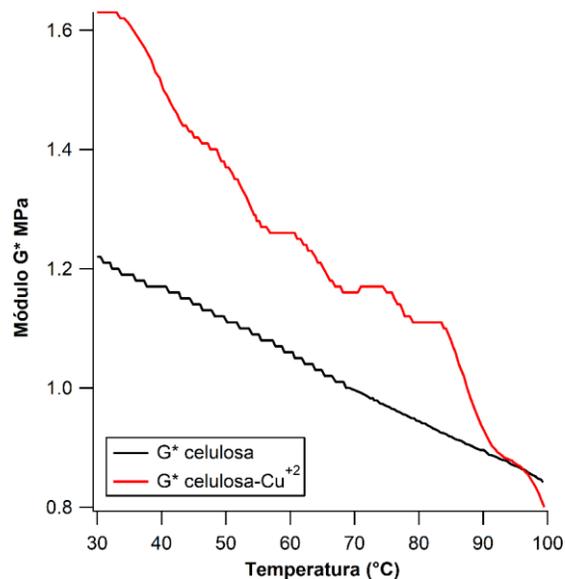


Figura 8. Propiedades mecánicas de las membranas

14.2.5. Análisis de la superficie

Los cambios en la superficie de la membrana inducidos por la incorporación de Cu⁺² se observaron por medio de un microscopio óptico Keyence VHX-5000. La Figura 9[A] y 9[B] muestra la superficie de la membrana de celulosa y celulosa-Cu⁺² a 500X, respectivamente. La superficie de la membrana de celulosa presenta una superficie lisa sin una porosidad apreciable; sin embargo, la incorporación del catión a la membrana modificó su superficie. Al incrementar la magnificación del lente a 3000X (figura 9[C]) se observó que esta superficie presentaba cambios en su porosidad. Adicionalmente, esta figura muestra posibles cambios en la rugosidad debido a los cambios topográficos superficiales visualizados. Estudios adicionales deben realizarse para confirmar estos cambios relacionados a la rugosidad de la muestra.

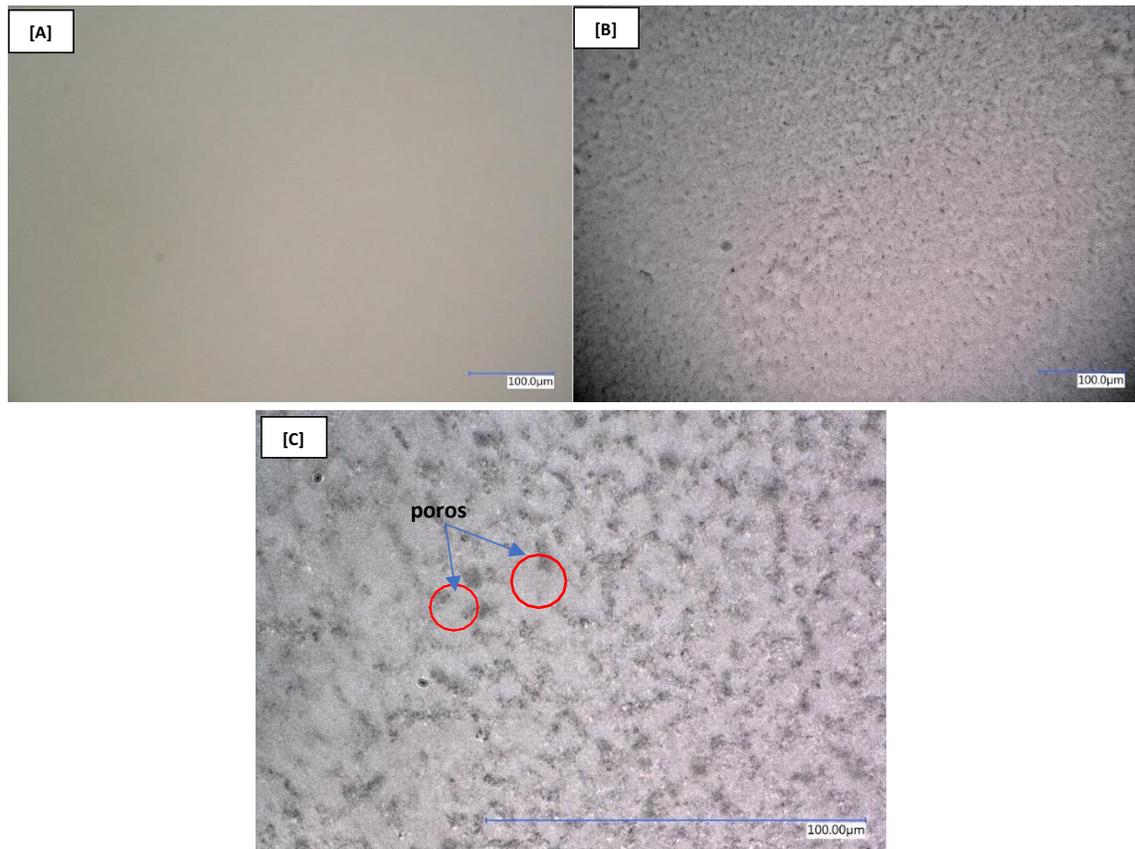


Figura 9. Imagen de la superficie de la membrana de celulosa [A] y celulosa-Cu⁺² [B] a 500X. Magnificación de la membrana celulosa-Cu⁺² a 3000X [C]

La Figura 10[A] y 10[B] muestra la superficie de la membrana de quitosano y quitosano-Cu⁺² a 500X, respectivamente. Esta imagen indica que la membrana de quitosano presenta una superficie lisa sin una porosidad aparente. La membrana de quitosano-Cu⁺² presenta una superficie similar, solamente cambió el color. Estos resultados confirman los resultados presentados con la figura 1.

