

CONAMA 2022

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Estudio de líquidos iónicos como tecnología emergente para la captura de CO₂



Autor Principal: Maria José Tenorio Serrano (URJC - Universidad Rey Juan Carlos)

Otros autores: Baudilio Coto García (URJC); Inmaculada Suárez Muñoz (URJC); Isabel Serrano Gómez (URJC); Julia Díaz Magdaleno (URJC); Diana Murillo Criado (URJC).



ÍNDICE

1. Resumen.....	2
2. Introducción.....	3
3. Metodología.....	5
4. Resultados.....	8
5. Líneas futuras de investigación.....	9
6. Bibliografía	10

1. RESUMEN

Hoy en día, resulta más que evidente la influencia que el cambio climático está teniendo en el planeta debido, mayormente, a los gases de efecto invernadero y, en especial, al dióxido de carbono (CO₂), producidos por el consumo de combustibles fósiles. Dado que no se prevé un cese cercano en el uso de estos combustibles, se hace imprescindible la búsqueda de estrategias y tecnologías que sirvan para reducir las emisiones de CO₂ atmosféricas ya existentes y que puedan ser almacenadas o convertidas en compuestos con alto valor añadido. De este modo, además de combatir los efectos del cambio climático, se haría posible reducir la gran dependencia que tiene la sociedad actual de los compuestos fósiles. Así pues, se propone el uso de líquidos iónicos (LIs) como tecnología emergente para la absorción de CO₂ de la atmósfera, siendo estos, además, considerados disolvente verdes.

En el presente estudio se han elegido líquidos iónicos con cationes basados en anillos aromáticos de imidazolio: [BMIm][AcO], [EMIm][AcO], [EMIm][EtSO₄] y [EMIm][DCA], los cuales han sido sometidos a distintas metodologías para estudiar su capacidad de absorción de CO₂ en diferentes condiciones de presión y temperatura. Los experimentos resultantes (LI+CO₂) han sido caracterizados por diferentes técnicas fisicoquímicas: ATR-IR, ¹H-RMN, ¹³C-RMN y KF. Se propone un método para determinar la cantidad de CO₂ absorbido mediante ¹H-RMN. Por otro lado, se utilizó el modelo de simulación molecular COSMO-RS para estudiar los líquidos iónicos elegidos y la solubilidad del CO₂ en ellos.

Los resultados obtenidos muestran que únicamente los líquidos [BMIm][AcO] y [EMIm][AcO] son capaces de absorber el gas contaminante de manera permanente, es decir por absorción química, debido a su mayor carácter básico. Se observa el efecto de la presión, de la temperatura y del método experimental para la absorción, siendo la metodología más eficaz para capturar CO₂, el sistema de burbujeo a presión constante.

De forma preliminar, se está llevando a cabo un estudio para determinar las condiciones de desorción del CO₂ del líquido iónico mediante tratamiento térmico con N₂ a presión atmosférica y/o a vacío. El interés de esta segunda etapa del proceso radica en poder recuperar el líquido iónico y reutilizarlo, haciendo el proceso totalmente sostenible.

2. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha convertido en una de las preocupaciones más comunes la sociedad actual y es uno de los mayores desafíos a los que se enfrentan los países a nivel mundial [1], [2]. Este, se ve afectado principalmente por el calentamiento global, causado en su mayoría por los gases de efecto invernadero (GEI) [3] y representa una amenaza urgente, dado que supondrá el aumento en aproximadamente 2 °C de la temperatura global para finales de este siglo [2].

Dentro de los GEI, el dióxido de carbono (CO₂) es considerado uno de los más influyentes según el protocolo de Kyoto (1998) [4]. Además, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) afirma que alrededor del 79% de las emisiones totales de CO₂ provienen de combustibles fósiles y minerales usados para la generación de energía [3], cuyo consumo ha ido en aumento desde la Revolución Industrial, incrementando de manera constante la emisión de GEI a la atmosfera [5], [6].

