

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ESTUDIO DE MEMBRANAS DE PERVAPORACIÓN MODIFICADAS CON  
LÍQUIDOS IÓNICOS PARA LA OBTENCIÓN DE AROMAS Y  
FRAGANCIAS RECUPERADAS DESDE RESIDUOS LÍQUIDOS  
AGROINDUSTRIALES: OPORTUNIDAD PARA LA AGROINDUSTRIA  
SUSTENTABLE**

**FRANCISCA FERNANDA RUIZ QUIROGA**

HABILITACIÓN PROFESIONAL  
PRESENTADA A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA AMBIENTAL

**CHILLÁN- CHILE**

**2024**

**ESTUDIO DE MEMBRANAS DE PERVAPORACIÓN MODIFICADAS CON  
LÍQUIDOS IÓNICOS PARA LA OBTENCIÓN DE AROMAS Y  
FRAGANCIAS RECUPERADAS DESDE RESIDUOS LÍQUIDOS  
AGROINDUSTRIALES: OPORTUNIDAD PARA LA AGROINDUSTRIA  
SUSTENTABLE.**

Aprobado por:

Gastón Merlet Venturelli  
Ingeniero Civil en Química, Dr.  
Profesor Asistente

---

Profesor Guía

Natalia Valderrama Valdés  
Ingeniero Civil en Industria Forestal, Mg.  
Profesor Asistente

---

Profesor Asesor

Margarita Ocampo Rodríguez  
Ingeniero en Alimentos, Dr.  
Profesor Asistente

---

Profesor Asesor

Juan Antonio Cañumir Veas  
Ingeniero Agrónomo, PhD.  
Profesor Asociado

---

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez  
Ingeniero Agrónomo, PhD.  
Profesor Asociado

---

Decana

## ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUCCIÓN .....	4
2. OBJETIVOS .....	7
2.1. Objetivo General .....	7
2.2. Objetivos Específicos.....	7
3. METODOLOGÍA.....	8
4. MARCO TEÓRICO.....	9
4.1. Membranas: .....	9
4.2. Líquidos Iónicos (LI):.....	13
4.3 Procesos por membrana.....	20
4.4. Transferencia de Masa.....	24
5. MEMBRANAS MODIFICADAS CON LÍQUIDOS IÓNICOS .....	30
5.1. Métodos de modificación de membranas.....	30
5.2. Caracterización de membranas .....	34
6. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	36
7. APLICACIONES DE MEMBRANAS MODIFICADAS CON LÍQUIDOS IÓNICOS .....	49
8. OPORTUNIDAD PARA LA AGROINDUSTRIA SUSTENTABLE .....	51
9. CONCLUSIÓN .....	53
10. REFERENCIAS.....	54

**ÍNDICE DE TABLAS**

	Página
Tabla 1. Cationes de imidazolio más utilizados para la síntesis de líquidos iónicos.....	15
Tabla 2. Aniones principalmente utilizados para la síntesis de Lis.....	15
Tabla 3. Influencia de aniones sobre el punto de fusión en líquidos iónicos basados en 1-etil-3-metilimidazolio o [C <sub>2</sub> C <sub>1</sub> Im].....	18
Tabla 4. Índices de separación de pervaporación para la membrana comercial, membrana polimérica y membrana con composición 70/30 .....	42
Tabla 5. Aplicaciones de membranas modificadas con Lis.....	49

**ÍNDICE DE FIGURAS**

	Página
Figura 1. Clasificación de membranas.....	10
Figura 2. Síntesis del líquido iónico base, bromuro de butil-metilimidazol, [Bmim][Br].....	16
Figura 3. Comparación entre Osmosis natural (a) y Osmosis Inversa (b).....	21
Figura 4. Comparación entre proceso de pervaporación y perstracción .....	22
Figura 5. Diagrama del proceso de pervaporación.....	23
Figura 6. Modelo de difusión-solución en proceso de pervaporación por membrana.....	25
Figura 7. Perfil de concentración en el sistema de pervaporación..	27
Figura 8. Métodos de modificación de membrana.....	30
Figura 9. Permeabilidades de butanol de las membranas sintéticas y comercial.....	40
Figura 10. Selectividades de las membranas sintéticas y comercial.....	41

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

	Página
Ecuación 1. Resistencia total.....	24
Ecuación 2. Coeficiente de transferencia de masa en el interior de la membrana.....	25
Ecuación 3. Flujo de la membrana.....	25
Ecuación 4. Factor de enriquecimiento.....	26
Ecuación 5. Selectividad de la membrana.....	26
Ecuación 6. Permeabilidad de la membrana.....	26
Ecuación 7. Transferencia de masa del soluto orgánico del seno de la solución a la interfase en la capa límite.....	27
Ecuación 8. Transferencia de masa por acción de la constante de reparto entre la solución y la membrana.....	28
Ecuación 9. Transferencia de soluto al interior de la membrana.....	28
Ecuación 10. Transferencia de masa entre la membrana y el vapor permeado.....	29
Ecuación 11. Flujo de masa transferido desde la capa límite hacia el seno de la fase gaseosa.....	29

**ESTUDIO DE MEMBRANAS DE PERVAPORACIÓN MODIFICADAS CON  
LÍQUIDOS IÓNICOS PARA LA OBTENCIÓN DE AROMAS Y  
FRAGANCIAS RECUPERADAS DESDE RESIDUOS LÍQUIDOS  
AGROINDUSTRIALES: OPORTUNIDAD PARA LA AGROINDUSTRIA  
SUSTENTABLE.**

STUDY OF PERVAPORATION MEMBRANES MODIFIED WITH IONIC  
LIQUIDS FOR OBTAINING AROMAS AND FRAGRANCES RECOVERED  
FROM AGROINDUSTRIAL WASTEWATER: AN OPPORTUNITY FOR  
SUSTAINABLE AGROINDUSTRY

**Palabras claves:** Economía circular, revalorización, desarrollo tecnológico.

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo fue estudiar la extracción de aromas a partir de residuos líquidos utilizando membranas de pervaporación modificadas con líquidos iónicos. La metodología consistió en una revisión bibliográfica sistemática, buscando información en bases de datos relevantes como ScienceDirect, Web of Science, Wiley, con los términos clave: pervaporación, líquidos iónicos, aromas y fragancias. El análisis de las publicaciones permitió identificar ventajas, desventajas y oportunidades de mejora tecnológica para el sector agroindustrial. Se concluyó que las membranas de tipo PDMS y PEBA son las más utilizadas para la extracción de compuestos aromáticos, pero se sugiere también el uso de membranas tipo POMS por sus similares características a las de PDMS. En cuanto a los líquidos iónicos, se recomienda el uso de aquellos con cationes de la familia imidazolio y el anión [Tf<sub>2</sub>N] para optimizar la obtención de aromas y fragancias. La técnica de aplicación del

líquido iónico puede afectar la resistencia térmica y mecánica de las membranas. La transferencia de masa depende principalmente del grosor de la membrana y de la afinidad del compuesto de interés con el líquido iónico.

**STUDY OF PERVAPORATION MEMBRANES MODIFIED WITH IONIC LIQUIDS FOR OBTAINING AROMAS AND FRAGRANCES RECOVERED FROM AGRO-INDUSTRIAL WASTEWATER: AN OPPORTUNITY FOR SUSTAINABLE AGROINDUSTRY**

**Keywords:** Circular economy, revalorization, technologic development.

**ABSTRACT**

The objective of this work was to study, based on scientific bibliographic information, the extraction of aromas from agro-industrial wastewater using pervaporation membranes modified with ionic liquids. The methodology consisted of a systematic bibliographic review, searching for information in relevant databases such as ScienceDirect, Web of Science and Wiley, using the keywords: pervaporation, ionic liquids, aromas and fragrances. The analysis of the publications allowed identifying advantages, disadvantages, and technological improvement opportunities for the agro-industrial sector. It was concluded that PDMS and PEBA membranes are the most used for the extraction of aromatic compounds, but the use of POMS membranes is also suggested due to their similar characteristics to PDMS. Regarding ionic liquids, it is recommended to use those with imidazolium family cations and the [Tf<sub>2</sub>N] anion to optimize the extraction of aromas and fragrances. The technique of applying the ionic liquid can affect the thermal and mechanical resistance of the membranes. Mass transfer mainly depends on the thickness of the membrane and the affinity of the compound of interest with the ionic liquid.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector agroindustrial produce una amplia variedad de productos que se exportan de manera global, además generan volúmenes importantes de aguas de proceso y residuos. Dichas aguas contienen una carga específica de compuestos de alto valor añadido entre los cuales podemos encontrar aromas y fragancias, usados para fabricar productos de las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética. La obtención de estos compuestos puede ser un proceso complejo y costoso desde el punto de vista económico (Matiacevich et al., 2023).

Por esta razón, actualmente hay una creciente demanda de tecnología innovadora y más limpia para la producción de sabores y aromas (Castro-Muñoz, 2019). La pervaporación, se presenta como un proceso de separación por membrana que resulta muy atractivo para la química y disciplinas afines debido a sus considerables ventajas sobre los métodos convencionales de purificación o separación, como destilación, evaporación, adsorción, absorción o extracción de solventes (Lukin et al., 2018). Estas ventajas incluyen un manejo relativamente sencillo, facilidad para escalar el proyecto, un número reducido de pasos en el proceso y un bajo consumo energético, lo que se traduce en un sistema más eficiente y económico.

Las membranas de pervaporación se utilizan para separar componentes de una mezcla líquida, corresponden a membranas densas, no porosas, generalmente fabricadas con materiales poliméricos o cerámicos que presentan diferentes permeabilidades hacia los distintos componentes (Gallo

García et al., 2015). Esto permite la separación deseada de los componentes y ofrece ventajas como un menor daño por temperatura al producto, una mayor retención de aromas, un menor consumo energético y costos de equipos más reducidos (Bhattacharjee et al., 2017).

Autores como Peng et al., (2021), Lin et al., (2023), Sadidi et al., (2023), Salgado et al., (2017), Pereira et al., (2022) han estudiado la aplicación de la pervaporación por membranas en la separación de aromas y fragancias, incluyendo la separación de etanol (por ejemplo, en forma de bioetanol), la deshidratación de etanol, la fabricación de nuevos compuestos para la recuperación de biocombustibles, proyectos de desalinización, recuperación de sabor para vinos blancos de bajo contenido alcohólico, y recuperación de aromas y sabores de alimentos marinos, entre otros.

Las membranas de pervaporación pueden ser modificadas para aumentar su afinidad según los compuestos que se deseen recuperar, la modificación de las membranas puede ser por adhesión de compuestos como zeolitas, quitosano o con líquidos iónicos. Estos últimos cuentan con propiedades fisicoquímicas superiores a las de otros solventes orgánicos como alcoholes, éteres y cetonas (Castro-Muñoz, 2019). Debido a su naturaleza y composición iónica, los líquidos iónicos son capaces de disolver una amplia variedad de compuestos, lo que los hace útiles en campos como la ingeniería y la bioquímica (Castillo Borja, 2015). Los líquidos iónicos se consideran "verdes" debido a su baja presión de vapor, buena estabilidad térmica y mínimos impactos ambientales durante su ciclo de vida (Jessop, 2018), aunque algunos

de estos solventes pueden ser tóxicos y no biodegradables, la mayoría de ellos son componentes seguros y biodegradables, lo que los hace atractivos para la investigación y la aplicación industrial (Hospido & Rodríguez, 2019).

El mercado de aromas y fragancias ha ganado una mayor relevancia en los últimos años, y se prevé que continúe creciendo a una tasa anual compuesta del 3,97% hasta 2028 (Aroma Chemicals, 2023). Además de los aromas y fragancias comunes, hay compuestos que destacan por su funcionalidad específica para la salud humana, como el E-2-hexenal, hexanal, linalool y  $\alpha$ -terpineol, que brindan beneficios antioxidantes, anticancerígenos y antimicrobianos, lo que aumenta la vida útil de los productos alimenticios (Wu et al., 2020; Makroo et al., 2021). Por ejemplo, la vanillina ha demostrado efectos antimicrobianos contra diversas bacterias, mientras que el terpinen-4-ol ha sido eficaz contra otros microorganismos (Ayseli & İpek Ayseli, 2016).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

- Estudiar en base a información científica bibliográfica la extracción de aromas a partir de residuos líquidos agroindustriales a través de membranas de pervaporación modificadas con líquidos iónicos.

### **2.2. Objetivos Específicos.**

- Identificar los tipos de membranas modificadas con líquidos iónicos y sus aplicaciones industriales.
- Describir los métodos de preparación de membrana y sus respectivas transferencias de masa.
- Proponer el tipo de polímero y líquido iónico afines para la obtención de aromas y fragancias.