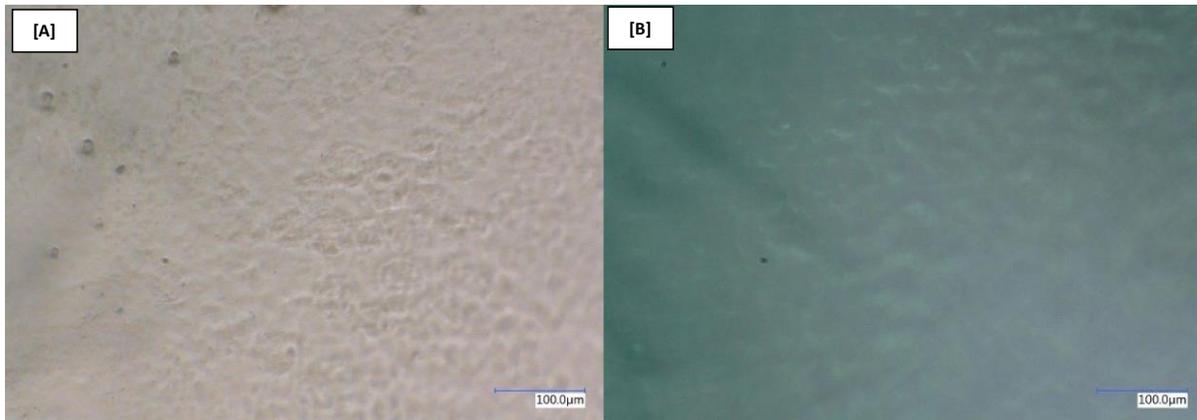


Figura 10. Imagen de la superficie de la membrana de quitosano [A] y quitosano-Cu⁺² [B] a 500X

14.3. Proceso de filtración de *E. coli* y efecto biocida

La Figura 11 muestra el efecto de las membranas de celulosa y celulosa-Cu⁺² en el proceso de filtración de *E. coli*. Estos resultados presentan la cantidad de UFC en 100 µL de solución madre y en 100 µL del agua filtrada. La membrana celulosa-Cu⁺² obtuvo mayor capacidad de filtración de *E. coli* que la membrana de celulosa. La primera redujo en 98% la cantidad de *E. coli* contenida en el agua, en cambio la membrana de celulosa solo la redujo 57%. Cabe mencionar que el cultivo de la membrana presentó un recuento de muy numeroso para contar (MNPC) (Figura 11 [B]), lo que indica la presencia de las enterobacterias removidas para ambas membranas.

Los resultados del efecto biocida de las membranas de celulosa y celulosa-Cu⁺² se encuentran en la Figura 12. Estos resultados muestran que la membrana de celulosa tiene un efecto biocida al reducir 60% la cantidad de UFC. Sin embargo, la membrana de celulosa-Cu⁺² posee un efecto biocida aún mayor al reducir 96% la presencia de UFC de *E. coli*. Estos resultados se compararon sembrando directamente la solución madre sin la membrana, obteniendo como resultado un crecimiento mayor de 574 UFC lo que confirma la capacidad bactericida de ambas membranas de celulosa.

Los resultados del efecto biocida de las membranas de quitosano y quitosano-Cu⁺² se encuentran en la Figura 13. Estos resultados muestran que la membrana de quitosano posee un efecto biocida al reducir 80% la cantidad de UFC de *E. coli*. Sin embargo, la membrana de quitosano-Cu⁺² posee un efecto biocida aún mayor al reducir 90% la presencia de UFC. Cabe mencionar que el proceso de filtración no se llevó a cabo con las membranas de quitosano. Estas membranas al absorber 600% de su peso se rompe al ser colocada en el dispositivo de filtración. La membrana de quitosano-Cu⁺² exhibió un fenómeno interesante, esta membrana no dejó pasar el agua a través de ella utilizando el proceso implementado para filtrar al vacío. Se dejó por 24 h en

contacto con la solución acuosa con enterobacterias y no hubo filtración. Esto abre la oportunidad de realizar otros estudios donde se analicen diferentes tipos de procesos de filtración para verificar la eficacia en la remoción de la enterobacteria.