El CO₂ permanece más tiempo que otros gases en la atmósfera [3] y se ha estimado su incremento en un 2,6% anual entre los años 2000 y 2013 [7]. A concentraciones en el aire del 1,5% se convierte en una toxina, ocasionando una reducción del rendimiento cognitivo y problemas fisiológicos más severos ante un mayor aumento en los niveles de exposición [6]. En la vigésimo sexta Conferencia de las Partes (COP26) se reafirmó el objetivo propuesto en el Pacto de París de mantener el incremento de la temperatura media mundial por debajo de los 2 °C y tratar de no superar 1,5 °C [8].

En los últimos años, se están desarrollando tecnologías basadas en las emisiones negativas de CO₂ (*Negative Emission Technology*, NET). Las NET llevan a cabo la eliminación del CO₂ atmosférico mediante técnicas como la captura química de CO₂ del aire, lo que se denomina captura directa del aire (*Direct air capture*, DAC) [9]. Mediante esta tecnología, el CO₂ del aire es capturado por un agente separador que, a continuación, es regenerado con calor, agua o ambos, liberando CO₂ altamente puro para su posterior almacenamiento geológico, mineralización o utilización. Estos sistemas no tienen que estar necesariamente conectados y reducir las emisiones de una fuente de emisión localizada, sino que pueden centralizarse y ubicarse junto al sitio de almacenamiento y procesamiento del CO₂ o de recursos de energía renovable. Por ello, la ventaja de DAC es su capacidad para abordar las emisiones presentes y pasadas de fuentes distribuidas y móviles, tales como las originarias del sector transporte, inaccesibles a la captura de fuentes puntuales.

Sin embargo, quedan dos retos por resolver en esta tecnología, el primero es la necesidad de grandes flujos de aire para la captura de una cantidad relativamente pequeña de CO₂; el segundo, son los recursos necesarios para regenerar el agente de separación [10]–[12]. Tras ser el CO₂ regenerado, en una etapa posterior puede ser almacenado en antiguos pozos petrolíferos “secos”, lo que se denomina captura y almacenamiento/secuestro de carbono (*Carbon Capture and Storage/Sequestration*, CCS), o bien puede ser utilizado en procesos denominados captura y utilización de carbono (*Carbon Capture and Utilization*, CCU) [5].

De modo que, en la última década, el CO₂ está adquiriendo un creciente interés para la industria debido a su uso como fuente de carbono y precursor para la síntesis de una gran variedad de compuestos orgánicos con alto valor añadido. Gracias a este interés, además de adoptar medidas de urgencia ante las emisiones de CO₂ a la atmósfera y combatir los efectos del cambio

climático, se permite reducir la gran dependencia que tiene la sociedad actual de los compuestos fósiles [13]. En función del proceso o instalación de producción de energía a la que se aplican estas tecnologías, existen tres procesos principales para la captura del CO₂: precombustión, postcombustión y oxcombustión. De estos tres, la precombustión es la opción más apropiada para la reconversión en las plantas de combustible existentes sin necesidad de grandes modificaciones [3], [14] y a la que se enfocan las investigaciones realizadas en el presente trabajo.

Hoy en día, la utilización de compuestos químicos derivados de las aminas como absorbentes en la captura de CO₂ parece resultar la opción más viable reduciendo las emisiones de manera significativa. Se produce una absorción química en la que las aminas reaccionan con el gas, dando como resultado la formación de carbamatos. Este método ha sido usado durante años para la eliminación de gases ácidos del gas natural y del CO₂ de gases mixtos a baja presión parcial, como en los gases de combustión. No obstante, presentan algunos inconvenientes que afectan a la capacidad de captura, por ejemplo, problemas de corrosión y ambientales, debidos a la volatilización y degradación, que hacen que aumenten de manera importante los costes de operación. Otra desventaja, es una limitación desde el punto de vista energético, ya que la regeneración de la amina para su reutilización por descomposición del carbamato requiere de mucha energía haciendo que este proceso no sea favorable. Por estos motivos, surge la necesidad de encontrar nuevos compuestos más eficientes para la captura de CO₂ y su posterior reutilización. Una de las alternativas que está generando mayor interés son los líquidos iónicos (LIs) [14].

