



Licencia Creative Commons
Atribución/reconocimiento-NoComercial-Compartirigual 4.0 internacional

Producción sostenible de moléculas plataforma mediante Disolventes Eutécticos Profundos (DES)

Andrés F. Monroy, Gustavo A. Pasquale, María E. Pérez, Valeria Palermo, Gerardo A. Caicedo Pineda, José J. Martínez Zambrano

Investigación Joven, (13), e012, recopilaciones temáticas, 2026

<https://doi.org/10.24215/23143991e012>

ISSN 2314-3991 | <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/index>

Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
La Plata, Buenos Aires, Argentina

PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE MOLÉCULAS PLATAFORMA MEDIANTE DISOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS (DES)

SUSTAINABLE PRODUCTION OF PLATFORM MOLECULES USING DEEP EUTECTIC SOLVENTS (DES)

Andrés F. Monroy^{1,2}

andresmonroy@quimica.unlp.edu.ar

<https://orcid.org/0009-0008-9663-8936>

Gustavo A. Pasquale^{1,3}

gustavopasquale2011@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-0382-3143>

María E. Pérez^{1,3}

memiliaperez@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-8416-7839>

Valeria Palermo^{1,3}

vpalermo@quimica.unlp.edu.ar

<https://orcid.org/0000-0003-2965-5265>

Gerardo A. Caicedo Pineda⁴

gerardo.caicedo@uptc.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-2320-0980>

José Jobanny Martínez Zambrano⁴

jose.martinez@uptc.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-4906-7121>

1 | Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

2 | Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA-CCT La Plata-CONICET-CIC-PBA), Argentina.

3 | Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (Química Orgánica Aplicada), Argentina.

4 | Escuela de Ciencias Químicas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Facultad de Ciencias), Colombia.

Recibido: 19/05/2026 - Aceptado: 04/08/2026 - Publicado: 10/09/2026

RESUMEN

Los disolventes eutécticos profundos (DES) han emergido como una opción sostenible frente a los disolventes orgánicos tradicionales en el marco de la química verde y la valorización de biomasa lignocelulósica. Este trabajo analiza de manera integral sus propiedades fisicoquímicas, métodos de síntesis y aplicaciones en la producción de moléculas plataforma de alto valor añadido, tales como 5-hidroximetilfurfural (HMF), ácido levulínico (AL), furfural y derivados furánicos. Los DES, formados por combinaciones de aceptores y donadores de enlaces de hidrógeno, presentan beneficios como baja toxicidad, biodegradabilidad, bajo costo y propiedades ajustables, lo que favorece su implementación en procesos sostenibles.

En el contexto de biorrefinerías, los DES facilitan el pretratamiento de biomasa al reducir su recalcitrancia estructural mediante la disrupción de las redes lignocelulósicas, mejorando la accesibilidad a polisacáridos. Asimismo, actúan como medios de reacción y catalizadores en sistemas homogéneos, lo que incrementa la eficiencia en la conversión de carbohidratos en compuestos de valor. Se destacan aplicaciones en sistemas bifásicos, procesos asistidos por microondas y estrategias integradas de conversión-extracción, con rendimientos elevados y condiciones operativas moderadas.

Particularmente, los DES ácidos han demostrado alta eficacia en la extracción de ácido levulínico, alcanzando rendimientos superiores al 70 % y eficiencias de carbono cercanas al 100 %. Además, su capacidad de reutilización y su integración en procesos de una sola etapa reducen costos y complejidad operativa. En conjunto, los DES se consolidan como herramientas versátiles para el desarrollo de procesos químicos más eficientes, selectivos y ambientalmente sostenibles.

PALABRAS CLAVE: biomasa lignocelulósica, biorrefinería, ácido levulínico, química verde.

ABSTRACT

Deep eutectic solvents (DES) have emerged as a sustainable alternative to conventional organic solvents within the framework of green chemistry and the valorization of lignocellulosic biomass. This work comprehensively analyzes their physicochemical properties, synthesis methods, and applications in the production of high-value-added platform molecules, such as 5-hydroxymethylfurfural (HMF), levulinic acid (LA), furfural, and furan derivatives. DESs, formed by combinations of hydrogen bond acceptors and donors, offer advantages such as low toxicity, biodegradability, low cost, and tunable properties, which favor their implementation in sustainable processes.