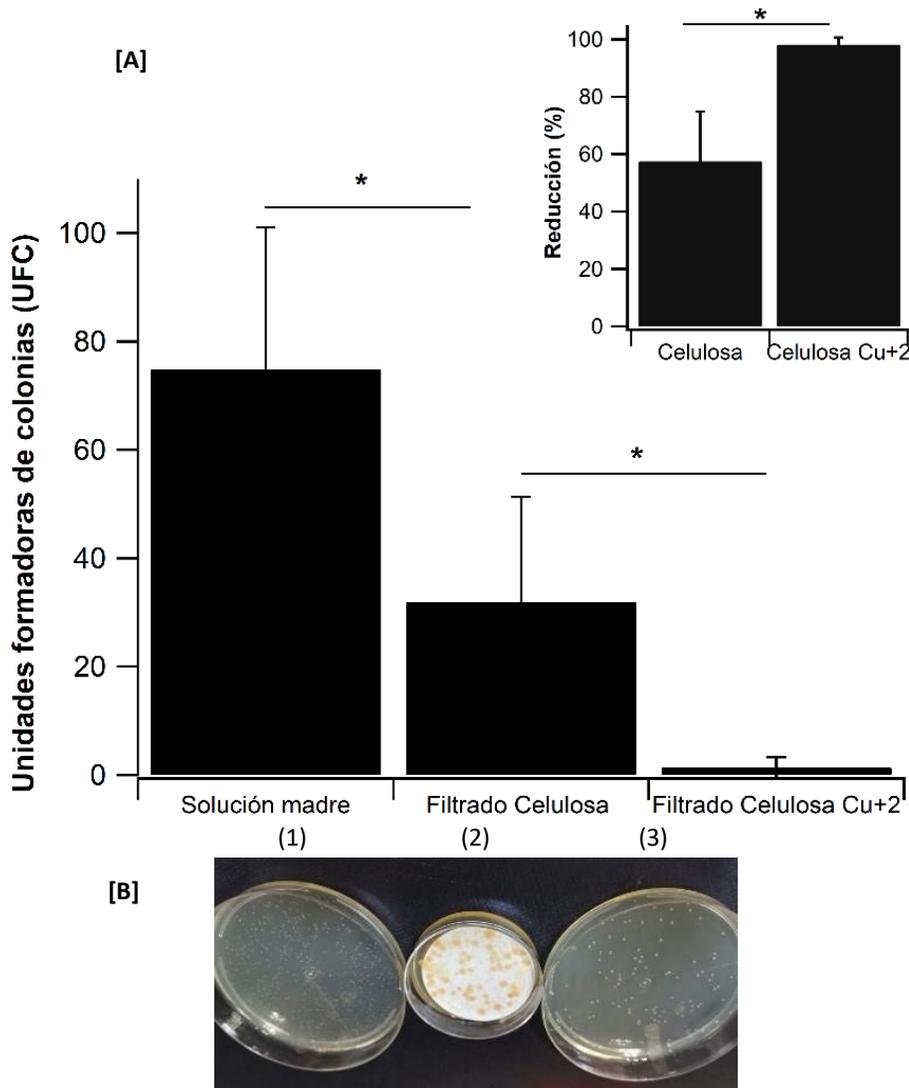


Figura 11. Efecto de las membranas de celulosa y celulosa-Cu⁺² en el proceso de filtración de *E. coli*. Cultivo de la solución madre (1), membrana (2) y filtrado (3) de la membrana de celulosa [B]. Nota. El * representa diferencia significativa entre las muestras ($p < 0.05$)

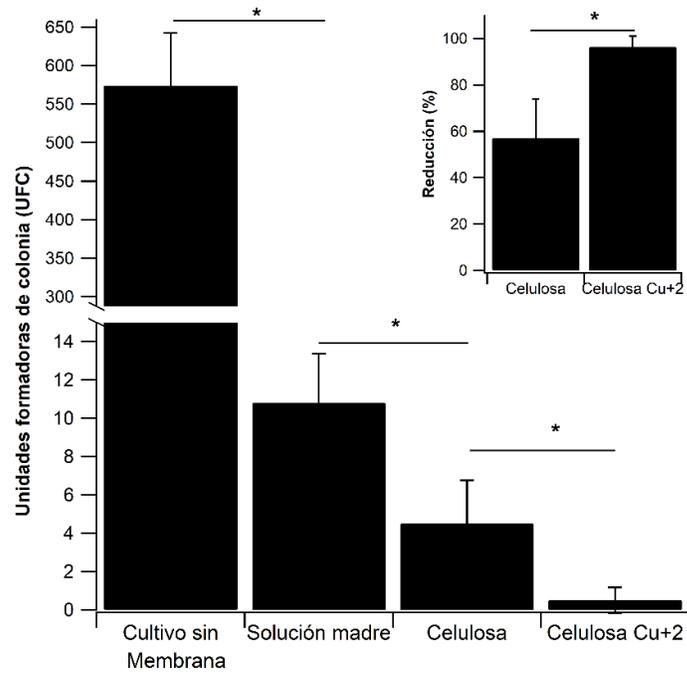


Figura 12. Efecto biocida de las membranas de celulosa y celulosa-Cu⁺²
 Nota. El * representa diferencia significativa entre las muestras ($p < 0.05$)

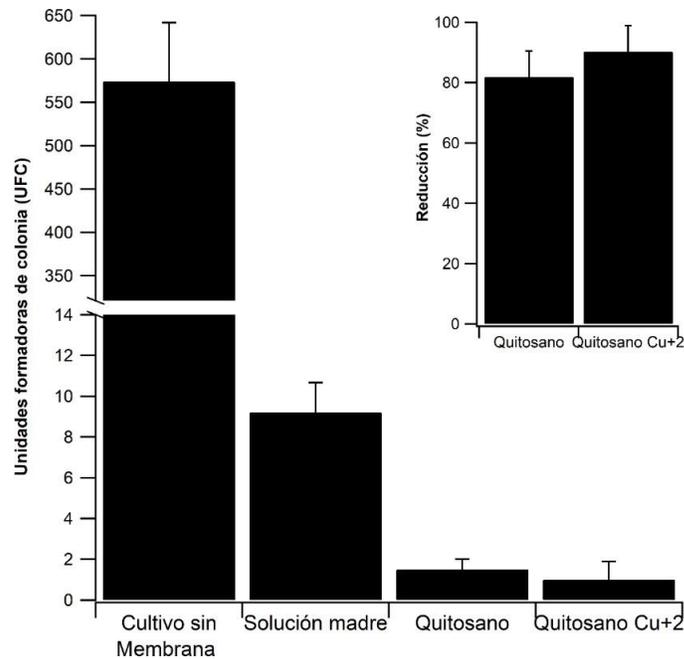


Figura 13. Efecto biocida de las membranas de quitosano y quitosano-Cu⁺²

15. Análisis y discusión de resultados

15.1. Propiedades químicas, termales, mecánicas y ópticas

Se obtuvieron membranas de celulosa y quitosano entrecruzadas con cobre para determinar su efecto biocida y su efectividad en remover *E. coli* del agua. Además, los resultados se correlacionaron con las propiedades químicas, termales y de equilibrio de la membrana.