Los líquidos iónicos exhiben gran versatilidad, son considerados compuestos multifuncionales y presentan grandes avances en los procesos de captura/absorción de CO₂. Químicamente, los líquidos iónicos son sales compuestas por un catión orgánico y un anión que puede ser tanto orgánico como inorgánico. Presentan puntos de fusión inferior a 100°C, presión de vapor insignificante, lo que les confiere de una volatilidad prácticamente nula, alta estabilidad térmica y química, baja inflamabilidad y alta capacidad disolvente. Además, mediante una adecuada selección del catión y el anión, las propiedades físicas y químicas pueden ser modificadas para adaptarse a la aplicación deseada [1], [3], [6], [7], [15].

Así pues, los líquidos iónicos son considerados como alternativa de bajo impacto a los disolventes orgánicos convencionales (González Miquel, 2013), clasificándose, así, como disolventes verdes [17]. Cabe destacar que los LIs poseen naturaleza higroscópica, lo que conlleva que hasta los más hidrofóbicos absorben cierta cantidad de agua de la atmósfera [15] Aunque pueden presentar algún inconveniente, como su alta viscosidad y coste [7] son fácilmente recuperables mediante extracción pudiéndose reutilizar.

Para la captura de CO₂ por parte de los líquidos iónicos existen dos mecanismos, la absorción física o fisisorción y la absorción química o quimisorción. La absorción física es el mecanismo por el que la mayoría de los líquidos investigados hasta la actualidad absorben CO₂. Este tipo de absorción se basa en uniones débiles entre el CO₂ y el líquido iónico, estando sujeto a efectos entrópicos.

En la fisisorción, la cantidad de gas absorbida es mayor según aumenta la presión y disminuye la temperatura. El CO₂ ocupa el volumen libre que existe en el líquido interactuando con sus iones, mediante fuerzas de Van der Waals y sin influir significativamente en la estructura del líquido

iónico. En este caso, el requerimiento energético para recuperar el gas absorbido es bajo debido a la baja entalpía de absorción, por lo que con un pequeño aumento de la temperatura o disminución de la presión sería suficiente. La absorción física está principalmente influenciada por el tipo de anión [15], [18], [19].

En la absorción química, el proceso conlleva la formación de un nuevo enlace químico entre el gas y los grupos funcionales presentes en la estructura química del líquido iónico, dando como resultado una estructura química compleja o un aducto [18], [20], [21]. Para conseguir una capacidad de absorción química eficiente es necesario estudiar grupos funcionales con capacidad de establecer enlaces covalentes específicos con el CO₂, originando lo que se conocen como líquidos iónicos funcionalizados o TSILs (*Task-specific ionic liquids*) [15]. El proceso de quimisorción conduce a una mayor capacidad de absorción del gas, no obstante, debido a los enlaces covalentes formados, se requiere de energía suficiente para romperlos y poder recuperar el CO₂, por lo que son necesarias temperaturas de proceso más altas que para la absorción física [18], [19], [22].

En último lugar, para conseguir la regeneración del CO₂, este se separa del absorbente mediante energía que puede ser proporcionada por medio de calor, la aplicación de una presión cercana al vacío o por humedad. Es posible realizar diferentes combinaciones de estas tres y las condiciones óptimas dependerán del tipo de líquido iónico. [23].

En este proyecto también se propone realizar un estudio teórico mediante COSMO-RS (*Conductor-like Screening Model for Real Solvents*) para la selección y diseño de los líquidos iónicos más adecuados para la captura de CO₂. COSMO-RS es un modelo de estudio predictivo de propiedades de compuestos puros y mezclas en fase líquida mediante aproximaciones de termodinámica estadística haciendo uso de información obtenida a partir de cálculos mecanocuánticos unimoleculares para las moléculas individuales. El uso de COSMO-RS presenta una gran ventaja en este estudio ya que permite la comprensión esencial a nivel molecular del proceso, entender las interacciones soluto-disolvente y, de este modo, tener la posibilidad de proponer nuevos sistemas con cualidades mejoradas [15], [24].