In the context of biorefineries, DESs facilitate biomass pretreatment by reducing its structural recalcitrance through the disruption of lignocellulosic networks, thereby improving access to polysaccharides. Furthermore, they act as reaction media and catalysts in homogeneous systems, which increases the efficiency of converting carbohydrates into valuable compounds. Notable applications include two-phase systems, microwave-assisted processes, and integrated conversion-extraction strategies, which offer high yields and moderate operating conditions.

In particular, acidic DESs have demonstrated high efficiency in the production of levulinic acid, achieving yields exceeding 70% and carbon efficiencies close to 100%. Furthermore, their reusability and integration into single-step processes reduce costs and operational complexity. Overall, DES are establishing themselves as versatile tools for the advance of more efficient, selective, and environmentally sustainable chemical processes.

KEYWORDS: lignocellulosic biomass, biorefinery, levulinic acid, green chemistry.

INTRODUCCIÓN

La preocupación en torno a la contaminación y los riesgos toxicológicos derivados de los procesos químicos ha ido creciendo en las últimas décadas, lo que ha impulsado la búsqueda de estrategias orientadas a disminuir el consumo de disolventes orgánicos y de energía, y a reducir la generación de residuos. Como resultado, la química y la ingeniería sostenibles han emergido como áreas prioritarias de investigación y desarrollo.

Sin embargo, actualmente gran parte de las operaciones químicas, incluyendo síntesis, extracción y separación, dependen del empleo masivo de disolventes orgánicos. De hecho, se espera que el consumo mundial de dichos solventes supere los 32 millones de toneladas en el 2026 (Quadros et al., 2025). Además, numerosos procesos producen grandes volúmenes de residuos orgánicos cuya recuperación y tratamiento resultan complejos. En consecuencia, el desarrollo de alternativas sostenibles se ha convertido en una necesidad crítica, promoviendo la exploración de disolventes ecológicos, reciclables, de baja toxicidad y reducido impacto ambiental que favorezcan prácticas más eficientes y seguras en química e ingeniería (Clarke et al., 2018).

Los disolventes eutécticos profundos (DES) comenzaron a desarrollarse de manera intensiva a partir de 2003 (Abbott et al., 2003) y, desde entonces, sus propiedades particulares han generado un interés científico creciente. Estos sistemas comparten diversas características con los líquidos iónicos, entre ellas el estado líquido a temperatura ambiente, la baja presión de vapor, el carácter no inflamable y la alta capacidad de solvatación. No obstante, presentan ventajas adicionales, ya que exhiben menor toxicidad, costos de producción más bajos y procedimientos de síntesis más simples (Li y Row, 2016). Asimismo, estos disolventes poseen una biodegradabilidad adecuada, elevada biocompatibilidad y un perfil favorable en términos de sostenibilidad ambiental (Li et al., 2017).

Estas propiedades han consolidado a los DES como una nueva generación de disolventes verdes con amplio potencial dentro de la química sostenible, representando una alternativa eficiente frente a los disolventes convencionales en múltiples procesos químicos. En consecuencia, numerosos estudios han explorado usos innovadores de los mismos en distintos campos y su utilización se ha extendido rápidamente hacia la síntesis de materiales, los procesos de extracción, la recuperación de recursos, la electroquímica, la catálisis, las transformaciones orgánicas, los tratamientos biológicos y los sistemas enzimáticos (Li y Row, 2016; Li et al., 2017; Wang et al., 2017; Zhang et al., 2012).

Particularmente, estos disolventes han demostrado un elevado potencial en la extracción y producción de compuestos de interés, funcionando como medios de extracción sostenibles y eficientes. Antes de la incorporación de estos compuestos en la ciencia de materiales, reemplazar disolventes orgánicos convencionales y tóxicos como acetonitrilo, tolueno,

cloroformo y metanol, representaba un desafío importante en procesos de síntesis y modificación de materiales (Li et al., 2018).