Las propiedades químicas de las membrana celulosa y quitosano se determinaron por medio de un ATR-FTIR. La membrana de celulosa presentó los picos característicos correspondientes a acetato de celulosa: a 3500, 2994, 1744 y en el rango de 1151-897 cm^{-1} que corresponden a los grupos O-H, C-H, C=O y los grupos C-O y C-O-C, respectivamente (Oh et al., 2005; Song et al., 2012). La membrana de quitosano también presentó los grupos característicos: a 1644, 1569 y en el rango de 1151-897 cm^{-1} que corresponden al grupo C=O en la amida, al grupo N-H y a los grupos C-O y C-O-C, respectivamente (Gedam & Dongre, 2015). La incorporación de Cu^{+2} en la membrana de celulosa modificó la intensidad de la absorbancia y la forma de los picos mencionados anteriormente. En la membrana de quitosano modificó el número de onda de los picos característicos de la flexión del grupo N-H (amida II) y al estiramiento del grupo C-N (amida III) (1569 cm^{-1} y 1400 cm^{-1}). Además, aparece un pico adicional en la región 1151-897 cm^{-1} (grupos C-O y C-O-C). Esto se debe a que el catión cambia la cantidad absorbida requerida para producir las bandas características de los grupos funcionales (específicamente de los grupos iónicos), lo cual indica cambios en su estructura química y morfología (Pérez-Pérez & Suleiman, 2015). Adicionalmente, estos cambios indican que el Cu^{+2} está ubicado en los grupos funcionales donde la intensidad disminuye o existe un cambio en la posición del número de onda (Gedam & Dongre, 2015).

Las propiedades termales de la membrana fueron obtenidas por medio de un análisis de termogravimétrico. La membrana llamada celulosa es una mezcla de acetato de celulosa y nitrocelulosa, donde la primera degradación es atribuida a la degradación de nitrocelulosa (Lin et al., 2010). La segunda y tercera etapa de degradación (200-400°C y 400-550°C) corresponde a la degradación del acetato de celulosa (Hong et al., 2020). La incorporación del catión a la membrana modificó su patrón de degradación: solamente presentó dos etapas degradación y obtuvo un aumento en la cantidad de ceniza. La membrana de quitosano exhibió tres etapas de degradación. La primera ocurrió alrededor de 30-100°C con una pérdida de peso del 10% que corresponde al agua absorbida en la membrana (Gedam & Dongre, 2015). La segunda degradación (140-240°C) corresponde a la degradación de la glicerina (Hong et al., 2020). Finalmente, la tercera degradación corresponde a la cadena polimérica del quitosano (Gedam & Dongre, 2015). La incorporación de cobre le produjo estabilidad termal a la membrana a temperaturas menores de 200°C; sin embargo, la cadena polimérica del quitosano se degradó a una temperatura menor. La adición de cationes le proveen estabilidad a grupos iónicos debido al entrecruzamiento con el catión (Avilés-Barreto &

Suleiman, 2013; Guerrero-Gutiérrez & Suleiman, 2013), pero también modifican los patrones de degradación de las cadenas poliméricas (Pérez-Pérez & Suleiman, 2015). Estos resultados confirman la interacción del catión con los grupos funcionales identificados con el FTIR y además la interacción de Cu^{+2} con la glicerina en la membrana de quitosano.

Las propiedades mecánicas fueron determinadas por medio de un medidor dinámico mecánico. El módulo E^* aumentó con la incorporación del Cu^{+2} debido a que el catión se entrecruza con grupos iónicos, produciendo un rearrreglo estructural que produce los cambios en sus propiedades mecánicas (Suleiman et al., 2014). Finalmente, las propiedades de equilibrio se obtuvieron por medio de la cantidad absorbida de agua y la capacidad de intercambio iónico. Las membranas de celulosa y celulosa- Cu^{+2} no mostraron una diferencia significativa en la cantidad absorbida de agua. En cambio, las membranas de quitosano sí mostraron diferencia significativa con una reducción del 91% en la cantidad absorbida con la incorporación de Cu^{+2} . El catión también disminuye la capacidad de intercambio iónico de la membrana. Ambas propiedades podrían estar influenciadas por el arreglo en la morfología debido a la sustitución del catión. Otros estudios muestran comportamientos similares con la incorporación de Cu^{+2} y otros cationes de diferente número de valencia y radio atómico (Avilés-Barreto & Suleiman, 2013; Guerrero-Gutiérrez & Suleiman, 2013; Pérez-Pérez & Suleiman, 2015). Además, el entrecruzamiento del catión con los grupos iónicos induce una reducción en la cantidad de agua absorbida (Nakayama et al., 2020). Estos resultados se relacionan con la interacción del catión con los grupos funcionales mostrados con el ATR-FTIR, que inducen cambios en el patrón de degradación en las membranas. Además, esta interacción produce cambios en la estructura molecular que induce un aumento tanto en sus propiedades mecánicas como en la superficie de la membrana.