3. METODOLOGÍA

Los líquidos iónicos seleccionados para este estudio son: acetato de 1-butil-3-metilimidazolio [BMIm][AcO], acetato de 1-etil-3-metilimidazolio [EMIm][AcO], sulfato de etilo de 1-etil-3-metilimidazolio [EMIm][EtSO₄] y dicianamida de 1-etil-3-metilimidazolio [EMIm][DCA].

Se han propuesto 2 metodologías para estudiar la capacidad de absorción de los líquidos iónicos controlando las variables del proceso: temperatura, presión y tiempo. Los procedimientos experimentales llevados a cabo son: absorción de CO₂ utilizando un reactor de acero de alta presión y temperatura controlada (figura 1). Este método permite estudiar la capacidad máxima de absorción de los líquidos iónicos a diferentes condiciones de presión y temperatura. Se coloca en el interior del reactor de acero un vial donde se encuentra una cantidad conocida del líquido iónico seleccionado y un imán para favorecer la absorción mediante agitación. Se cierra el reactor. Se purga para eliminar el aire del interior y se llena con CO₂ conectándolo directamente a una botella de CO₂. La entrada de gas se controla mediante la válvula de regulación que posee el reactor en la línea de entrada. Cuando se alcanza la presión deseada, se cierra la válvula y el

reactor queda completamente cerrado. El reactor se calienta mediante una camisa calefactora conectada a un controlador de temperatura y dos sondas termopares que permiten conocer la temperatura de la camisa y del interior del reactor. El reactor se deja en estas condiciones el tiempo de experimento que se determine.

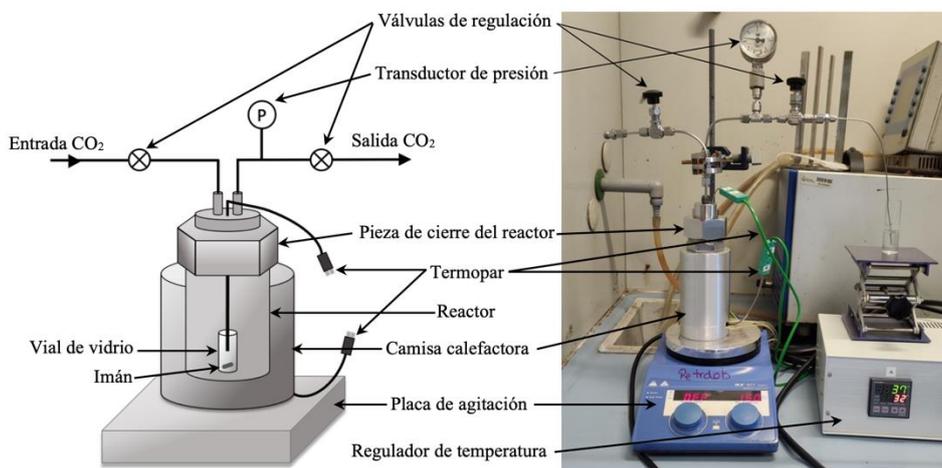


Figura 1. Reactor de acero de alta presión y temperatura para la absorción de CO₂ con LIs

El reactor de alta presión y temperatura es un sistema estático, la absorción del CO₂ va a depender de la solubilidad del gas en las condiciones de presión y temperatura de operación. El CO₂ disponible para la absorción está en exceso en el medio para asegurar una óptima absorción.

El otro método empleado es la absorción de CO₂ mediante burbujeo continuado de CO₂ a presión atmosférica y una temperatura determinada, directamente en el líquido iónico en un matraz de vidrio (figura 2). En primer lugar, se añade una cantidad conocida de LI a un matraz de vidrio de fondo redondo al que se introduce un imán de teflón, para conseguir nuevamente una buena agitación. Este matraz se introduce en un baño de silicona para asegurar el mantenimiento de la temperatura constante y todo ello se coloca encima de una placa de agitación y calentamiento provista de un termopar encargado de medir la temperatura. El matraz se sella con un septum en el que se inserta un tubo de acero inoxidable de 1/16" de diámetro cuyo extremo de salida está directamente en el interior del líquido, de esta manera se introduce el CO₂ y se consigue un burbujeo constante. En el mismo septum se inserta una aguja de jeringa que permita la salida del CO₂ para evitar sobrepresión en el matraz. De este modo obtenemos un flujo abierto de entrada y salida continua de gas.