### **3. METODOLOGÍA**

La metodología de investigación inicia con la elaboración de los objetivos, los criterios de inclusión y exclusión, estrategias de búsqueda y métodos para la extracción y análisis de datos, de manera de garantizar la transparencia y reproducibilidad.

Se desarrolla una estrategia de búsqueda exhaustiva para identificar los estudios de mayor relevancia, lo que incluye una selección de bases de datos académicas (como Web of Science, Taylor & Francis, Wiley, ScienceDirect) y el uso de términos de búsqueda específicos y combinaciones de palabras clave (Pervaporación, membranas de pervaporación, líquidos iónicos, aromas y fragancias). También se consideran otras fuentes como referencias de estudios relevantes y tesis relacionadas al tema de investigación.

La selección, análisis y filtro de los estudios e investigaciones se realiza en base a dos selecciones, la primera basada en títulos y resúmenes, y la selección final basada en el texto completo, de las cuales se busca extraer ventajas, desventajas y oportunidades de mejora para la agroindustria.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1. Membranas:**

Las membranas se comprenden como una lámina de permeabilidad selectiva, lo que permite que solo ciertas especies logren pasar a través de ella. En esencia, es una barrera interpuesta entre una corriente de alimentación y la corriente que se genera por la interposición de esta, el movimiento de los componentes desde la alimentación al permeado, dependerá principalmente de las propiedades de los mismos, y de la selectividad de la membrana (Gómez, 2020), por lo cual, solo atravesarán la membrana aquellos compuestos que cumplan determinadas características físico-químicas, mientras que los componentes que no logran pasar a través de la membrana se les denomina concentrado o rechazo (Gómez, 2020).

Existen diferentes tipos de membranas, y la selección de esta dependerá de la aplicación para la que se necesite. Generalmente, las membranas pueden clasificarse en membranas biológicas y membranas sintéticas. Estas últimas son utilizadas en separaciones industriales de carácter líquido o mezcla de gases. Las membranas de carácter sintético pueden clasificarse en orgánicas e inorgánicas. Dentro de las membranas orgánicas, se encuentran las de carácter polimérico, las cuales tienen gran importancia en la separación industrial debido a sus características: preparación sencilla, tener bajo costo económico y apropiadas cualidades fisicoquímicas. A su vez, las membranas poliméricas se desarrollan para distintos procesos. Los polímeros que destacan son: polioctilmetilsiloxano, polidimetilsiloxano, poliéteramida,

poliamida, policarbonato, polipropileno y poliéter sulfona, por mencionar algunos de la amplia gama existente. Para que una membrana sea útil, debe contar con una serie de características que la vuelvan adecuada para los procesos de separación, en el caso de los sistemas de pervaporación, donde la fuerza impulsora es un gradiente de concentración, las propiedades más importantes han de ser la alta selectividad y permeabilidad, buena resistencia mecánica y buen comportamiento frente al ensuciamiento (Akar et al., 2013). Martínez (1998), plantea que las membranas pueden clasificarse (Figura 1) según su naturaleza, su estructura y su mecanismo de transferencia de masa.

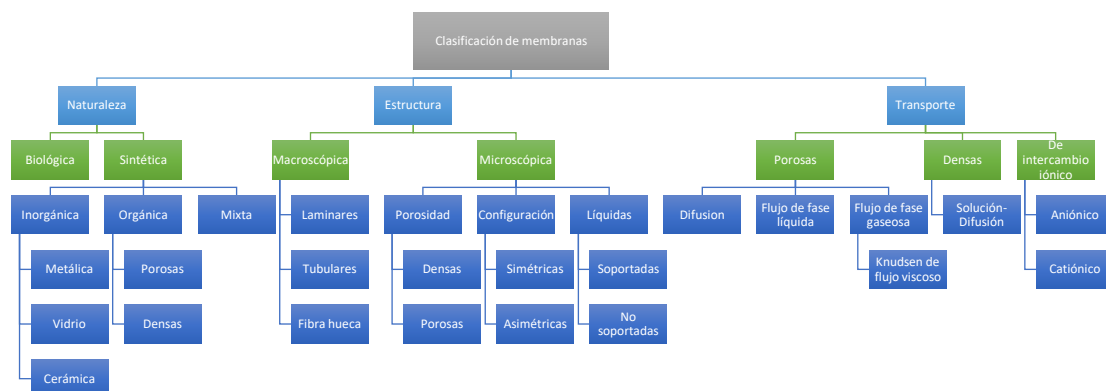


Figura 1. Clasificación de membranas (Fuente: Martínez, 1998). Elaboración propia.

#### *4.1.1. Membranas de pervaporación*

En el proceso de pervaporación se emplean dos tipos de membranas las cuales están basadas en materiales poliméricos, estas son:

##### *4.1.1.1. Membranas hidrofílicas:*

Tienen alta afinidad de permeación por el agua, por lo que se utilizan principalmente para la remoción de agua desde mezclas de solventes orgánicos.

##### *4.1.1.2. Membranas organofílicas:*

Tienen alta afinidad de permeación hacia compuestos apolares o hidrofóbicos, por lo cual son principalmente utilizadas para capturar componentes orgánicos volátiles desde flujos acuosos (Nunes, 2001).

Los polímeros organofílicos polidimetilsiloxano (PDMS), polioctilmetilsiloxano (POMS) y poliéteramida (PEBA), son los principales en aplicaciones correspondientes a separación de compuestos volátiles orgánicos como son aromas y fragancias (AF). A continuación, se detallan las características de estos polímeros y el porqué de su eficiencia en separación.

**Polidimetilsiloxano (PDMS):** Este polímero de carácter hidrofóbico tiene alta afinidad por moléculas no polares u organofílicas. Tienen baja energía superficial y la capacidad de repeler agua líquida, por lo cual es comúnmente utilizado en aplicaciones que precisan separar mezclas orgánicas e inorgánicas, como en procesos que requieran transporte de determinados fluidos (Banerjee et al., 2020).

Poliocetilmetsiloxano (POMS): Polímero similar al PDMS, cuenta con propiedades hidrofóbicas, por la presencia de los grupos metilsiloxano en su cadena molecular, lo que le concede la habilidad para repeler agua y la capacidad de asimilar compuestos orgánicos, características que le posicionan como una opción en aplicaciones industriales que requieran selectividad hidrofóbica.

Poliéteramida (PEBA): Este polímero al contener en su estructura al grupo éter, le brinda propiedades versátiles de solubilidad en comparación a los polímeros basados en silicona mencionados anteriormente (PDMS y POMS), ya que puede interactuar con el agua y con compuestos de tipo orgánico, característica que lo convierte en una opción clara para aplicaciones que requieran la separación de mezclas complejas (Knozowska et al., 2017). Por lo tanto, es posible decir que la naturaleza química del polímero sea esta organofílica o hidrofóbica, es una propiedad crucial para la eficacia del polímero en aplicaciones de separación industrial.

Independiente del material que componga las membranas de pervaporación, estas pueden ser modificadas de distintas formas para aumentar su selectividad según la aplicación para la que se requieran, algunos de estas modificaciones pueden ser por medio de adhesión de polímeros (PEI, PAN) (Olsson et al., 2002), modificación de la estructura de la membrana con adhesión de zeolitas (Li et al., 2023), hilado de PVP/TPU (Lou et al., 2024) o con líquidos iónicos (Rdzanek et al., 2018).

## 4.2. Líquidos Iónicos (LI):

Los líquidos iónicos han surgido como una clase de materiales innovadores y versátiles en el ámbito de la química y la ingeniería en las últimas décadas. Definidos como sales líquidas o solventes iónicos, estos compuestos presentan una estructura peculiar compuesta por iones cargados positiva y negativamente, organizados en una red cristalina líquida a temperaturas moderadas o ambiente.

En todos los procesos químicos se requiere un medio de reacción, en el caso de los solventes orgánicos convencionales son altamente volátiles lo que los convierte en contaminantes de la atmosfera. Por tanto, se requieren nuevos métodos, procesos y otros tipos de solventes que minimicen dicha contaminación. Los Lis surgen como una alternativa a esta problemática (Montoya et al., 2017).

El interés en los líquidos iónicos se ha acrecentado debido a su estabilidad térmica y química, así como a su capacidad para disolver una amplia variedad de compuestos, orgánicos e inorgánicos. Además, su baja volatilidad y toxicidad reducida los convierten en candidatos para una variedad de aplicaciones en campos tan diversos como la catálisis, la electroquímica, la síntesis de materiales avanzados, y la separación de gases y líquidos (Diaz Alvarez, 2012).

En este capítulo se explorarán los fundamentos sobre los líquidos iónicos, su síntesis y sus propiedades fisicoquímicas, cualidades que mantienen a científicos e ingenieros interesados en ellos debido a su potencial en

numerosos campos de aplicación para abrir nuevas vías hacia el desarrollo sostenible.

#### *4.2.1. Composición de los líquidos iónicos:*

Los LIs están formados por un catión orgánico y un anión que puede ser tanto inorgánico como orgánico. A diferencia de las sales tradicionales, los cationes y aniones de los LIs presentan tamaños y simetrías muy diferentes. Al estar formados por iones muy asimétricos y de gran tamaño, las fuerzas de atracción catión-anión son más débiles que las fuerzas que intervienen en las sales iónicas convencionales (sales fundidas). Al disponer de un gran número de aniones y de cationes para diseñar los LIs se pueden formar un gran número de estos compuestos, con propiedades muy distintas. Debido a la gran cantidad que existe y a la facilidad con la que pueden ser creados, no existe una clasificación oficial de LIs (Rodríguez, 2017).

#### *Cationes:*

En la naturaleza, los cationes cuentan con un anillo aromático que generalmente presenta átomos de nitrógeno en él. En la tabla 1 se presentan algunos cationes útiles en la formación de líquidos iónicos.

Algunos de los líquidos iónicos que derivan de cationes de tipo alquilimidazolio, alquilamonio, alquifosfonio, N-alquilpiridinio o N,N-dialquilpirrolidinio, siendo los de tipo imidazolio los más estudiados.

Tabla 1. Cationes de imidazolio más utilizados para la síntesis de líquidos iónicos (Fuente: Rodríguez, 2017).

Nombre catión	Abreviación catión
1-butil-3-metil-imidazolio	[C <sub>4</sub> C <sub>1</sub> Im] <sup>+</sup>
1-hexil-3-metil-imidazolio	[C <sub>6</sub> C <sub>1</sub> Im] <sup>+</sup>
1-octil-3-metil-imidazolio	[C <sub>8</sub> C <sub>1</sub> Im] <sup>+</sup>
1-butil-3-etil-imidazolio	[C <sub>4</sub> C <sub>2</sub> Im] <sup>+</sup>

*Aniones:*

Los líquidos iónicos más estudiados y utilizados son los preparados en base a los siguientes aniones:

Tabla 2. Aniones principalmente utilizados para la síntesis de Lis (Fuente: Rodríguez, 2017).

Nombre anión	Abreviación anión
Hexafluorofosfato	PF <sub>6</sub> <sup>-</sup>
Tetrafluoroborato	BF <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Trifluoroacetato	CF <sub>3</sub> -COO <sup>-</sup>
Trifluorosulfonato o triflato	CF <sub>3</sub> -SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Hexafluoroantimoniato	SbF <sub>6</sub> <sup>-</sup>

Cabe destacar que hasta los aniones más sencillos de preparar y purificar (Tabla 2), demostraron tener problemas al hidrolizarse, liberando ácidos tóxicos y corrosivos, como son el ácido clorhídrico o ácido fluorhídrico, por lo cual, el uso de los aniones mencionados anteriormente se limita a aquellas aplicaciones con condiciones estrictamente anhidras. Se han empleado con éxito otros aniones, perfluorados más complejos, derivados de productos

naturales, como aminoácidos y aniones magneto activos de complejos metálicos (Imperato et al., 2007).

#### 4.2.2. Síntesis de los líquidos iónicos:

La síntesis de líquidos iónicos supone dos etapas bien diferenciadas: en primer lugar, la formación del catión que constituirá el líquido iónico que se obtiene por medio de reacciones de cuaternización, y la reacción de intercambio aniónico que generará el producto deseado. La síntesis del bromuro de butilimidazol, [Bmim][Br] se lleva a cabo en acetato de etilo seco en reflujo durante 8 horas con agitación vigorosa y con atmósfera de nitrógeno para evitar la humedad como contaminante de reacción.