15.2. Proceso de filtración y capacidad biocida de las membranas

Las membranas de celulosa entrecruzadas con Cu^{+2} presentaron un mayor porcentaje de reducción de *E. coli* en el agua. Esto se puede deber a que los grupos funcionales carboxilo e hidroxilo disponibles en la celulosa se entrecruzan con los iones Cu^{+2} que produce un cambio morfológico induciendo la formación de una red más densa, lo cual provoca un aumento en la capacidad de retención de esta enterobacteria (Emam et al., 2012). Adicionalmente, el Cu^{+2} presenta actividad antimicrobiana frente a distintas bacterias (Valeria Prado et al., 2012). Aún no está totalmente dilucidado el mecanismo de su acción biocida, pero se postulan tres posibles mecanismos; como son la formación de radicales libres que incrementa el estrés oxidativo y el envejecimiento prematuro, acelerando la muerte celular, la despolarización de la membrana que disminuye su selectividad y por tanto su desequilibrio hídrico-electrolítico y la interacción del cobre con el ADN (Borkow & Gabbay, 2005).

Las membranas de quitosano disminuyeron la cantidad de UFC respecto a la solución madre, debido a su actividad antibacteriana y antifúngica (Fei-Liu et al., 2001). El mecanismo exacto de la acción antimicrobiana del quitosano y sus derivados aún se desconoce, pero se han propuesto diferentes mecanismos: un postulado es que las moléculas de quitosano cargadas positivamente interactúan con las membranas celulares microbianas cargadas negativamente, produciendo la fuga de componentes proteicos y otros componentes intracelulares causando una alteración en la permeabilidad celular (Rabea et al., 2003). La membrana de quitosano con cobre incrementó su capacidad biocida. Este puede ser atribuido a los factores descritos anteriormente con la membrana de celulosa-Cu⁺².

16. Conclusiones

- Se obtuvieron membranas que contienen acetato de celulosa o quitosano entrecruzadas Cu⁺². Este catión interactúa con los grupos iónicos de la membrana modificando su estructura química.
- La incorporación del catión a la membrana que contiene acetato de celulosa modificó la superficie de la membrana, observándose un cambio en la topografía y porosidad.
- Las propiedades de equilibrio, termales y mecánicas de la membrana se ven afectadas por la incorporación del catión. La cantidad de agua disminuye significativamente para la membrana de quitosano. Además, el patrón de degradación termal y el módulo mecánico cambió para ambas membranas.
- La capacidad de retención y el efecto biocida de las membranas de celulosa aumentó 41% y 36%, respectivamente con la incorporación del catión. La membrana de quitosano aumentó 10% su capacidad biocida luego de entrecruzarse con cobre.
- La cantidad de *E. coli* en el agua filtrada se redujo de 32 a 1.4 UFM con la incorporación de Cu⁺² en la membrana de celulosa.

17. Impacto esperado

El impacto de este proyecto fue desarrollar una membrana con alta capacidad biocida ante el *E. coli* que se encuentra contenido en el agua. Además, este proyecto desarrolló membranas que sean utilizada en procesos convencionales de filtración al vacío y puedan remover enterobacterias. Este estudio también determinó el impacto de la incorporación del catión sobre la química de la membrana, que a su vez impactó las propiedades de equilibrio, mecánicas, termales y de transporte.

18. Referencias

Avilés-Barreto, S. L., & Suleiman, D. (2013). Transport properties of sulfonated poly (styrene-isobutylene-styrene) membranes with counter-ion substitution. *Journal of Applied Polymer*

Science, 129(4), 2294–2304. doi: 10.1002/app.38952

- Avilés-Barreto, S. L., & Suleiman, D. (2015). Effect of single-walled carbon nanotubes on the transport properties of sulfonated poly(styrene–isobutylene–styrene) membranes. *Journal of Membrane Science*, 474(0), 92–102. doi: 10.1016/j.memsci.2014.09.049
- Borkow, G., & Gabbay, J. (2005). Copper as a Biocidal Tool. *Current Medicinal Chemistry*, 12(18), 2163–2175. doi: 10.2174/0929867054637617
- Brooks, G. F., Butel, J. S., Ornston, L. N., Jawetz, E., Melnick, J. L., & Adelberg, E. A. (2020). *Microbiología médica de Jawetz, Melnick y Adelberg* (28 ed. en español.). México: McGraw Hill
- Cabral, J. P. S. (2010). Water microbiology. Bacterial pathogens and water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(10), 3657–3703. doi:10.3390/ijerph7103657
- Center for Disease Control and Prevention. (2021). Drinking Water Frequently Asked Questions (FAQs). Recuperado de <https://www.cdc.gov/healthywater/drinking/drinking-water-faq.html>
- Cobos, C. R., & Tabora, F. (2015). Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica. Recuperado de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/srh_guatemala_2016.pdf
- Cooper, A., Oldinski, R., Ma, H., Bryers, J. D., & Zhang, M. (2013). Chitosan-based nanofibrous membranes for antibacterial filter applications. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 254–259. doi:10.1016/j.carbpol.2012.08.114
- Das, B., & Patra, S. (2017). Antimicrobials: Meeting the Challenges of Antibiotic Resistance Through Nanotechnology. En *Nanostructures for Antimicrobial Therapy* (pp. 1–22). doi:10.1016/B978-0-323-46152-8.00001-9
- Davin-Regli, A., & Pagès, J. M. (2015). Enterobacter aerogenes and Enterobacter cloacae; Versatile bacterial pathogens confronting antibiotic treatment. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1–10. doi: 10.3389/fmicb.2015.00392
- Elías, J. (2015). Las aguas sucias de Guatemala. *El País*. Recuperado de: https://elpais.com/internacional/2015/06/24/actualidad/1435177135_432060.html
- Emam, H. E., Manian, A. P., Iroká, B., & Bechtold, T. (2012). Copper inclusion in cellulose using sodium d-gluconate complexes. *Carbohydrate Polymers*, 90(3), 1345–1352. doi:10.1016/j.carbpol.2012.07.003
- Fane, A. G., Wang, R., & Hu, M. X. (2015). Synthetic membranes for water purification: Status and future. *Angewandte Chemie - International Edition*, 54(11), 3368–3386. doi:10.1002/anie.201409783