Una vez transcurrido el tiempo de experimento estimado, se vuelve a pesar el matraz para comprobar si se ha producido un incremento de masa. Se podría asumir que este incremento es debido al CO₂ absorbido en el líquido iónico y/o CO₂ disuelto en el líquido, pero sin ser absorbido químicamente.

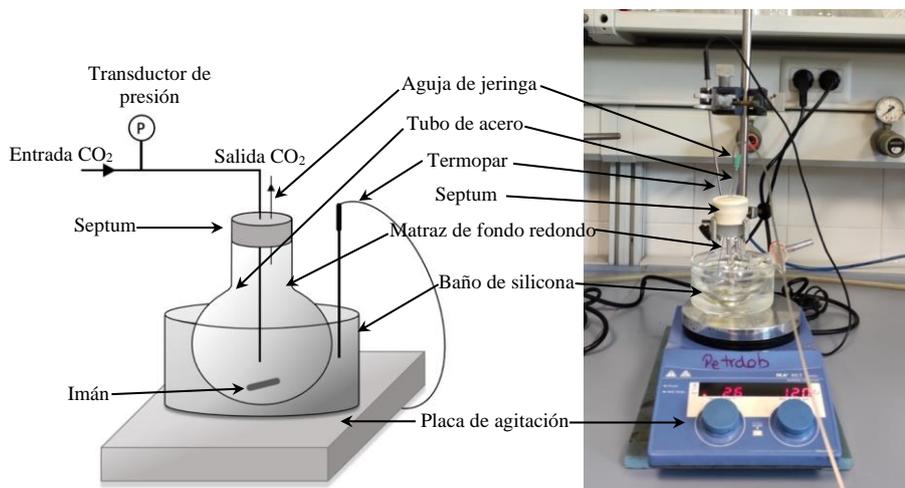


Figura 2. Esquema del método de burbujeo de CO₂ a presión atmosférica en líquidos iónicos.

Se emplearon diferentes técnicas de caracterización típicas con el propósito de analizar las propiedades tanto de los LIs puros como de los experimentos llevados a cabo.

- Reflectancia total atenuada (ATR-IR). Esta técnica fue utilizada para conseguir el espectro con los rasgos característicos de cada LI y el de sus experimentos, obteniendo información estructural y composicional lo que permite comprobar la presencia de CO₂ y de las interacciones debidas a la absorción en estos últimos.
- Espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN), mediante la que se estudiaron los núcleos de ¹H (¹H-RMN o RMN de protón) y de ¹³C (¹³C-RMN) para obtener la estructura molecular de los LIs y cuantificar la cantidad de CO₂ absorbido en el líquido iónico.
- Titulación Karl Fischer (KF). Es un procedimiento de valoración utilizado para determinar el contenido de agua de los distintos líquidos. El contenido de humedad del líquido puede influir negativamente en el proceso de absorción y por lo tanto es conveniente conocer la cantidad de agua presente.
- Análisis termogravimétrico (ATG). Es una técnica analítica mediante la cual se registra de forma continua la variación que experimenta la masa de una muestra en una atmósfera controlada en función de la temperatura y el tiempo[25]. La técnica ha sido empleada para estudiar el proceso de desorción del CO₂ de los experimentos realizados con los LIs mediante un tratamiento térmico en N₂.

Por último, la simulación molecular utilizando COSMO-RS permite obtener de forma teórica la polarización de la densidad de carga (σ) que ocurre en la interfase soluto-disolvente, calculando la interacción entre moléculas a partir de sus densidades electrónicas según lo determinado por la teoría funcional de la densidad [15], [26]. Este modelo ha sido usado para estudiar el comportamiento básico de los aniones de los LIs y predecir las solubilidades de CO₂ en los LIs estudiados.

4. RESULTADOS

Para comprobar la absorción de CO₂ se utilizó primeramente la ATR-IR, mediante la que se compararon para ambas metodologías los espectros de cada uno de los LIs puros con los de sus respectivos experimentos y comprobar así la presencia o no de CO₂ enlazado.