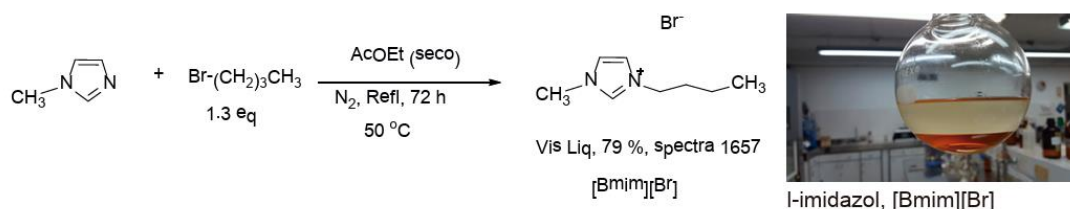


Figura 2. Síntesis del líquido iónico base, bromuro de butil-metil-imidazol, [Bmim][Br] (Fuente: Montoya et al., 2017).

Al finalizar la reacción se observan dos fases (ver figura 2). El líquido iónico es insoluble en acetato de etilo por lo que se separan las fases en el embudo de separación, o bien se rota-evapora directamente el solvente para obtener finalmente el líquido iónico deseado, el cual es un líquido viscoso amarillo pardo. Este compuesto se purifica colocándolo en un matraz Erlenmeyer con

desprendimiento lateral conectado a bomba de vacío y calentamiento a 80°C, con agitación vigorosa por unas 4 horas para eliminar residuos de solvente y posible humedad. Esta reacción es de un alto rendimiento, alrededor del 89% (Montoya et al., 2017).

#### 4.2.3. *Propiedades físicas y químicas de los líquidos iónicos*

Las propiedades físicas y químicas de los líquidos iónicos pueden variar según los aniones y cationes seleccionados. Los LIs poseen una serie de propiedades fisicoquímicas que los convierte en compuestos realmente valiosos (Rodríguez, 2017).

##### - *Presión de vapor*

Los líquidos iónicos presentan una baja presión de vapor, por lo tanto, se hacen manejables permiten el uso de la destilación para recuperar los productos disueltos en ellos (Rodríguez, 2017).

##### - *Punto de fusión*

El punto de fusión es el criterio principal para evaluar un líquido iónico. Por lo cual, es esencial conocer la relación entre su estructura, composición química y punto de fusión. Los líquidos iónicos generalmente tienen un bajo punto de fusión, a menudo por debajo de la temperatura ambiente pudiendo alcanzar los -100°C en algunos casos. El punto de fusión está fuertemente influenciado por el tamaño del líquido iónico, su carga y como se distribuye esta carga (Díaz Alvarez, 2012).

Tabla 3. Influencia de aniones sobre el punto de fusión en líquidos iónicos basados en 1-etil-3-metilimidazolio o [C<sub>2</sub>C<sub>1</sub>Im] (Fuente: Díaz Alvarez, 2012; Elaboración propia).

Líquido Iónico	Punto de fusión (°C)
[C <sub>2</sub> C <sub>1</sub> Im]Cl	87
[C <sub>2</sub> C <sub>1</sub> Im]NO <sub>2</sub>	55
[C <sub>2</sub> C <sub>1</sub> Im]NO <sub>3</sub>	38
[C <sub>2</sub> C <sub>1</sub> Im] AlCl <sub>4</sub>	7
[C <sub>2</sub> C <sub>1</sub> Im]BF <sub>4</sub>	6
[C <sub>2</sub> C <sub>1</sub> Im]CF <sub>3</sub> SO <sub>3</sub>	-9
[C <sub>2</sub> C <sub>1</sub> Im]CF <sub>3</sub> CO <sub>2</sub>	-14

Al comparar los puntos de fusión de diferentes sales de 1-etil-3-metilimidazolio [C<sub>2</sub>C<sub>1</sub>Im] que se mencionan en la tabla anterior, denota que un incremento en el tamaño de anión con la misma carga induce a una disminución adicional del punto de fusión (Rodríguez, 2017).

- *Viscosidad*

Los líquidos iónicos (LIs) exhiben una viscosidad mayor que los disolventes convencionales debido a su naturaleza iónica, generalmente entre 10 y 500 cP (Baker et al., 2001). Cabe destacar que la temperatura y la presencia de impurezas también afectan su viscosidad (García Bernal et al., 2011).

- *Densidad*

La densidad de un líquido iónico puede ajustarse modificando la longitud de la cadena del sustituyente del anillo de imidazolio, disminuyendo conforme aumenta el número de carbonos de la cadena (Diaz Alvarez et al., 2012).

- *Solubilidad*

La solubilidad de los LIs depende principalmente de la naturaleza del anión, aunque el catión también influye. La organofilicidad de las sales de R'RIm puede incrementarse al aumentar la longitud de cadena de los grupos (Cammarata et al., 2001).

- *Toxicidad y biodegradabilidad*

Los Lis que contienen grupos éster, amida, hidroxilo o aldehído muestran mayor biodegradabilidad, pero algunos pueden ser irritantes y tóxicos (Coleman y Gathergood, 2010; Matzke et al., 2007).

- *Conductividad eléctrica*

La conductividad eléctrica de los LIs aumenta con la temperatura y está relacionada con la movilidad iónica, la viscosidad y otros factores como el peso molecular y tamaño de los iones (Greaves y Dummond, 2008).

- *pH*

La acidez de los LIs puede variar, siendo posible encontrar LIs ácidos, neutros o básicos debido a la amplia gama de composiciones sintetizables (Wilkes, 2004).

- *Color*

Mayormente incoloros, los LIs pueden presentar distintas tonalidades por impurezas o por los iones presentes en su estructura (Egorova et al., 2017).

### **4.3 Procesos por membrana**

Con el paso del tiempo, se han desarrollado procesos de membrana para el tratamiento de las aguas residuales, con el objetivo de reutilizar este recurso en diferentes industrias. Actualmente la escasez de agua, ha llevado a que los procesos de membrana deben ser complementados o sustituidos por métodos donde el tratamiento de efluentes genere agua purificada para el uso y consumo, reduciendo el gasto energético y así beneficiando el desarrollo sin perjudicar al ambiente en su proceso.

A continuación, se mencionan algunos de los procesos de membrana más estudiados del último tiempo.

#### *4.3.1. Osmosis directa:*

La osmosis directa implica el flujo natural de agua a través de una membrana semipermeable debido al gradiente de presión osmótica, a diferencia de la osmosis inversa que requiere presión hidráulica (ver figura 3) (Drioli & Giorno, 2009; Dutta & Nath, 2018; Zhao et al., 2012). Sus membranas, con una capa activa selectiva y una capa de soporte porosa, permiten la separación del agua y la reducción del volumen de salmuera, abordando preocupaciones medioambientales. Destaca por su potencial para altos flujos de agua y recuperación debido al bajo requerimiento de presión, emergiendo como alternativa prometedora en tratamiento de aguas y desalinización, con beneficios económicos y ambientales.

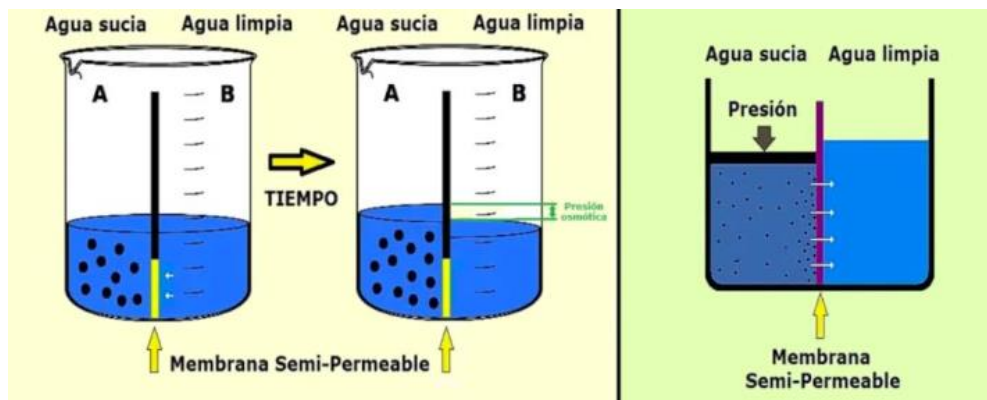


Figura 3. Comparación entre Osmosis natural (a) y Osmosis Inversa (b)

(Fuente: Elaboración propia).

#### 4.3.2. Perstracción:

El proceso de perstracción se fundamenta en el transporte de componentes a través de membranas (ver figura 4), siendo la diferencia en los potenciales químicos la fuerza impulsora (Koros y Shimidzu, 1996). Durante este proceso, se evidencia la permeación y extracción de la membrana al entrar en contacto la corriente receptora con un disolvente de extracción, lo que facilita la separación de dos fases líquidas bajo presión atmosférica. Los componentes se difunden desde la alimentación hacia el líquido receptor, mientras este último se contra difunde en la alimentación (Durdáková et al., 2021).

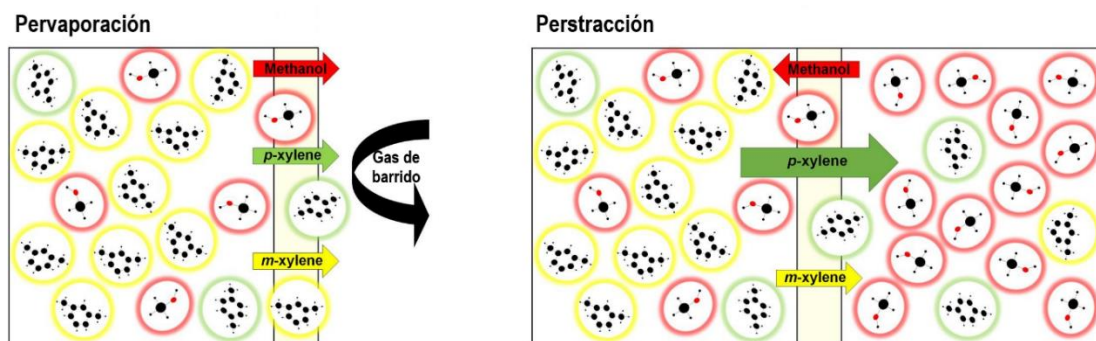


Figura 4. Comparación entre proceso de pervaporación y perstracción

(Fuente: Durdáková et al., 2021).

#### 4.3.3. Pervaporación:

La pervaporación (PV) se define como un proceso de separación en el cual una mezcla líquida (alimentación) entra en contacto con un lado de la membrana, mientras que, en el otro lado, conectado a un sistema de vacío, el permeado se recupera en forma de vapor a baja presión (Gómez, 2020) (ver figura 5). La pervaporación se aplica en la separación de mezclas líquidas utilizando membranas densas. El flujo de alimentación está directamente en contacto con un lado de la membrana, mientras que los compuestos objetivo permean a través de la membrana en fase de vapor, proceso que ocurre por la diferencia en el gradiente de potencial químico establecido por una diferencia en la presión parcial (Crespo & Brazinha, 2015; Figoli et al., 2015). La tecnología de pervaporación por membrana se distingue por su alta selectividad, seguridad y eficiencia, emergiendo como la más prometedora en industrias como la petroquímica, farmacéutica y de biorrefinería para separaciones líquido-líquido a escala molecular (Huang et al., 2014). Debido a

sus características, este método permite el transporte selectivo de solutos en mezclas líquidas, ideal para la separación de compuestos volátiles presentes en niveles traza.

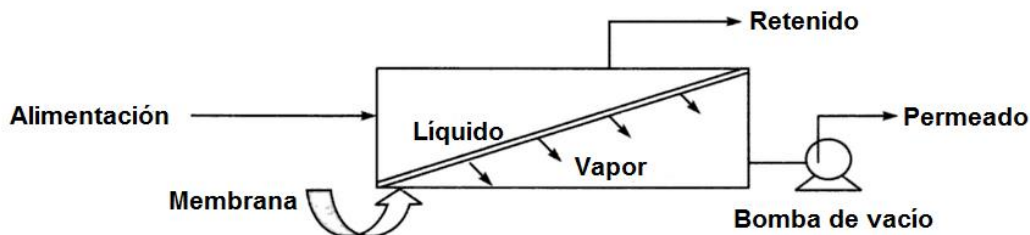


Figura 5. Diagrama del proceso de pervaporación (Fuente: Cabezas, 2016).