- Fei Liu, X., Lin Guan, Y., Zhi Yang, D., Li, Z., & De Yao, K. (2001). Antibacterial action of chitosan and carboxymethylated chitosan. *Journal of Applied Polymer Science*, 79(7), 1324-1335. doi:10.1002/1097-4628(20010214)79:7<1324::AID-APP210>3.0.CO;2-L
- Gedam, A. H., & Dongre, R. S. (2015). Adsorption characterization of Pb(ii) ions onto iodate doped chitosan composite: equilibrium and kinetic studies. *RSC Advances*, 5(67), 54188-54201. doi:10.1039/C5RA09899H
- Geng, X., Kwon, O. H., & Jang, J. (2005). Electrospinning of chitosan dissolved in concentrated acetic acid solution. *Biomaterials*, 26(27), 5427-5432. doi:10.1016/j.biomaterials.2005.01.066
- Guerrero-Gutiérrez, E.M.A., Pérez-Pérez, M., & Suleiman, D. (2015). Synthesis and characterization of sulfonated fluorinated block copolymer membranes with different esterified initiators for DMFC applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(23). doi: 10.1002/app.42046
- Guerrero-Gutiérrez, Edward, M. A., & Suleiman, D. (2013). Supercritical fluid CO₂ processing and counter ion substitution of nafion® membranes. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(1), 73–85. doi: 10.1002/app.38689
- Hong, S. H., Cho, Y., & Kang, S. W. (2020). Highly porous and thermally stable cellulose acetate to utilize hydrated glycerin. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 91, 79-84. doi:10.1016/j.jiec.2020.07.019
- Islam, S., Bhuiyan, M. A. R., & Islam, M. N. (2017). Chitin and Chitosan: Structure, Properties and Applications in Biomedical Engineering. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(3), 854–866. doi: 10.1007/s10924-016-0865-5
- Jalili, N., & Laxminarayana, K. (2004). A review of atomic force microscopy imaging systems: application to molecular metrology and biological sciences. *Mechatronics*, 14(8), 907–945. doi:10.1016/j.mechatronics.2004.04.005
- Judd, S. (2003). Membrane technology lectures. En *Membrane Technology 1999*, 3, doi: 10.1016/s0958-2118(99)90170-2
- Kayser, F., Bienz, K., Eckert, J., Zinkernagel, R. (2004). *Medical microbiology*. Stuttgart: Thieme.
- Lin, C.-P., Chang, Y.-M., Gupta, J. P., & Shu, C.-M. (2010). Comparisons of TGA and DSC approaches to evaluate nitrocellulose thermal degradation energy and stabilizer efficiencies. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(6), 413-419. doi:10.1016/j.psep.2010.07.004
- Madaeni, S. S., Ghaemi, N., & Rajabi, H. (2015). Advances in polymeric membranes for water treatment. En A. Basile, A. Cassano & N. K. Rastogi (Eds.), *Advances in Membrane*

- Technologies for Water Treatment* (pp. 3–41). doi:10.1016/B978-1-78242-121-4.00001-0
- Maturin, L., & Peeler, J. T. (2020). BAM Chapter 3: Aerobic Plate Count | FDA. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-3-aerobic-plate-count>
- McKeen, L. W., & McKeen, L. W. (2012). Renewable Resource and Biodegradable Polymers. En *Film Properties of Plastics and Elastomers* (pp. 353-378). doi: 10.1016/B978-1-4557-2551-9.00014-1
- Murray, P. R., Rosenthal, K. S., & Pfaller, M. A. (2015). *Medical Microbiology*. Elsevier Health Sciences. <https://www.elsevier.com/books/medical-microbiology/murray/978-0-323-29956-5>
- Montazer, M., & Harifi, T. (2018). Nanocrosslinking. En *Nanofinishing of Textile Materials* (pp. 109–125). doi: 10.1016/b978-0-08-101214-7.00008-x
- Nakayama, R., Katsumata, K., Niwa, Y., & Namiki, N. (2020). Dependence of Water-Permeable Chitosan Membranes on Chitosan Molecular Weight and Alkali Treatment. In *Membranes* (Vol. 10, Issue 11). doi:10.3390/membranes10110351
- Oh, S. Y., Yoo, D. Il, Shin, Y., & Seo, G. (2005). FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide. *Carbohydrate Research*, 340(3), 417-428. doi:10.1016/j.carres.2004.11.027
- Pérez-Pérez, M., & Suleiman, D. (2015). Transport properties of sulfonated poly(ether ether ketone) membranes with counter-ion substitution. *Journal of Membrane Science*, 493, 414–427. doi: 10.1016/J.MEMSCI.2015.06.017
- Praveena, S. M., Han, L. S., Than, L. T. L., & Aris, A. Z. (2016). Preparation and characterisation of silver nanoparticle coated on cellulose paper: evaluation of their potential as antibacterial water filter. *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(17), 1307–1319. doi: 10.1080/17458080.2016.1209790
- Qi, L., Liu, Z., Wang, N., & Hu, Y. (2018). Facile and efficient in situ synthesis of silver nanoparticles on diverse filtration membrane surfaces for antimicrobial performance. *Applied Surface Science*, 456, 95–103. doi: 10.1016/J.APSUSC.2018.06.066
- Quaranta, D., Krans, T., Santo, C. E., Elowsky, C. G., Domaille, D. W., Chang, C. J., & Grass, G. (2011). Mechanisms of contact-mediated killing of yeast cells on dry metallic copper surfaces. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(2), 416–426. doi: 10.1128/AEM.01704-10
- Rabea, E. I., Badawy, M. E.-T., Stevens, C. V., Smaghe, G., & Steurbaut, W. (2003). Chitosan as Antimicrobial Agent: Applications and Mode of Action. *Biomacromolecules*, 4(6), 1457-1465. doi:10.1021/bm034130m