Se observa la aparición de nuevas señales indicativas de la formación de un enlace entre la molécula de CO₂ y el catión del LI en los espectros de [BMIM] [AcO] y [EMIM] [AcO]. Los espectros de infrarrojo para [EMIM][EtSO₄] y el [EMIM][DCA] antes y después del proceso de absorción no muestran diferencias significativas, lo que permite deducir que la absorción no se da, el CO₂ no se enlaza, al menos de manera permanente, al líquido iónico, tanto para los líquidos puros como para los experimentos.

Se compararon los dos métodos experimentales utilizados para la absorción de CO₂ en los dos líquidos que presentan buenos resultados, como se recoge en el cuadro 1. Para poder realizar una comparación efectiva, se escogieron dos experimentos realizados bajo las mismas condiciones de presión y temperatura. En el análisis de los espectros de ATR-IR, se observa que con ambos métodos se consiguen los picos asociados a la absorción. Aunque, con esta técnica no es posible realizar una cuantificación del CO₂ absorbido en el líquido, sin embargo, es útil para tener un primer conocimiento de la existencia o no de esta absorción y una aproximación a las que podrían ser las mejores condiciones de reacción.

Por otro lado, tanto los LIs puros como los experimentos fueron caracterizados mediante RMN, a partir de la cual, además, se desarrolla un método de cuantificación de la absorción de CO₂ en el LI. Estos resultados se presentan en el cuadro 1 como fracción molar de CO₂ absorbido en el LI (xCO₂). La resonancia magnética nuclear confirma que los únicos líquidos con la capacidad de absorber CO₂ de forma permanente fueron el [BMIM][AcO] y el [EMIM][AcO].

Cuadro 1. Fracciones molares de CO₂ absorbido (xCO₂) obtenidas por ¹H-RMN, según condiciones de presión, temperatura y tiempo de reacción

Método	P _{CO2} (bar)	T (°C)	t (h)	[BMIM] [AcO]	[EMIM] [AcO]
				xCO ₂	xCO ₂
Burbujeo	1	25	6	0,120	0,232
Burbujeo		30	20	0,257	0,124
Reactor		30	0,25	0,093	0,130
Reactor		30	20	0,203	0,215
Reactor		50	20	0,116	0,107
Reactor		4	30	20	0,238
Reactor	50		20	0,184	0,301

A la vista de los resultados, se pueden establecer de forma preliminar las condiciones de reacción óptimas. Para el [BMIM][AcO], se observa que este sigue las tendencias esperadas, obteniendo absorciones de gas más altas a presión de 4 bar y temperatura de 30°C. Siendo las fracciones molares de CO₂ 0,238 para el reactor y 0,257 para el método del burbujeo. Sin embargo, se ha podido ver que para el [EMIM][AcO] este aumento de la absorción del gas se

cumple a la presión más baja (1 bar), con una fracción molar de 0,215 a 30 °C, pero no a presión más alta (4 bar), donde la fracción molar más alta se consigue a 50 °C, siendo esta 0,301.

Igualmente, se observa que los tiempos de reacción tienen gran influencia en el proceso de absorción, consiguiéndose a tiempos bajos resultados considerablemente buenos en relación con el tiempo de 20 h, lo que puede indicar que los tiempos largos no son realmente necesarios para obtener la cantidad máxima absorbida.

En cuanto a las dos metodologías utilizadas, se ha visto que mediante la absorción por burbujeo se consiguen fracciones molares de CO₂ absorbido más altas, pero este método no permite modificar la presión del proceso ya que se realiza a presión atmosférica. Mientras que utilizando el reactor la modificación de la presión permite utilizar presiones de gas por encima de la presión atmosférica, pudiendo así conocer la capacidad de absorción de los LIs en condiciones más extremas para fuentes de emisión determinadas, como salidas de gases de combustión. Por lo que cada metodología puede ser aplicada en condiciones distintas en función de las necesidades de la aplicación o la fuente de emisión de contaminantes.