#### 4.3.4. Ventajas y desventajas de los procesos de membranas

Los procesos de membrana son una opción clara y factible en operaciones industriales que requieran la separación de mezclas ya sean binarias o de múltiples compuestos. Características como equipamiento compacto, la facilidad de fabricación, la sencillez del funcionamiento y su costo económico (Nath, 2017) lo postulan como un proceso atractivo para diferentes industrias. Los procesos de membrana ofrecen varias ventajas claras: ahorro de energía y costos, reemplazo de métodos convencionales menos eficientes, menor impacto ambiental, optimización de productos de alto valor y flexibilidad en el diseño de sistemas. Por otra parte, las desventajas de los procesos de membrana radican en el ensuciamiento de la membrana, por lo que es necesario contar con un sistema adecuado de limpieza de esta o tener

presente el recambio de membranas cada cierto tiempo, pues es inevitable que esta acumule suciedad, proveniente del mismo flujo de alimentación.

#### **4.4. Transferencia de Masa**

La transferencia de masa en el proceso de pervaporación puede conceptualizarse mediante un modelo de resistencia en serie, que incluye la resistencia de la fase acuosa (donde se presenta el proceso de convección), la resistencia de la membrana y la resistencia de la fase gaseosa en el lado del permeado (Lipnizki y Trägårdh, 2001). Este proceso se caracteriza por la absorción selectiva de la membrana, la difusión a través de la membrana y la desorción en la fase de vapor (Overington et al., 2009). En aplicaciones de pervaporación hidrofóbica de mezclas diluidas de compuestos orgánicos, se asume que la isoterma de sorción es una función lineal de la concentración de componentes orgánicos, además, que el coeficiente de difusión es independiente de la concentración orgánica y que obedece a la ley de Henry. Debido al movimiento de las partículas en la capa límite, entre el flujo y la membrana se produce el proceso de difusión.

$$R = R_{sol} + R_m + R_g \quad [1]$$

Donde  $R$  representa la resistencia total,  $R_{sol}$  la resistencia de la solución acuosa,  $R_m$  la resistencia de la membrana y  $R_g$  la resistencia de la fase gaseosa en el lado del permeado.

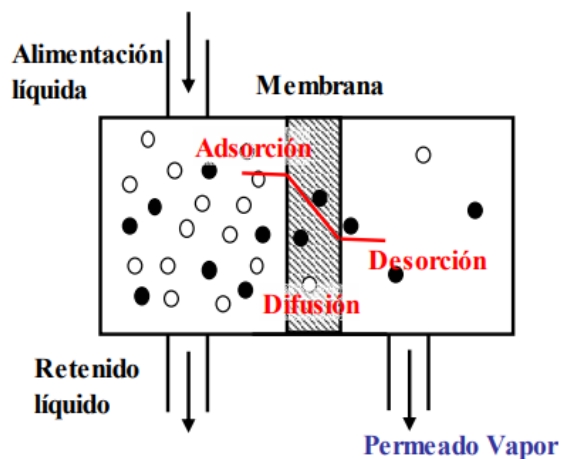


Figura 6. Modelo de difusión-solución en proceso de pervaporación por membrana (Fuente: Cussler, 2007).

Según el principio de difusión-solución (Figura 6),  $k_{\text{membrana}}$  es el coeficiente de transferencia de masa en el interior de la membrana se define como mediante la siguiente ecuación:

$$k_{\text{membrana}} = \frac{D_{ab}}{e} \quad [2]$$

Donde  $D_{ab}$  es el coeficiente de difusión y  $e$  el espesor de la membrana (Cussler, 2007).

El flujo de la membrana, definido como la cantidad de componente que ha permeado a través de la membrana en un determinado tiempo por unidad de área de membrana, y se calcula por medio de la ecuación 3.

$$J = \frac{m}{\Delta t \cdot A} \quad [3]$$

Donde  $J$  es el flujo de membrana,  $m$  la masa del permeado recolectado,  $\Delta t$  corresponde al intervalo de tiempo y  $A$  el área de la membrana.

El desempeño del proceso de pervaporación, puede evaluarse a partir del flujo de membrana, la selectividad y el factor de enriquecimiento, estos parámetros pueden obtenerse por medio de ecuaciones simples.

El factor de enriquecimiento se calcula como una relación entre la fracción másica de un componente en el permeado y la fracción másica en la alimentación (Rdzanek et al., 2018) y se representa con la ecuación 4.

$$E_i = \frac{m_{i_p}}{m_{i_a}} \quad [4]$$

Donde  $E_i$  corresponde al factor de enriquecimiento para el componente  $i$ ,  $m_{i_p}$  es la fracción másica del componente  $i$  en el lado del permeado y  $m_{i_a}$  la fracción másica del componente  $i$  en la alimentación.

La selectividad de la membrana representa la preferencia relativa de un componente sobre otro y puede obtenerse mediante la ecuación 5:

$$\alpha = \frac{J_i}{J_j} \quad [5]$$

Donde  $J_i$  es el flujo transmembrana del componente  $i$  y  $J_j$  corresponde al flujo transmembrana del componente  $j$ .

La permeabilidad ( $P$ ) de la membrana es definida como la ecuación 6:

$$P = S \cdot D_{ab} \quad [6]$$

Donde  $S$  corresponde al coeficiente de solubilidad y  $D_{ab}$  el coeficiente de difusión.

Para comprender de mejor manera la transferencia de masa a través de una membrana densa, es necesario conocer el perfil de concentración del soluto, el cual se presenta en la figura 7.

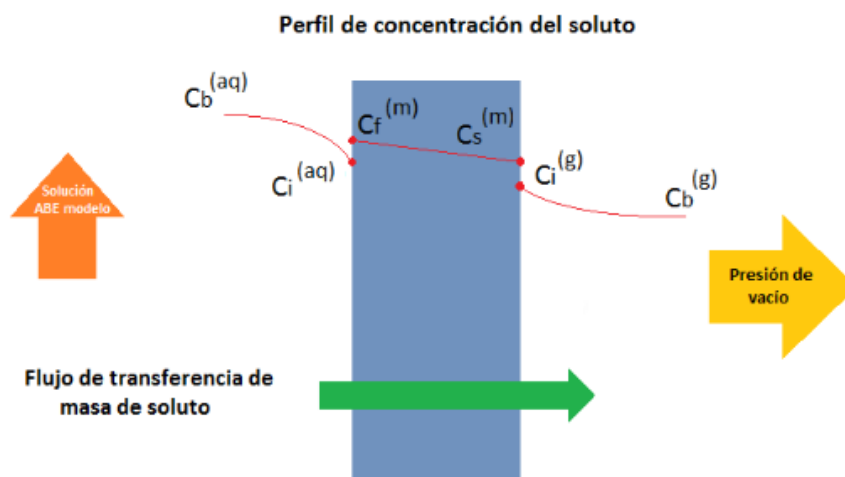


Figura 7. Perfil de concentración en el sistema de pervaporación (Uribe y Cabezas, 2014).

La transferencia de masa en el proceso de pervaporación con membranas densas está determinado por distintas etapas. En primera instancia se evalúa la transferencia de masa del soluto orgánico del seno de la solución a la interfase en la capa límite y puede describirse por la ecuación 7:

$$N_{S^{(aq)}} = k_{sol} \left( C_b^{(aq)} - C_i^{(aq)} \right) \quad [7]$$

Donde  $N_s^{(aq)}$  es el flujo de transferencia ( $\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $k_{sol}$  corresponde al coeficiente individual de la transferencia de masa en la capa límite de la solución ( $\text{m s}^{-1}$ ). Luego  $C_b^{(aq)}$  y  $C_i^{(aq)}$  corresponden a la concentración en el seno de la fase acuosa y la concentración del soluto en la capa límite respectivamente ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

En segunda instancia viene una etapa de equilibrio entre las fases producida por la acción de la constante de reparto entre la solución y la membrana, se describe según la ecuación 8:

$$K_{\frac{m}{aq}} = \frac{C_f^{(m)}}{C_i^{(aq)}} \quad [8]$$

Donde  $K_{\frac{m}{aq}}$  corresponde a la constante de reparto la cual cuantifica la distribución del soluto entre la membrana y la solución de alimentación en el equilibrio termodinámico,  $C_f^{(m)}$  es la concentración del soluto interfacial en la membrana y  $C_i^{(aq)}$  corresponde a la concentración de la interfase del soluto en la capa límite.

En la tercera etapa de la transferencia de masa, el soluto se transfiere por el interior de la membrana, regido por el mecanismo de difusión molecular y puede describirse con la ecuación 9:

$$N_s^{(i)} = k_m \left( C_f^{(m)} - C_s^{(m)} \right) \quad [9]$$

Donde  $C_s^{(m)}$  corresponde a la concentración del soluto presente en la interfase de la membrana por el lado del permeado.

La siguiente etapa de la transferencia de masa vuelve a generarse un equilibrio de fases entre la membrana y el vapor permeado, la ecuación 10 describe el proceso:

$$K_m = \frac{C_s^{(m)}}{C_i^{(g)}} \quad [10]$$

Donde  $C_i^{(g)}$  es la concentración del componente en la capa límite en el lado del permeado.

Finalmente, el flujo de masa que es transferido desde la capa límite en el lado del permeado que va hacia el seno de la fase gaseosa, puede expresarse con la siguiente ecuación:

$$N_s^{(g)} = k_g (C_i^{(g)} - C_b^{(g)}) \quad [11]$$

Como la fase gaseosa recibe el permeado que proviene desde la capa límite, se entiende que la concentración en el lado del permeado es 0.

## 5. MEMBRANAS MODIFICADAS CON LÍQUIDOS IÓNICOS

Las membranas modificadas con líquidos iónicos una variedad de aplicaciones tecnológicas e industriales (Figura 8), entre las que destacan el aumento de la selectividad y permeabilidad, mejoras en la estabilidad química y térmica, aumento en la conductividad iónica, control de la hidrofobicidad o hidrofiliidad, incluso en algunos casos brindan propiedades antiincrustantes y propiedades antimicrobianas lo que reduce la formación del biofilm y contaminación en la superficie de la membrana.

### 5.1. Métodos de modificación de membranas

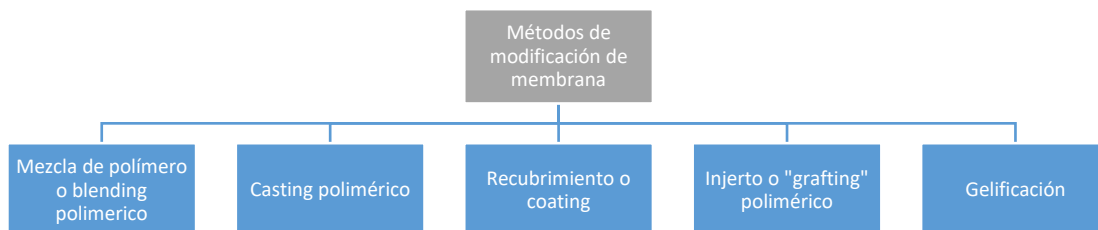


Figura 8. Métodos de modificación de membrana.

### *5.1.1. Mezcla de polímeros o “blending” polimérico*

La técnica de blending es ampliamente aplicada en la unión de partículas inorgánicas a estructuras poliméricas, este método corresponde a la introducción de un polímero hidrófilo o hidrófobo, según la característica que se desee añadir a la membrana polimérica que se está diseñando.

El objetivo del blending es mejorar las propiedades de la membrana (hidrofílica o hidrofóbica según se requiera el caso) por medio del cambio en la composición química de la membrana, formando un sistema unido homopolimérico. Donde la unión generada depende principalmente del solvente que se utilice, de los pesos moleculares de los compuestos, de la naturaleza, estructura y grado de cristalinidad de los polímeros utilizados (Khulbe et al., 2010). Ong y Tan (2016) utilizan la técnica de blending para desarrollar una membrana de polivinilalcohol (PVA) con una solución de [Bmim][BF<sub>4</sub>] en su estudio “Separación por pervaporación de un azeótropo ternario que contiene acetato de etilo, etanol y agua utilizando una membrana de líquido iónico soportada en papel de bucky”.

### *5.1.2. Casting polimérico*

La técnica de casting polimérico consiste en usar polímeros en estado líquido, (los cuales pueden fundirse para lograr ese objetivo) posteriormente se vierten en un molde y se dejan secar hasta que el disolvente se evapore. Maqueda Marín (2023) utilizó este método para preparar membranas poliméricas basadas en cloruro de metiltrioctilamonio [MTOACl] con pureza superior al

97%, el que fue inmovilizado en una matriz polimérica de policloruro de vinilo (PVC) en este caso el disolvente utilizado fue tetrahidrofurano (THF).