- Rodríguez Crespo, G. (2013). Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) modos de Atómica (AFM), modos de operación y aplicaciones. Recuperado de http://www.ictp.csic.es/ICTP2/sites/default/files/Gema_23072013.pdf
- Salles, M. J. C., Zurita, J., Mejía, C., Villegas, M. V., Alvarez, C., Bavestrello, L., Zurita, J. (2013). Resistant Gram-negative infections in the outpatient setting in Latin America. *Epidemiology and Infection*, 141(12), 2459–2472. doi: 10.1017/S095026881300191X
- Shen, S. S., Yang, J. J., Liu, C. X., & Bai, R. B. (2017). Immobilization of copper ions on chitosan/cellulose acetate blend hollow fiber membrane for protein adsorption. *RSC Advances*, 7(17), 10424-10431. doi:10.1039/C7RA00148G
- Song, J., Birbach, N. L., & Hinestroza, J. P. (2012). Deposition of silver nanoparticles on cellulosic fibers via stabilization of carboxymethyl groups. *Cellulose*, 19(2), 411-424. doi:10.1007/s10570-011-9647-3
- Standard Methods (2018). 9222 membrane filter technique for members of the coliform group. In *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. <https://doi.org/doi:10.2105/SMWW.2882.193>
- Suleiman, D., Padovani, A. M., Negrón, A. A., Sloan, J. M., Napadensky, E., & Crawford, D. M. (2014). Mechanical and chemical properties of poly(styrene-isobutylene-styrene) block copolymers: Effect of sulfonation and counter ion substitution. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(11). doi:10.1002/app.40344
- Szekeres, G. P., Nemeth, Z., Schrantz, K., Nemeth, K., Schabikowski, M., Traber, J., Graule, T. (2018). Copper-Coated cellulose-based water filters for virus retention. *ACS Omega*, 3(1), 446–454. doi: 10.1021/acsomega.7b01496
- Valeria Prado, J., Roberto Vidal, A., & Claudia Durán, T. (2012). Aplicación de la capacidad bactericida del cobre en la práctica médica. *Revista Medica de Chile*, 140(10), 1325-1332. doi:10.4067/S0034-98872012001000014
- Zhu, J., Hou, J., Zhang, Y., Tian, M., He, T., Liu, J., & Chen, V. (2018). Polymeric antimicrobial membranes enabled by nanomaterials for water treatment. *Journal of Membrane Science*, 550, 173–197. doi: 10.1016/J.MEMSCI.2017.12.071
- Zhuang, L., Zhi, X., Du, B., & Yuan, S. (2020). Preparation of Elastic and Antibacterial Chitosan-Citric Membranes with High Oxygen Barrier Ability by in Situ Cross-Linking. *ACS Omega*, 5(2), 1086-1097. doi:10.1021/acsomega.9b03206

19. Apéndice

Tabla 3

Datos obtenidos para la capacidad de intercambio iónico

No.	Muestra	Peso	Muestra				Promedio	DS
		(g)	Blanco	(ml)	mmol	mmol/g		
1	Cobre	0.0207	9.1	9.0	0.0009	0.0434	0.0221	0.0234
2	Cobre	0.0242	9.1	9.0	0.0009	0.0371		
3	Cobre	0.0199	9.1	9.1	0.0000	0.0000		
4	Cobre	0.0235	9.1	9.1	0.0000	0.0000		
5	Cobre	0.0238	9.1	9.1	0.0000	0.0000		
6	Cobre	0.0195	9.1	9.0	0.0009	0.0461		
7	Cobre	0.0196	8.8	8.7	0.0009	0.0459		
8	Cobre	0.0215	8.8	8.8	0.0000	0.0000		
9	Cobre	0.0187	8.8	8.7	0.0009	0.0481		
10	Cobre	0.0184	8.8	8.8	0.0000	0.0000		
1	Celulosa	0.0191	9.1	8.7	0.0036	0.1884	0.1480	0.0736
2	Celulosa	0.0173	9.1	8.7	0.0036	0.2080		
3	Celulosa	0.0185	9.1	8.7	0.0036	0.1945		
4	Celulosa	0.0177	9.1	8.9	0.0018	0.1016		
5	Celulosa	0.0176	9.1	8.9	0.0018	0.1022		
6	Celulosa	0.0180	9.1	8.9	0.0018	0.1000		
7	Celulosa	0.0191	9.1	8.9	0.0018	0.0942		
8	Celulosa	0.0181	9.1	8.5	0.0054	0.2983		
9	Celulosa	0.0190	9.1	8.8	0.0027	0.1421		
10	Celulosa	0.0176	9.1	9	0.0009	0.0511		