Los resultados obtenidos mediante el modelo COSMO-RS, establecen diagramas del perfil σ del anión [AcO]⁻ demostrando su mayor carácter básico, respaldando el hecho de que aquellos LIs que poseen acetato como anión sean los únicos estudiados en este trabajo capaces de absorber CO₂ mediante una interacción permanente.

5. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Como se ha podido comprobar en los resultados presentados en este trabajo, los líquidos iónicos resultan una alternativa viable para sustituir los disolventes tradicionales en la captura de CO₂. Sin embargo, se requiere de mayor estudio y conocimiento de esta tecnología para llegar a resultados eficaces tanto energética como ambiental y económicamente rentables. Es necesario una investigación más exhaustiva y detallada. Teniendo esto en cuenta, en este trabajo se proponen diferentes futuras líneas de investigación:

- Seguir desarrollando el estudio de desorción para corroborar la efectiva separación del gas contaminante, así como las mejores condiciones para llevarla a cabo, permitiendo el reciclaje del LI y del CO₂ para su posterior utilización en diversas aplicaciones.
- Optimizar los tiempos de reacción para conseguir la máxima absorción en las condiciones de operación
- Diseñar nuevos LIs por combinación de adecuados cationes y aniones, incluyendo el diseño y desarrollo de líquidos iónicos soportados que permitirían mejorar las capacidades de absorción los líquidos ya existentes.
- Trasladar el estudio a condiciones ambientales reales, por ejemplo, utilizando mezclas de gases (N₂, CO₂, NO_x, H₂O...) incluyendo contaminantes atmosféricos distintos del CO₂.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Noorani y A. Mehrdad, «Experimental and theoretical study of CO₂ sorption in biocompatible and biodegradable cholinium-based ionic liquids», *Sep Purif Technol*, vol. 254, ene. 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2020.117609.
- [2] N. Noorani, A. Mehrdad, y R. Zarei diznab, «Thermodynamic study on carbon dioxide absorption in vinyl imidazolium–amino acid ionic liquids», *Fluid Phase Equilib*, vol. 557, jun. 2022, doi: 10.1016/j.fluid.2022.113433.
- [3] M. Aghaie, N. Rezaei, y S. Zندهboudi, «A systematic review on CO₂ capture with ionic liquids: Current status and future prospects», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 502-525, nov. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.004.
- [4] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), *Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amounts*. 2018.
- [5] A. Rafiee, K. Rajab Khalilpour, D. Milani, y M. Panahi, «Trends in CO₂ conversion and utilization: A review from process systems perspective», *J Environ Chem Eng*, vol. 6, n.º 5, pp. 5771-5794, oct. 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.08.065.
- [6] Y. Y. Lee, K. Edgehouse, A. Klemm, H. Mao, E. Pentzer, y B. Gurkan, «Capsules of Reactive Ionic Liquids for Selective Capture of Carbon Dioxide at Low Concentrations», *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 12, n.º 16, pp. 19184-19193, abr. 2020, doi: 10.1021/acsami.0c01622.
- [7] Y. Wu, J. Xu, K. Mumford, G. W. Stevens, W. Fei, y Y. Wang, «Recent advances in carbon dioxide capture and utilization with amines and ionic liquids», *Green Chemical Engineering*, vol. 1, n.º 1, pp. 16-32, sep. 2020, doi: 10.1016/j.gce.2020.09.005.
- [8] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), «Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its third session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021», 2022. [En línea]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [9] F. Barzagli, C. Giorgi, F. Mani, y M. Peruzzini, «Screening Study of Different Amine-Based Solutions as Sorbents for Direct CO₂ Capture from Air», *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 8, n.º 37, pp. 14013-14021, sep. 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.0c03800.
- [10] J. A. Wurzbacher, C. Gebald, N. Piatkowski, y A. Steinfeld, «Concurrent separation of CO₂ and H₂O from air by a temperature-vacuum swing adsorption/desorption cycle», *Environ Sci Technol*, vol. 46, n.º 16, pp. 9191-9198, ago. 2012, doi: 10.1021/es301953k.
- [11] The Royal Society y Royal Academy of Engineering, «Greenhouse gas removal.», 2018.
- [12] K. S. Lackner, S. Brennan, J. M. Matter, A.-H. A. Park, A. Wright, y B. van der Zwaan, «The urgency of the development of CO₂ capture from ambient air», *Proceedings of the*