### 5.1.3. Recubrimiento o "coating"

La técnica de recubrimiento, comúnmente conocida como "coating" es muy útil para la producción de membranas poliméricas densas, el transporte ocurre por difusión y conduce a flujos bajos. Para mejorar el flujo, la selectividad y la permeabilidad es necesario reducir al máximo el espesor de la membrana, una alternativa para lograr lo anterior, es fabricar membranas compuestas por dos materiales distintos, añadiendo una capa delgada de polímero que mejore la selectividad y permeabilidad a una capa de material polimérico, el cual brinde la resistencia mecánica. Con esta técnica existe la posibilidad de que la capa de recubrimiento pueda obstruir los poros, lo que implica que las propiedades del material determinarán las características de la membrana resultante (Alcaina, 1991). Se destaca de la técnica de coating, el dip coating o revestimiento por inmersión. Técnica de sencilla de llevar a cabo para preparar membranas compuestas por medio de una capa muy delgada y densa sobre un sustrato poroso. En este caso la membrana asimétrica (estructura porosa) es sumergida en un fluido compuesto por un solvente y un polímero o monómero de baja concentración. Luego se retira la membrana con la capa de polímero-disolvente ya añadida a la superficie de esta y se traslada a un horno para el posterior secado y la evaporación del disolvente, donde al mismo tiempo ocurre el entrecruzamiento polimérico, evento que favorece la adhesión entre la capa polimérica y la membrana. Este método suele utilizarse para la

fabricación de membranas involucradas en pervaporación y separación de gases. Hirota et al., (2024) utiliza este método para modificar sus membranas en el estudio de las propiedades de pervaporación de membranas de organosílice derivadas de líquidos iónicos silesilatados.

#### *5.1.4. Injerto polimérico o “Grafting”*

La técnica de grafting o injerto polimérico es una técnica actual para el diseño de membranas, en la cual se añade un grupo funcional procedente de uno o más polímeros (o monómeros) sobre una superficie por medio de radiación de diferentes tipos, como luz ultravioleta, rayos X o gamma (Rahimpour, 2011), método de diseño que no modifica las propiedades existentes del polímero. Uragami et al., (2016) desarrollan una membrana polimérica constituida de injertos de polidimetilsiloxano y polimetacrilato de metilo, la cual es modificada con un líquido iónico hidrofóbico, 1-alil-3-butylimidazolio bis(trifluorometanosulfonil)imida ([ABIM]TFSI) para la separación de compuestos aromáticos.

#### *5.1.5. Gelificación*

Es posible preparar membranas que retengan una capa activa de líquido iónico. Se utiliza un gelificante de bajo peso molecular el cual cambia la densidad del líquido para aumentarle las propiedades mecánicas del líquido iónico, sin afectar sus propiedades físicas y de transporte (Voss et al., 2009). Dentro de las ventajas de las membranas modificadas con líquidos iónicos se encuentran la mayor difusión molecular, ya que esta propiedad es mayor en fluidos que en polímeros, destaca también el aumento de la selectividad de la

membrana, ya que la elección del líquido iónico dependerá del compuesto que se desee recuperar, otra ventaja apunta directamente en el gasto económico ya que, se necesita una cantidad mínima para la preparación de las membranas. En el estudio realizado por Plaza et al., (2013) utilizaron el método de gelificación para la fabricación de membranas porosas de PTFE modificadas con el líquido iónico [Bmim][PF<sub>6</sub>] soportado, mientras que Li et al., (2020) ocuparon esta técnica para desarrollar membranas de polipropileno y poliacrilonitrilo modificado con los siguientes líquidos iónicos 1-octil-3-metilimidazolio bis(trifluorometanosulfonil)imida ([C<sub>8</sub>MIM][NTf<sub>2</sub>]) y N-octil-N-metilpirrolidinio bis(trifluorometanosulfonil)imida ([C<sub>8</sub>C<sub>1</sub>Pyrr][NTf<sub>2</sub>]). Por otra parte, Cabezas y colaboradores (2016) desarrollaron una membrana con líquido iónico gelificado, soportada entre capas de polímero para la extracción de butanol desde mezclas acetona-butanol-etanol (ABE), los líquidos iónicos utilizados fueron [omim][Tf<sub>2</sub>N] y [P6,6,6,14][DCA] y el polímero seleccionado fue polidimetilsiloxano.

## **5.2. Caracterización de membranas**

### *5.2.1. Espectroscopia ATR-FTIR*

La espectroscopia ATR-FTIR se basa en la interacción entre la radiación infrarroja y una muestra para analizar su estructura molecular. Es una técnica versátil que puede aplicarse a muestras en estado gaseoso, líquido o sólido. Se centra en el infrarrojo medio del espectro electromagnético, siendo este el más empleado para el análisis de compuestos orgánicos. La información obtenida está relacionada con las vibraciones moleculares, lo que permite

identificar grupos funcionales y elucidar la estructura molecular. La medición se realiza mediante la transmitancia o absorbancia de la radiación infrarroja por la muestra (Ortega y Blanco, 1982).

#### *5.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)*

La microscopía electrónica de barrido (SEM) se utiliza para observar y caracterizar la morfología superficial y la sección transversal de materiales sólidos, tanto inorgánicos como orgánicos. Emplea un haz de electrones de alta energía que interactúa con la muestra, generando una imagen visualizada en un monitor mediante detectores que capturan los electrones emitidos durante la interacción. Esta técnica proporciona información sobre la composición química, estructura y textura del material, con la capacidad de enfocar o aumentar sobre áreas definidas por el usuario, incluso en tres dimensiones. Es útil para el análisis de aspectos morfológicos de muestras microscópicas de diversos materiales (García, 2015).

#### *5.2.3. Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX)*

La técnica de microanálisis por dispersión de energía de rayos X (EDS) es altamente útil para obtener la composición precisa de una muestra. Se realiza mediante un detector que recibe los rayos X emitidos desde cada punto de la superficie de la muestra, bombardeada por un haz de electrones del SEM. Esta técnica proporciona información analítica y cuantitativa sobre áreas específicas, ya que la energía de cada rayo X es característica de los elementos presentes en la muestra (García, 2015).

## 6. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

En el estudio de Izák et al., (2008) se investigó la eficacia del uso de membranas de ultrafiltración soportadas con líquido iónico-polímero en el proceso de pervaporación al vacío. Estas membranas fueron impregnadas con dos tipos de líquidos iónicos (hexafluorofosfato de 1-etinil-3-etil-imidazolio y tetracianoborato de tetrapropilamonio) junto con polidimetilsiloxano. Las membranas soportadas de líquido iónico-polímero demostraron ser altamente estables y se utilizaron para separar mezclas ternarias de butan-1-ol-acetona-agua mediante pervaporación al vacío. En comparación con las membranas de polidimetilsiloxano, se observó un aumento en el factor de enriquecimiento promedio del butan-1-ol en ambos casos. Esta mayor selectividad sugiere un gran potencial para mejorar el proceso de separación por pervaporación.

En resumen, al emplear membranas de líquido iónico soportadas en módulos cerámicos de ultrafiltración, como el polidimetilsiloxano-1-etinil-3-etil-imidazolio hexafluorofosfato y el polidimetilsiloxano-tetracianoborato de tetrapropilamonio, se observó un significativo aumento en el factor de enriquecimiento del butan-1-ol en comparación con las membranas de polidimetilsiloxano estándar. Del mismo modo, se observó un aumento en el factor de enriquecimiento de la acetona. A pesar de que el proceso de separación con las membranas IL-PDMS es ligeramente más lento, su mayor selectividad indica un gran potencial para mejorar los procesos de separación posteriores.

La estabilidad y las propiedades de transporte de las membranas de líquido iónico soportadas se verificaron después de cinco meses de uso sin cambios significativos. El estudio de caso sobre la eliminación de acetona y butan-1-ol de una solución acuosa tiene aplicaciones prácticas en procesos de biotransformación, particularmente en la fermentación utilizando *C. acetobutylicum*.

En el estudio realizado por Plaza et al., (2013) se ha implementado la pervaporación de mezclas acuosas de ABE utilizando membranas con líquido iónico [bmim][PF<sub>6</sub>] gelificado soportadas en una membrana de PTFE con el objetivo de separar el butanol desde una solución acuosa. Se compararon estos ensayos con corridas de evaporación de membrana desarrolladas con el mismo montaje experimental y soporte de membrana sin gel de LI. Los resultados evidenciaron un aumento en la selectividad de las membranas.

La utilización de una capa de gel de LI formada con una baja concentración de gelificante ha generado membranas con una permeabilidad comparable a la de un sistema de evaporación de membrana, pero selectivas para la transferencia de butanol. La selectividad de la membrana se debe principalmente al coeficiente de partición entre el gel de LI y la solución acuosa, las características de la membrana de PTFE parecen promover el transporte del compuesto en el proceso de pervaporación.

Se propuso un modelo de transferencia de masa basado en ecuaciones de transporte clásicas para describir tanto el proceso de pervaporación como el sistema de evaporación de membrana de referencia. Este modelo permitió la

simulación del sistema de evaporación de membrana, validando la correlación elegida para el coeficiente de transferencia de masa en la capa límite de la solución de alimentación acuosa ABE. El mismo enfoque teórico se aplicó para describir la pervaporación, utilizando el modelo para correlacionar el coeficiente de difusión de acetona, butanol y etanol en la capa de gel de LI.

Los resultados experimentales demostraron la coherencia del modelo, el cual fue capaz de correlacionar los coeficientes de transferencia de masa de cada soluto en la capa de gel de LI, mostrando valores mayores que los reportados para LI polimerizados o mezclados con polímeros, aunque moderadamente más bajos que en LI no gelificados similares.

En conclusión, este trabajo muestra el potencial de usar membranas y LI para la separación de butanol de las mezclas ABE mediante pervaporación, destacando la importancia de la gelificación para lograr selectividad sin comprometer la permeabilidad.

El estudio de Echavarría (2018) se centró en la preparación de membranas utilizando la técnica de inversión de fase para separar n-butanol desde soluciones acuosas mediante pervaporación. Estas membranas, denominadas PEBAx/HmimFAP, se diseñaron con diferentes proporciones de polímero y líquido iónico. La síntesis implicó el uso de un solvente, un polímero (Pebax 2533 SA 01), y un líquido iónico (1-hexil-3-metilimidazolio Tris(pentafluoroetil)trifluorofosfato). La cantidad de líquido iónico determinó la composición de las membranas, variando desde 100/0 hasta 50/50 en relación

polímero/líquido iónico. Se utilizó una membrana comercial de Pebax de Pervatech como referencia.

Para la síntesis se utilizó la técnica de precipitación por evaporación del solvente. Se mezclaron el polímero y el líquido iónico con 1-butanol y la solución resultante se vertió en placas Petri, las que se dejaron enfriar en un horno de vacío durante la noche para prevenir la fractura de las membranas. Luego, las membranas se sometieron a pruebas de pervaporación empleando un equipo experimental especializado.

Los resultados del análisis de microscopía electrónica de barrido demostraron que todas las membranas sintetizadas eran densas y no presentaban defectos. Además, se observó que el aumento en la proporción de líquido iónico resultaba en una superficie más lisa de las membranas, aunque un exceso de líquido iónico podía generar estructuras heterogéneas.

El análisis de transmitancia mediante espectroscopia FTIR reveló que no había interacciones químicas entre el polímero y el líquido iónico en ninguna de las membranas analizadas. La cantidad de líquido iónico influyó en los picos de transmitancia, pero no se observaron nuevas interacciones, sugiriendo que la inclusión del líquido iónico reforzaba las propiedades individuales sin generar reacciones químicas.

En los experimentos de pervaporación, se evaluó el rendimiento de las membranas en términos de permeabilidad de butanol, permeabilidad de agua, selectividad y factor de separación. Estos resultados se compararon con los de una membrana comercial bajo las mismas condiciones de operación.

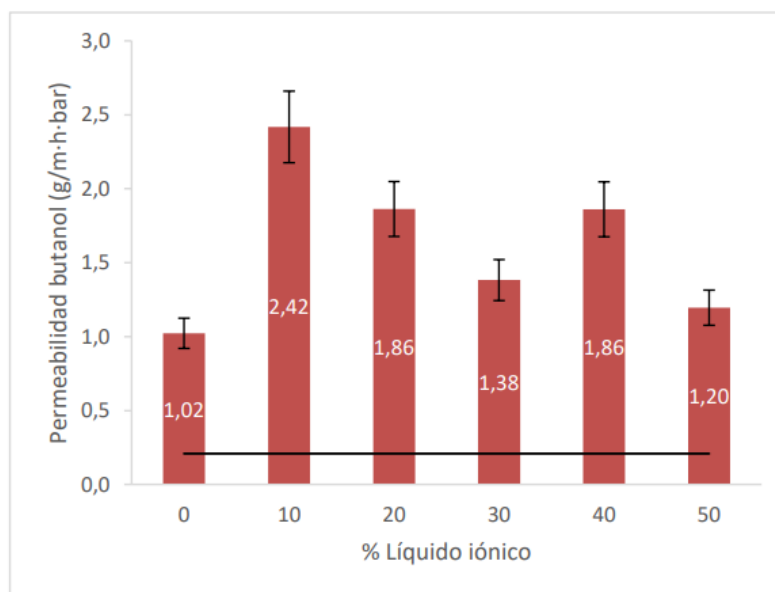


Figura 9. Permeabilidades de butanol de las membranas sintéticas y comercial (Fuente: Echavarría, 2018).