Tabla 4

Datos obtenidos para determinar el efecto biocida

No.	Acetato de celulosa-Cu			Acetato de celulosa			control sin membrana
	UFC solución madre	UFC en buffer	% reducción	UFC solución madre	UFC en buffer	% reducción	
1	13	1	92.31	7	2	71.43	587
2	12	0	100.00	10	4	60.00	MNPC
3	10	0	100.00	11	6	45.45	MNPC
4	10	0	100.00	8	2	75.00	802
5	7	0	100.00	11	8	27.27	MNPC
6	8	0	100.00	10	2	80.00	501
7	14	1	92.86	10	6	40.00	MNPC
8	15	2	86.67	11	3	72.73	635
9	11	1	90.91	14	8	42.86	MNPC
10	8	0	100.00	9	4	55.56	MNPC
Promedio	10.8	0.5	96.27	10.1	4.5	57.03	574.33
SD	2.56	0.67	4.81	1.81	2.25	16.81	67.89

Nota. MNPC significa muy numeroso para contar

Tabla 5

Datos obtenidos para determinar el efecto biocida de la membrana de quitosano

No.	quitosano-Cu ²⁺			quitosano		
	UFC solución madre	UFC en buffer	% reducción	UFC solución madre	UFC en buffer	% reducción
1	11	2	81.82	11	1	90.91
2	10	1	90.00	10	1	90.00
3	7	0	100.00	7	2	71.43
4	8	0	100.00	8	2	75.00
5	10	2	80.00			
Promedio	9.2	1	90.36	9	1.5	81.83
SD	1.47	0.89	8.56	1.58	0.50	8.72

Tabla 6

Datos obtenidos para el proceso de filtración

No.	Acetato de celulosa-Cu				Acetato de celulosa			
	UFC solución madre	UFC en membrana	UFC en Filtrado	% RED	UFC solución madre	UFC en membrana	UFC en Filtrado	% RED
1	85	MNPC	0	100.00	66	MNPC	21	68.18
2	56	MNPC	0	100.00	82	MNPC	44	46.34
3	37	MNPC	0	100.00	86	MNPC	60	30.23
4	67	MNPC	3	95.52	118	MNPC	69	41.53
5	54	MNPC	0	100.00	104	MNPC	55	47.12
6	108	227	3	97.22	86	MNPC	20	76.74
7	74	MNPC	0	100.00	47	MNPC	16	65.96
8	88	MNPC	5	94.32	25	MNPC	8	68.00
9	103	MNPC	3	97.09	42	MNPC	24	42.86
10	75	MNPC	0	100.00	117	MNPC	36	69.23
Pro	74.70	MNPC	1.40	98.42	77.30	MNPC	32.00	55.62
SD	26.18		1.90	2.20	31.88		19.30	15.68

Nota. MNPC significa muy numeroso para contar, Pro significa promedio, RED significa reducción

Tabla 7

Datos obtenidos para la cantidad absorbida de agua

No.	Peso (g)				% agua absorbida			
	0 min	10 min	20 min	40 min	0 min	10 min	20 min	40 min
1	0.012	0.077	0.087	0.089	0	541.67	625.00	641.67
2	0.021	0.072	0.092	0.109	0	242.86	338.10	419.05
3	0.022	0.094	0.095	0.113	0	327.27	331.82	413.64
4	0.023	0.102	0.107	0.118	0	343.48	365.22	413.04
5	0.007	0.055	0.058	0.065	0	685.71	728.57	828.57
6	0.022	0.086	0.087	0.095	0	290.91	295.45	331.82
7	0.024	0.083	0.085	0.102	0	245.83	254.17	325.00
8	0.008	0.053	0.053	0.058	0	562.50	562.50	625.00
9	0.016	0.058	0.061	0.064	0	262.50	281.25	300.00
				Promedio	0	389.19	420.23	477.53
				DS	0	163.86	172.23	180.14

Listado de los integrantes del equipo de investigación

Contratados por contraparte y colaboradores

Nombre	Firma
Licda. Isabel Cristina Gaitán Fernández	
Licda. Keila Mariana Guerrero Gutiérrez	

Contratados por la Dirección General de Investigación

Nombre	Categoría	Registro de Personal	Pago		Firma
			SI	NO	
Br. María Raquel Abad Sandoval	Auxiliar II	20191457		X	

Guatemala 26 de febrero de 2021

Dr. Edward Mario Augusto Guerrero Gutiérrez
Coordinador del Proyecto de Investigación

Inga. Liuba María Cabrera de Villagrán
Programa Universitario de Investigación e
Desarrollo Industrial (PUIDI)

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Guatemala, 26 de febrero de 2021

Director
Dr. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
Director General de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado director Aguilar:

Adjunto a la presente el informe final “**Membranas entrecruzadas con Cu⁺² y Ag⁺¹ y su aplicación en la filtración de agua y agente biocida**” con partida presupuestal 4.8.63.4.41, coordinado por el Dr. Edward Mario Augusto Guerrero Gutiérrez y avalado por el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Este informe final fue elaborado con base en la guía de presentación de la Dirección General de Investigación, el cual fue revisado su contenido en función del protocolo aprobado, por lo que esta unidad de investigación da la aprobación y aval correspondiente.

Así mismo, el coordinador del proyecto se compromete a dar seguimiento y cumplir con el proceso de revisión y edición establecido por Digi del **informe final y del manuscrito científico**. El manuscrito científico debe enviarse, por el coordinador del proyecto, para publicación al menos en una revista de acceso abierto (*Open Access*) indexada y arbitrada por expertos en el tema investigado.

Sin otro particular, suscribo atentamente.

“Id y enseñad a todos”



Dr. Edward Mario Augusto Guerrero Gutiérrez
Coordinador de proyecto DIGI AP8 - 2020



Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII)
Facultad de Ingeniería