- National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109, pp. 13156-13162, 2012, doi: 10.1073/pnas.1108765109/-/DCSupplemental.
- [13] G. Centi, E. A. Quadrelli, y S. Perathoner, «Catalysis for CO₂ conversion: A key technology for rapid introduction of renewable energy in the value chain of chemical industries», *Energy and Environmental Science*, vol. 6, n.º 6, pp. 1711-1731, jun. 2013. doi: 10.1039/c3ee00056g.
- [14] M. P. Gimeno, M. C. Mayoral, y J. M. Andrés, «Influence of temperature on CO₂ absorption rate and capacity in ionic liquids», *Energy and Fuels*, vol. 27, n.º 7, pp. 3928-3935, jul. 2013, doi: 10.1021/ef401063r.
- [15] C. Moya Álamo, «Captura de CO₂ mediante operaciones de separación basadas en líquidos iónicos», Universidad Autónoma, Madrid, 2017.
- [16] M. González Miquel, «Captura de gases sobre líquidos iónicos: aplicación a los casos del CO₂ y NH₃», Universidad Complutense, Madrid, 2013.
- [17] S. Keskin, D. Kayrak-Talay, U. Akman, y Ö. Hortaçsu, «A review of ionic liquids towards supercritical fluid applications», *Journal of Supercritical Fluids*, vol. 43, n.º 1, pp. 150-180, nov. 2007, doi: 10.1016/j.supflu.2007.05.013.
- [18] A. M. Pinto Castillo, «Absorption of carbon dioxide in ionic liquids and their mixtures», Santiago de Compostela, 2013.
- [19] A. M. Pinto, H. Rodríguez, A. Arce, y A. Soto, «Combined physical and chemical absorption of carbon dioxide in a mixture of ionic liquids», *Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 77, pp. 197-205, 2014, doi: 10.1016/j.jct.2013.10.023.
- [20] J. Huang y T. Rüther, «Why are ionic liquids attractive for CO₂ absorption? An overview», *Aust J Chem*, vol. 62, n.º 4, pp. 298-308, 2009, doi: 10.1071/CH08559.
- [21] A. Yokozeki, M. B. Shiflett, C. P. Junk, L. M. Grieco, y T. Foo, «Physical and chemical absorptions of carbon dioxide in room-temperature ionic liquids», *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 112, n.º 51, pp. 16654-16663, dic. 2008, doi: 10.1021/jp805784u.
- [22] M. B. Shiflett, D. J. Kasprzak, C. P. Junk, y A. Yokozeki, «Phase behavior of {carbon dioxide + [bmim][Ac]} mixtures», *Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 40, n.º 1, pp. 25-31, ene. 2008, doi: 10.1016/j.jct.2007.06.003.
- [23] R. P. Wijesiri, G. P. Knowles, H. Yeasmin, A. F. A. Hoadley, y A. L. Chaffee, «Desorption Process for Capturing CO₂ from Air with Supported Amine Sorbent», *Ind Eng Chem Res*, vol. 58, n.º 34, pp. 15606-15618, ago. 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.9b03140.
- [24] J. Palomar, M. Gonzalez-Miquel, A. Polo, y F. Rodriguez, «Understanding the physical absorption of CO₂ in ionic liquids using the COSMO-RS method», *Ind Eng Chem Res*, vol. 50, n.º 6, pp. 3452-3463, mar. 2011, doi: 10.1021/ie101572m.

- [25] M. G. Volonté y P. Quiroga, *Análisis farmacéutico*, 1^a. La Plata: Libros de Cátedra, 2013. [En línea]. Available: <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/85/67/221-1>
- [26] B. Coto, I. Suárez, M. J. Tenorio, S. Nieto, N. Alvarez, y J. L. Peña, «Oil acidity reduction by extraction with imidazolium ionic liquids: Experimental, COSMO description and reutilization study», *Sep Purif Technol*, vol. 254, ene. 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2020.117529.