De la figura 9 se obtienen las permeabilidades de las membranas en relación con el porcentaje de líquido iónico, contrastándolas con el valor de permeabilidad de butanol de la membrana comercial, que se determina con la línea negra continua (valor de 0.21). A menor porcentaje de líquido iónico, la permeabilidad es mayor. Por el contrario, al aumentar el porcentaje de líquido iónico, la permeabilidad disminuye. Esto puede deberse a la interacción física entre el polímero y el líquido, que queda atrapado en las cadenas poliméricas, afectando así la transferencia de masa.

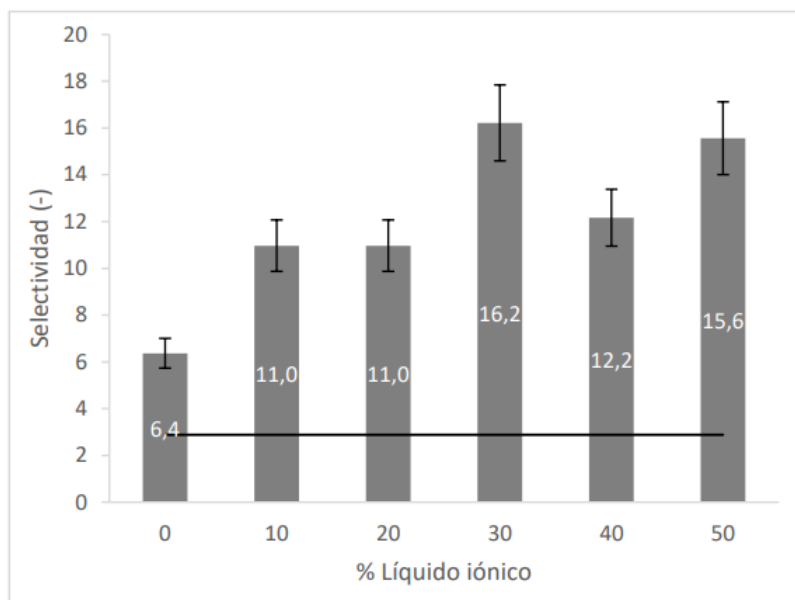


Figura 10. Selectividades de las membranas sintéticas y comercial

(Fuente: Echavarría, 2018)

La figura 10 demuestra que todas las membranas sintéticas superan ampliamente los valores de la membrana comercial en selectividad con un valor aproximado de 2,8 determinado por la línea negra continua. Específicamente, la membrana sintética compuesta por un 30 % de líquido iónico y un 70 % de polímero muestra el mejor rendimiento. Se concluye que esta composición ofrece una selectividad casi 6 veces superior a la membrana comercial y un valor prácticamente 3 veces superior al de la membrana 100 % polimérica.

En la tabla que aparece a continuación se muestran los valores del Índice de Separación de Pervaporación (PSI) para la membrana con un 30 % de líquido

iónico y un 70 % de polímero, para la membrana 100 % polimérica y para la membrana comercial.

Tabla 4. Índices de separación de pervaporación para la membrana comercial, membrana polimérica y membrana con composición 70/30 (Fuente: Echavarría, 2018).

Membrana	PSI
Comercial	4624.98
Polimérica	6961.68
Pebax/HmimFAP 70/30	12557.48

Se rescata que la membrana compuesta por 70% polímero y 30% líquido iónico es la que tiene mejor rendimiento siendo dos veces mejor en comparación a la membrana polimérica y hasta 3 veces mejor que la membrana comercial.

El estudio de la separación de CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mediante membranas líquidas iónicas soportadas (SILMs) basadas en membranas poliméricas con soporte cerámico, realizado por Ziobrowski y Rotkegel en 2019, ha sido fundamental en el avance de esta área de investigación. Las SILMs se han desarrollado mediante la impregnación del soporte cerámico de una membrana comercial de polidimetilsiloxano (PDMS) con líquido iónico: acetato de 1-etil-3-metilimidazolio ([Emim][Ac]). El objetivo principal de este estudio fue investigar la mejora en la separación de CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> y la estabilidad de las SILMs preparadas. En el transcurso del análisis, se examinaron los efectos de la temperatura de alimentación, la diferencia de presión y el método de impregnación en el

rendimiento de las SILMs desarrolladas. Se emplearon dos métodos de impregnación: recubrimiento e inmersión.

Los resultados obtenidos revelan que las SILMs preparadas mediante el método de recubrimiento exhiben una buena estabilidad a largo plazo y selectividades de CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> muy altas, alcanzando hasta 152. Estos hallazgos presentan una alternativa económica para la separación selectiva de CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mediante SILMs. Además, al comparar los resultados con la correlación de límite superior de Robeson y los datos disponibles en la literatura, se observa que la aplicación de un líquido iónico apropiado y un método de impregnación en la membrana PDMS conduce a una mejora significativa en el rendimiento de separación.

El trabajo presentado por Cabezas et al., (2019) consiste en la separación de n-butanol de soluciones acuosas mediante pervaporación utilizando membranas basadas en líquidos iónicos (IL) gelificados. Estas membranas fueron estabilizadas mecánicamente con un doble recubrimiento de silicona utilizando dos películas de polidimetilsiloxano (PDMS). El primer paso de la preparación de la membrana consideró la formación de una capa de líquido iónico gelificado, que se formó utilizando dos líquidos iónicos basados en imidazolio: [omim][Tf<sub>2</sub>N] y [bmim][Tf<sub>2</sub>N], y dos líquidos iónicos basados en fosfonio: [P<sub>6,6,6,14</sub>][Tf<sub>2</sub>N] y [P<sub>6,6,6,14</sub>][DCA]. El procedimiento de gelificación se llevó a cabo sobre un soporte de papel poroso utilizando un gelador de bajo peso molecular. Las membranas obtenidas mediante este método fueron probadas en ensayos de pervaporación para separar butanol de soluciones de

fermentación modelo ABE (Acetona-Butanol-Etanol). Estos ensayos se realizaron en una configuración experimental especialmente construida para este propósito. El rendimiento de pervaporación de estas membranas basadas en líquidos iónicos se comparó con el obtenido con una membrana de una sola capa de PDMS. A partir de estos resultados experimentales, la selectividad butanol/agua para las membranas basadas en [P6,6,6,14][Tf<sub>2</sub>N] alcanzó un valor igual a 892, que es 150 veces mayor que el valor obtenido para una membrana de una sola capa de PDMS. Simultáneamente, para el mismo IL, los flujos transmembrana ( $\text{kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) de butanol y agua fueron un 37% y un 99.6% más bajos que los valores obtenidos utilizando una membrana de una sola capa de PDMS, respectivamente. El carácter hidrofóbico del líquido iónico seleccionado y sus valores relativamente altos para los parámetros de transporte pueden explicar esta respuesta experimental.

En el estudio realizado por Li et al., (2020), se investigaron dos tipos de membranas de líquido iónico soportadas (SILM) preparadas a partir de 1-octil-3-metilimidazolio bis(trifluorometanosulfonil)imida ([C<sub>8</sub>MIM][NTf<sub>2</sub>]) y N-octil-N-metilpirrolidinio bis(trifluorometanosulfonil)imida ([C<sub>8</sub>C<sub>1</sub>Pyrr][NTf<sub>2</sub>]), los polímeros ocupados para soporte de las membranas fueron polipropileno (PP) y poliacrilonitrilo (PAN) para la separación de mezclas binarias de carbonato de dimetilo (DMC)/metanol mediante pervaporación. Se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar la morfología de las membranas porosas antes y después de la incorporación de los líquidos iónicos. Se observó que el rendimiento de pervaporación de las SILMs era

altamente dependiente de la concentración. A bajas concentraciones de metanol (fracción de 0,2 M), ambas SILMs tendían a permitir preferentemente el paso de DMC. En general, la SILM basada en  $[C_8MIM][NTf_2]$  demostró un mejor rendimiento que la basada en  $[C_8C_1Pyrr][NTf_2]$ . En condiciones óptimas, la SILM compuesta por  $[C_8MIM][NTf_2]$  permitió un flujo transmembrana de  $0,739 \text{ (kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}\text{)}$ , una selectividad DMC/metanol de 67 y un factor de separación de 21 a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  con una fracción de 0,8 M de DMC. Sin embargo, a concentraciones elevadas de metanol, la permeabilidad del metanol aumentó debido a los efectos de acoplamiento, lo que resultó en una disminución de la selectividad de la membrana a alrededor de 2. Se encontró que la estructura del líquido iónico afectaba el comportamiento de permeación. Para ambas estructuras de cationes estudiadas, se observaron diferencias significativas en el comportamiento de permeación de DMC y metanol.

La separación de aromáticos y alcanos es uno de los procesos de separación química más importantes y desafiantes. Este estudio realizado por Li et al., (2022) informa sobre la separación de alta eficiencia de aromáticos/alcanos en el proceso de pervaporación basado en una serie de nuevas membranas de gel de líquido iónico. La membrana de gel de líquido iónico se caracterizó mediante técnicas de FT-IR, SEM, AFM, TGA y XRD. Los resultados revelaron que el líquido iónico se mantenía en la estructura tridimensional del soporte polimérico y que la membrana conservaba su estabilidad cuando la temperatura superaba los  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se investigaron los parámetros relevantes del proceso de membrana, como la concentración de polímero, la

concentración de líquido iónico, el tipo de líquido iónico, la temperatura de formación de película, el grosor de la membrana, la concentración de alimentación, la temperatura de operación y la velocidad de flujo de alimentación. La membrana óptima se preparó cuando las concentraciones de P(VDF-HFP) y [Amim][Tf<sub>2</sub>N] eran del 15% y 45% en peso, respectivamente, la temperatura de formación de película era de 15 °C y el grosor de la membrana era de 120 μm. Cuando la concentración inicial de tolueno era del 50% en peso y la velocidad de flujo era de 200 (mL min<sup>-1</sup>), se observó el mejor flujo (120 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) y factor de separación (11,3) a 25 °C. Además, el factor de separación fue superior a 10 y el flujo se mantuvo en el mismo nivel después de trabajar continuamente durante 30 horas, lo que indica que la membrana tiene una buena estabilidad.

En el estudio realizado por Erdoğan y Hasanoğlu (2023) se investigó la producción de butanol como biocombustible a través de la fermentación ABE, donde la pervaporación se destacó como un proceso prometedor para separar los biocombustibles de las mezclas acuosas, especialmente las mezclas ABE con una proporción de 3:6:1 de solventes ABE y agua alrededor del 97%. Se desarrollaron membranas basadas en líquidos iónicos para recuperar el butanol de estas mezclas, utilizando polidimetilsiloxano (PDMS) y líquido iónico 1-butil-3-metilimidazolio bis(trifluorometilsulfonil)imida ([bmim][Tf<sub>2</sub>N]) como materiales clave. Se emplearon películas porosas de polivinilidene fluoruro (PVDF) y politetrafluoroetileno (PTFE) como soportes. Se prepararon dos tipos de membranas diferentes: una con el líquido iónico

mezclado en PDMS y otra con el líquido iónico impregnado en los poros del soporte. Se evaluaron los efectos de la concentración de alimentación y la temperatura en el rendimiento de separación. La adición de líquido iónico en PDMS resultó en un aumento significativo de los valores de flujo y selectividad. Los experimentos de pervaporación mostraron selectividades de butanol entre 24,7 y 61,3 con PTFE como soporte, y entre 22,5 y 48,6 con PVDF. Especialmente con el uso de líquido iónico, los flujos aumentaron de 2,5 a 5 veces, lo que indica una mejora notable en el proceso. En conclusión, se demostró que las membranas PDMS+IL/PVDF y PDMS+IL/PTFE son eficaces para la recuperación de butanol mediante pervaporación.

En el estudio realizado por Wang et al., (2024) se diseñaron membranas de matriz mixta (MMMs) que combinan polidimetilsiloxano (PDMS) con el LI 1-butil-3-metilimidazolio bis(trifluorometilsulfunil)imida intercalado con disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ) para mejorar la separación por pervaporación del compuesto aromático 2-feniletanol desde una solución acuosa. Estas membranas ofrecen canales de transporte y sitios de afinidad de 2-FE, debido a las interacciones electroestáticas y de difusión de concentración en el IL@ $\text{MoS}_2$ . Las MMMs preparadas mostraron un rendimiento óptimo, con un flujo total de  $1466 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , un factor de separación de 33 y un índice de separación por pervaporación de  $47,571 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Lo que representa un incremento del 26%, 31% y 44% respectivamente en comparación con las membranas que no intercalan disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ) datos que demuestran que las MMMs tienen una selectividad excelente para 2-FE.

Además de que presentaron alta durabilidad tras 168 horas de prueba, indicando potencial para aplicaciones prolongadas en la separación de 2-FE.

## 7. APLICACIONES DE MEMBRANAS MODIFICADAS CON LÍQUIDOS IÓNICOS

La gama de aplicaciones para las membranas modificadas con líquidos iónicos es muy amplia (Tabla 5), según el área industrial en el que se presente este tipo de tecnología puede involucrarse en la farmacología, cosmetología y en tecnología de alimentos. Gran variedad de autores ha estudiado el desempeño del proceso de pervaporación por membranas para la obtención de compuestos aromáticos.

A continuación, se presentan diversos estudios que destacan el uso de membranas modificadas con líquidos iónicos en una variedad de aplicaciones.

Tabla 5. Aplicaciones de membranas modificadas con LIs.

(Elaboración propia).

Aplicaciones	Referencias
Separación de alcoholes en forma de bioetanol.	Peng et al., (2021)
Deshidratación de etanol.	Lin et al., (2023)
Recuperación de biocombustibles.	Sadidi et al., (2023); Dong et al., (2023)
Proyectos de desalinización.	Li et al., (2023)
Minimización de pérdidas de sabores y aromas del jugo de uvas.	Salgado et al., (2017)
Separación de especies diluidas en soluciones líquidas.	Karlsson & Tragardh (1996); Pereira et al., (2006)

Separación y recuperación de aromas valiosos de productos marinos.	Pereira et al., (2022)
Eficacia del uso de membranas de ultrafiltración soportadas con líquido iónico-polímero en la pervaporación al vacío.	Izák et al., (2008)
Separación de butanol desde mezclas ABE.	Plaza et al., (2013); Echavarría (2018); Cabezas et al., (2019); Erdoğan y Hasanoğlu (2023)
Separación de CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	Ziobrowski y Rotkegel (2019)
Separación de DMC/Metanol.	Li et al., (2020)
Separación de compuestos aromáticos y alcanos.	Y. Li et al., (2022)
Separación de 2-fenil etanol desde solución acuosa.	Wang et al., (2024)

---

Autores como Pereira y colaboradores (2022) señalan que los aromas recuperados pueden etiquetarse como "sabores naturales", ya que se extraen directamente de la fuente principal mediante un proceso físico que no utiliza solventes químicos.

Distintos autores coincidieron en que los polímeros de silicona polioctimetilsiloxano y polidimetilsiloxano de fibra hueca presentan cualidades que benefician la recuperación de compuestos organofílicos como son aromas y fragancias.

## **8. OPORTUNIDAD PARA LA AGROINDUSTRIA SUSTENTABLE**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), fruto de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), son un plan de acción vigente desde el año 2016 hasta el 2030. Este plan se comprende como un mecanismo global para la búsqueda del desarrollo sostenible, en el que se articulan diecisiete sistemas integrados y objetivos indivisibles que buscan equilibrar los planos económico, social y ambiental (Fleming et al., 2017).

En este contexto, la agroindustria, como uno de los pilares económicos fundamentales del país, enfrenta el desafío constante de implementar y mejorar la tecnología sin disminuir la calidad de sus productos. Aquí, es donde las membranas de pervaporación representan una oportunidad significativa para este sector productivo. Estas membranas permiten la separación selectiva de componentes de mezclas líquidas, recuperando compuestos de alto valor y promoviendo un ciclo de producción eficiente y limpio.

Al implementar este tipo de sistemas a la industria se trabaja directamente sobre el ODS 9, denominado “Industria, innovación e infraestructura” el cual busca la construcción de infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación (Objetivo 9 | Objetivos de Desarrollo Sostenible, s. f.) y de manera inherente se estará trabajando también en los ODS 12 Producción y consumo responsables, ODS 8 Trabajo decente y crecimiento económico y de manera más implícita en los ODS 2 Hambre cero y ODS 1 Fin de la pobreza.

La instauración de sistemas de pervaporación y membranas modificadas con líquidos iónicos, contribuye entonces a la sostenibilidad de la agroindustria de manera local mediante la recuperación de recursos, el ahorro energético, la reducción de residuos y la reutilización del recurso hídrico y de forma global al trabajar en base a los ODS mencionados anteriormente. Así, se puede fomentar el desarrollo del sector agroindustrial en favor de un futuro más sustentable y consciente de la crisis ambiental actual, preservando y en medida de lo posible, mejorando la calidad de los productos.

## 9. CONCLUSIÓN

De este trabajo se concluye que:

- Se encuentran en la literatura membranas de tipo PDMS y PEBA las que son utilizadas para la extracción de compuestos aromáticos principalmente butanol, en cuanto a los líquidos iónicos la familia que destaca es la de imidazolios, seguida de los conformados con bis(trifluorometilsulfonil)imida. Se sugiere la utilización de POMS por las similares características fisicoquímicas y mecánicas con PDMS, puesto que ambos pertenecen a la familia de elastómeros.
- Existen diferentes técnicas para la inclusión del líquido iónico en la preparación de membranas, como son dip coating, blending polimérico y gelificación por mencionar algunas, cada cual cuenta con ventajas y desventajas en cuanto a estabilidad térmica y propiedades mecánicas, en cuanto a la transferencia de masa esta dependerá principalmente del espesor de la membrana y de lo afín que sea el líquido iónico al compuesto que quiera recuperarse, las membranas debieran seleccionarse en el siguiente orden POMS, PDMS y PEBA.
- Se propone el polímero PDMS y el líquido iónico 1-butil-3-metilimidazolio bis(trifluorometilsulfonil)imida ( $[bmim][Tf_2N]$ ) para la obtención de aromas y fragancias.

## 10. REFERENCIAS

- Akar, N., Asar, B., Dizge, N., y Koyuncu, I. (2013). "Investigation of characterization and biofouling properties of PES membrane containing selenium and copper nanoparticles." *Journal of Membrane Science* 437, p. 216-226.
- Alcaina Miranda, M.I. (1991). Optimización del proceso de desalcoholización de vinos por pervaporación. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. Valencia: Universitat Politècnica de València (España).
- Ayseli, M. T., & İpek Ayseli, Y. (2016). Flavors of the future: Health benefits of flavor precursors and volatile compounds in plant foods. *Trends in Food Science & Technology*, 48, 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.005>
- Baker, N., Baker, G.A., Kane, M.A., Bright, F.V. (2001). The cybotactic region surrounding fluorescent probes dissolved in 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate: effects of temperature and added carbon dioxide. *J. Phys. Chem.* 2001, 105, 9663.
- Banerjee, S. L., Samanta, S., Sarkar, S., & Singha, N. K. (2020). A self-healable and antifouling hydrogel based on PDMS centered ABA tri-block copolymer polymersomes: A potential material for therapeutic contact lenses. *Journal of Materials Chemistry B*, 8(2), 226–243. <https://doi.org/10.1039/C9TB00949C>
- Bhattacharjee, C., Saxena, V. K., & Dutta, S. (2017). Fruit juice processing using membrane technology: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002>
- Cabezas Cornejo, R., Romero, J. (2016). Desarrollo de membranas basadas en líquidos iónicos recubiertos para la pervaporación de butanol desde mezclas modelo de fermentación ABE [TESIS DOCTORAL, Universidad de Santiago de Chile]. Santiago de Chile. <https://repositorio.be-anid.com/server/api/core/bitstreams/ccbcecc9-2845-4b06-9a7c-5f1b2e7f4f10/content>
- Cabezas, R., Suazo, K., Merlet, G., Quijada-Maldonado, E., Torres, A., & Romero, J. (2019). Performance of butanol separation from ABE mixtures by pervaporation using silicone-coated ionic liquid gel

- membranes. *RSC Advances*, 9(15), 8546-8556. <https://doi.org/10.1039/c8ra09630a>
- Cammarata, L., Kazarian, S.G., Salter, P.A., Welton, T. (2001) Molecular states of water in room temperature ionic liquids. *Phys. Chem. Chem.* 3, 5192.
- Castro-Muñoz, R. (2019). Pervaporation: The emerging technique for extracting aroma compounds from food systems. *Journal of Food Engineering*, 253, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.013>
- Castillo Borja, F. (2015). Líquidos Iónicos: Métodos de síntesis y aplicaciones. *ConCiencia Tecnológica*, 49.
- Crespo, J. G., & Brazinha, C. (2015). Fundamentals of pervaporation. En *Elsevier eBooks* (pp. 3-17). <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-246-4.00001-5>
- Coleman, D., Gathergood, N. (2010) Biodegradation studies of ionic liquids. *Chem. Soc. Rev.* 2010, 39, 600.
- Cussler, E.L. (2007). "Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems" (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Díaz Alvarez, J. C., et al. (2012). "Líquidos iónicos: propiedades fisicoquímicas y aplicación potencial en el mejoramiento de crudos pesados." *Revista ION* 25: 61-87.
- Greaves, T.L., Drummond, C.J. (2008) Protic Ionic Liquids: Properties and Applications. *Chem. Rev.* 2008, 108, 206.
- Dong, G., Zhang, Y., Pang, X., Guo, M., Moriyama, N., Nagasawa, H., Kanezashi, M., & Tsuru, T. (2023). Sub-nanometer scale tailoring of the microstructures of composite organosilica membranes for efficient pervaporation of toluene/n-heptane mixtures. *Journal of Membrane Science*, 672, 121469. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121469>
- Drioli, E., & Giorno, L. (2009). Membrane Operations: Innovative Separations and Transformations. In *Membrane Operations: Innovative Separations and Transformations*. <https://doi.org/10.1002/9783527626779>
- Durďáková, T.-M., Hovorka, Š., Hrdlička, Z., & Vopička, O. (2021). Comparison of Pervaporation and Perstraction for the Separation of p-xylene/m-xylene Mixtures Using PDMS and CTA Membranes. *Separation and Purification Technology*, 274(January), 118986. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118986>

- Dutta, S., & Nath, K. (2018). Prospect of ionic liquids and deep eutectic solvents as new generation draw solution in forward osmosis process. *Journal of Water Process Engineering*, 21(August 2017), 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.12.012>
- Echevarría Villa, D. (2018) *Membranas compuestas con selectividad mejorada para la separación de butanol mediante pervaporación*. La Universidad De Cantabria Y La Universidad Del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. Cantabria, España.
- Egorova, K.S., Gordeev, E.G., Ananikov, V.P., Zelinsky, N.D. (2017) Biological Activity of Ionic Liquids and Their Application in Pharmaceuticals and Medicine. *Chem. Rev.* 2017, 117, 7132.
- Erdoğan, D. C., & Hasanoğlu, A. (2023). Recovery of Biobutanol from Aqueous Streams by Pervaporation Using Ionic Liquid Based Membranes. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04633-8>
- Figoli, A., Santoro, S., Galiano, F., & Basile, A. (2015). Pervaporation membranes. En *Elsevier eBooks* (pp. 19-63). <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-246-4.00002-7>
- Fleming, A., Wise, R. M., Hansen, H., & Sams, L. (2017). The sustainable development goals: A case study. *Marine Policy*, 86, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.09.019>
- Gallo García, L. A., Tirado Armesto, D. F., & Acevedo Correa, D. (2015). Artículo de Revisión MÉTODOS DE SEPARACIÓN POR PERVAPORACIÓN: UNA REVISIÓN. *Revista ReCiteIA*, 15, 65-78.
- García Bernal, E., De los Ríos, A.P., Hernández Fernández, F.J., Larrosa Guerrero, A., Ginestá, A., Sánchez Segado, S., Lozano, L.J., Godínez, C. (2011) Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT. ISSN 1888-8356. 2011, 4, 66.
- García Ivars J. (2015) *Obtención y caracterización de membranas poliméricas de ultrafiltración de bajo ensuciamiento y estudio de condiciones de fabricación*. Universitat Politècnica de Valencia e Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental.
- Gómez Rossi, B., Cabezas Cornejo, R. (2020) *Desafíos y posibilidades de membranas basadas en solventes eutécticos profundos*. Universidad de Santiago de Chile. Santiago de Chile. [http://usach.primo.exlibris.com/permalink56USACH\\_INST/dp0ber/alma99199794086116](http://usach.primo.exlibris.com/permalink56USACH_INST/dp0ber/alma99199794086116)

- Hirota, Y., Michiwaki, M., Ikeda, A., & Araki, S. (2024). Pervaporation properties of silylated ionic liquid-derived organosilica membrane. *Journal Of Membrane Science*, 694, 122392. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.122392>
- Hospido, A., & Rodríguez, H. (2019). Life Cycle Assessment (LCA) of Ionic Liquids. In S. Zhang (Ed.), *Encyclopedia of Ionic Liquids* (pp. 1-9). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6739-6\\_54-1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6739-6_54-1)
- Huang, H. J., Ramaswamy, S., & Liu, Y. (2014). Separation and purification of biobutanol during bioconversion of biomass. *Separation and Purification Technology*, 132, 513–540. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.06.013>
- Imperato, G., König, B., Chiappe, C. (2007) Ionic Green Solvents from Renewable Resources. *Eur. J. Org. Chem.* 2007,1049.
- Izák, P., Ruth, W., Fei, Z., Dyson, P. J., & Kragl, U. (2008). Selective removal of acetone and butan-1-ol from water with supported ionic liquid–polydimethylsiloxane membrane by pervaporation. *Chemical Engineering Journal*, 139(2), 318-321. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.08.001>
- Jessop, P. G. (2018). Fundamental properties and practical applications of ionic liquids: concluding remarks [10.1039/C7FD90090B]. *Faraday Discussions*, 206(0), 587-601. <https://doi.org/10.1039/C7FD90090B>
- Karlsson, G. Tragardh Applications of pervaporation in food processing *Trends Food Sci. Technol.*, 7 (1996), pp. 78-83
- Khulbe, K.C., Feng, C., y Matsuura, T. (2010). “The art of surface modification of synthetic polymeric membranes.” *Journal of Applied Polymer Science* 115, p. 855-895.
- Koros, William J; MA, Y, H; Shimidzu, T. (1996). Terminology for Membranes and. *Pure & Appl. Chemicals*, 68(7), 1479–1489.
- Knozowska, K., Kujawska, A., Kujawa, J., Kujawski, W., Bryjak, M., Chrzanowska, E., & Kujawski, J. K. (2017). Performance of commercial composite hydrophobic membranes applied for pervaporative reclamation of acetone, butanol, and ethanol from aqueous solutions: Binary mixtures. *Separation and Purification Technology*, 188, 512–522. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2017.07.072>
- Li, W., Molina-Fernández, C., Estager, J., Monbaliu, J. M., Debecker, D. P., & Luis, P. (2020). Supported ionic liquid membranes for the separation of

- methanol/dimethyl carbonate mixtures by pervaporation. *Journal Of Membrane Science*, 598, 117790. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117790>
- Li, Y., Li, S., Xu, L., Mao, H., Zhang, A., & Zhao, Z. (2022). Highly selective PDMS membranes embedded with ILs-decorated halloysite nanotubes for ethyl acetate pervaporation separation. *Separation And Purification Technology*, 298, 121552. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121552>
- Li, Y., Thomas, E. R., Molina, M. H., Mann, S., Walker, W. S., Lind, M. L., & Perreault, F. (2023). Desalination by membrane pervaporation: A review [Review]. *Desalination*, 547, Article 116223. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116223>
- Lin, Y.-F., Fang, Y.-X., Xu, Z.-L., & Taymazov, D. (2023). SUZ-4 zeolite interlayer enhanced thin-film composite pervaporation membrane for ethanol dehydration. *Separation and Purification Technology*, 314, 123587. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123587>
- Lipnizki, F.; Trägårdh, G. (2001) Modelling of pervaporation: Models to analyze and predict the mass transport in pervaporation. *Sep. Purif. Methods*, 30 (1): 49 – 125.
- Lou, Z., Li, T., Tao, X., Zhou, X., Zhao, W., Cui, J., Feng, X., Yu, H., Wang, Y., Shan, W., & Xiong, Y. (2024). A novel blending nanofibrous membrane of Poly (ionic liquid) for efficient and fast adsorption of  $\text{ReO}_4^-$ . *Journal Of Membrane Science*, 692, 122285. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.122285>
- Lukin, I., Merz, J., & Schembecker, G. (2018). Techniques for the recovery of volatile aroma compounds from biochemical broth: A review. *Flavour And Fragrance Journal*, 33(3), 203-216. <https://doi.org/10.1002/ffj.3447>
- Makroo, H. A., Naqash, F., & Fayaz, S. (2021). Chapter 23 - Antimicrobial compounds to improve foods' shelf life. In C. M. Galanakis (Ed.), *Food Waste Recovery (Second Edition)* (pp. 461-482). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820563-1.00020-2>
- Maqueda Marín, D. P. (2023). Transporte selectivo de nutrientes a través de membranas poliméricas de inclusión basadas en líquidos iónicos. [TESIS DOCTORAL, Universidad de Murcia]. [https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/140580/1/Maqueda-Mar%C3%ADn-Diego%20Pedro\\_TD\\_2024.pdf](https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/140580/1/Maqueda-Mar%C3%ADn-Diego%20Pedro_TD_2024.pdf)

- Matiacevich, S., Soto Madrid, D., & Gutiérrez Cutiño, M. (2023). Economía circular: obtención y encapsulación de compuestos polifenólicos provenientes de residuos agroindustriales. *RIVAR (Santiago)*, 10, 77-100. [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0719-49942023000100077&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-49942023000100077&nrm=iso)
- Matzke, M., Stolte, S., Thiele, K., Juffernholz, T., Arning, J., Ranke, J., Welz-Biermann, U., Jastorff, B. (2007). The influence of anion species on the toxicity of 1 alkyl-3-methylimidazolium ionic liquids observed in an (eco)toxicological test battery. *Green Chem.* 2007, 9, 1198
- Martínez, L. P. (1998). Caracterización Estructural y Superficial de Membranas Microscópicas. 3–15.
- Membrane processes. (2018). En Wiley eBooks. <https://doi.org/10.1002/9781119418399>
- Mercado Latinoamericano de Aroma Chemicals, Informe, Análisis 2024-2032, (2023)
- Montoya, D., Juaristi, E., Sepúlveda-Aguirre, J., & Bocanegra, J. E. M. (2017). Los líquidos iónicos como prometedores catalizadores en síntesis orgánica: una contribución a la química sostenible. *Revista Lasallista de Investigación*, 14(2), 171. <https://doi.org/10.22507/rli.v14n2a16>
- Nath, K. (2017). *Membrane separation processes*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Nunes, S. P. (2001). *Membrane Technology: In the Chemical Industry*. Wiley-VCH.
- Objetivo 9 | Objetivos de desarrollo sostenible. (s. f.). <https://www.ods.cr/es/objetivo/objetivo-9>
- Olsson, J., Trägårdh, G., & Lipnizki, F. (2002). The influence of permeant and membrane properties on mass transfer in pervaporation of volatile organic compounds from dilute aqueous solutions. *Separation Science and Technology*, 37(6), 1199–1223. <https://doi.org/10.1081/SS-120002607>
- Ong, Y. T., & Tan, S. H. (2016). Pervaporation separation of a ternary azeotrope containing ethyl acetate, ethanol and water using a buckypaper supported ionic liquid membrane. *Process Safety And Environmental Protection/Transactions Of The Institution Of Chemical Engineers. Part B, Process Safety And Environmental Protection/Chemical Engineering Research And Design/Chemical*

Engineering Research & Design, 109, 116-126.  
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.051>

Ortega López de Prado, J.J., y Blanco Fernández, M. (1982). Identificación de compuestos orgánicos por espectroscopía infrarroja. España. Ministerio de Fomento.

Overington, A. R., Wong, M., Harrison, J. A., & Ferreira, L. B. (2009). Estimation of Mass Transfer Rates through Hydrophobic Pervaporation Membranes. *Separation Science and Technology*, 44(4), 787-816. <https://doi.org/10.1080/01496390802697106>

Peng, P., Lan, Y., Liang, L., & Jia, K. (2021). Membranes for bioethanol production by pervaporation [Review]. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), Article 10. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01857-y>

Pereira, C.P. Ribeiro Jr., R. Nobrega, C.P. Borges (2006). Pervaporative recovery of volatile aroma compounds from fruit juices J. Membr. Sci., 274 (2006), pp. 1-23

Pereira, M. J., Brazinha, C., & Crespo, J. G. (2022). Pervaporation recovery of valuable aromas from by-products of the seafood industry: Modelling of fractionated condensation for off-flavour removal. *Separation and Purification Technology*, 286, 120441. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120441>

Plaza, A., Merlet, G., Hasanoğlu, A., Isaacs, M., Sánchez, J., & Romero, J. (2013). Separation of butanol from ABE mixtures by sweep gas pervaporation using a supported gelled ionic liquid membrane: Analysis of transport phenomena and selectivity. *Journal Of Membrane Science*, 444, 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.04.034>

Rahimpour, A. (2011). "UV photo-grafting of hydrophilic monomers onto the surface of nano-porous PES membranes for improving surface properties." *Desalination* 265, p. 93-101.

Rdzanek, P., Marszałek, J., & Kamiński, W. (2018b). Biobutanol concentration by pervaporation using supported ionic liquid membranes. *Separation And Purification Technology*, 196, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.10.010>

Rodriguez Celma, I. (2017). Líquidos iónicos. Propiedades, síntesis y aplicaciones. [http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Irodriguez/Rodriguez\\_Celma\\_ignacio\\_TFM.pdf](http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Irodriguez/Rodriguez_Celma_ignacio_TFM.pdf)

- Sadidi, M., Hajilary, N., & Abbasi, F. (2023). Fabrication of a new composite membrane consisting of MXene/PES /PEI for biofuel dehydration via pervaporation. *Results in Engineering*, 18, 101071. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101071>
- Salgado, C. M., Fernández-Fernández, E., Palacio, L., Carmona, F. J., Hernández, A., Prádanos, P. (2017). Application of pervaporation and nanofiltration membrane processes for the elaboration of full-flavored low alcohol white wines. *Food and Bioproducts Processing*, 101, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.10.001>
- Uragami, T., Fukuyama, E., & Miyata, T. (2016). Selective removal of dilute benzene from water by poly(methyl methacrylate)-graft-poly(dimethylsiloxane) membranes containing hydrophobic ionic liquid by pervaporation. *Journal Of Membrane Science*, 510, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.01.057>
- Uribe Marín, F., Romero Figueroa, J. (2014) *Extracción de butanol desde soluciones modelo de fermentación ABE mediante extracción con membranas utilizando un líquido iónico como fase receptora*. Universidad de Santiago de Chile. Santiago de Chile. [http://usach.primo.exlibrisgroup.com/permalink/56USACH\\_INST/1cvcff9/alma990001590610206116](http://usach.primo.exlibrisgroup.com/permalink/56USACH_INST/1cvcff9/alma990001590610206116)
- Voss, B. A., Bara, J. E., Gin, D. L., & Noble, R. D. (2009). Physically Gelled Ionic Liquids: Solid Membrane Materials with Liquidlike CO<sub>2</sub> Gas Transport. *Chemistry Of Materials*, 21(14), 3027-3029. <https://doi.org/10.1021/cm900726p>
- Wang, Y., Zhang, L., Zhang, X., & Li, J. (2024). Mixed matrix membranes consisting of PDMS and IL@MoS<sub>2</sub> for enhancing 2-phenylethanol pervaporation separation. *Journal Of Membrane Science*, 122947. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122947>
- Wilkes, J.S. (2004). Properties of ionic liquid solvents for catalysis. *J. Mol. Catal. A: Chem.* 2004, 214, 11.
- Wu, X., Zha, J., & Koffas, M. A. G. (2020). Microbial production of bioactive chemicals for human health. *Current Opinion in Food Science*, 32, 9-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.007>
- Zhao, S., Zou, L., Tang, C. Y., & Mulcahy, D. (2012). Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges. *Journal of Membrane Science*, 396(51376078), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.12.023>

Ziobrowski, Z., & Rotkegel, A. (2019). Enhanced CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> separation by supported ionic liquid membranes (SILMs) based on PDMS and 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate. *Chemical Engineering Communications*, 208(1), 137-147. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1694916>