Los DES hidrofílicos se destacan por sus extensas redes de enlaces de hidrógeno (Vicente et al., 2024). Sin embargo, para los DES hidrofóbicos, otras interacciones pueden estar en juego como N-CI o enlaces tipo π (Wang et al., 2026). Por lo tanto, por la posibilidad de modular sus propiedades a través de la selección de sus componentes, estas características los diferencian de los disolventes orgánicos tradicionales. Muchos de estos sistemas permiten su recuperación y reutilización, mejorando la viabilidad económica de los procesos. Asimismo, su comportamiento como tensioactivos ecológicos ha favorecido su aplicación en síntesis de materiales, donde promueven una dispersión eficiente de partículas sólidas y proporcionan condiciones de viscosidad adecuadas para diversas transformaciones químicas (Hansen et al., 2021; Smith et al., 2014).

La elevada recalcitrancia de la biomasa representa uno de los principales desafíos para su valorización eficiente, razón por la cual el pretratamiento constituye una etapa crítica dentro de los esquemas de biorrefinería (Espinosa Negrín et al., 2021). Aunque los métodos convencionales basados en tratamientos ácidos y alcalinos han mostrado eficacia, su aplicación implica limitaciones técnicas relacionadas con el alto consumo energético, costos operativos elevados y problemas de corrosión en los equipos. Estas desventajas han impulsado el desarrollo de estrategias de pretratamiento más sostenibles, eficientes y compatibles con los principios de la química verde (Singh et al., 2011).

Así, los DES, al establecer interacciones por enlaces de hidrógeno con la lignina y otros constituyentes de la biomasa lignocelulósica, alteran las fuerzas intermoleculares, debilitando la integridad estructural del material. Los grupos funcionales presentes en el DES establecen interacciones directas con la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, actuando como donadores y aceptores de hidrógeno y favoreciendo la desorganización de la red lignocelulósica (Cañadas et al., 2020; Singh et al., 2021). Este fenómeno favorece la despolimerización de la matriz lignocelulósica y mejora la accesibilidad de enzimas y microorganismos a polisacáridos como la celulosa y la hemicelulosa (Ai et al., 2020). Como consecuencia, los DES han emergido como disolventes altamente prometedores para el pretratamiento de biomasa lignocelulósica, aunque su implementación aún permanece en una etapa predominantemente exploratoria (Ai et al., 2020).

En este marco, la presente revisión examina de manera integral la aplicación de los DES en la síntesis de moléculas plataforma derivadas de biomasa, con especial énfasis en 5-hidroximetilfurfural (HMF), sus derivados y el ácido levulínico.

Solventes eutécticos profundos (DES)

Andrew Abbott y colaboradores, introdujeron los DES en 2003. Estos sistemas se generan mediante la combinación de cloruro de colina (ChCl; punto de fusión: 302 °C) y urea (punto de fusión: 133 °C), cuyos componentes establecen interacciones intermoleculares a través de enlaces de hidrógeno (Abbott et al., 2003). La síntesis de los DES generalmente sigue un procedimiento simple de calentamiento, en el que los componentes se mezclan y agitan a temperaturas comprendidas entre 60 y 100 °C hasta obtener un líquido homogéneo. Tal como fue expresado, los DES ofrecen varias ventajas frente a los líquidos iónicos, evitando al mismo tiempo muchas de las limitaciones asociadas a estos últimos. Estos disolventes se originan a partir de mezclas eutécticas cuyo punto de fusión resulta significativamente inferior al de cada uno de sus componentes puros. Esta disminución del punto de fusión surge de las interacciones por enlaces de hidrógeno que se establecen entre los constituyentes del sistema. Los DES convencionales se forman mediante la combinación de un aceptor de enlaces de hidrógeno (HBA), generalmente sales cuaternarias, y un donador de enlaces de hidrógeno (HBD), como aminas, ácidos carboxílicos o carbohidratos. La amplia disponibilidad y el bajo costo de la mayoría de los HBA y HBD confieren a estos sistemas una notable viabilidad económica (Francisco et al., 2013). Gracias a la diversidad de combinaciones posibles entre aceptores y donadores de hidrógeno, durante la última década se ha desarrollado una gran variedad de DES con propiedades ajustables para aplicaciones específicas.

Por lo cual, los DES ternarios han despertado un interés creciente, ya que pueden alcanzar puntos de fusión inferiores a los observados en los sistemas binarios convencionales. Con el fin de organizar estos sistemas según la naturaleza de sus componentes, se clasifican en cuatro categorías principales, tal como se observa en la Tabla 1 (Li et al., 2017).

Tabla 1. Clasificación de los solventes eutécticos profundos

Tipos de DES	Fórmula	Ejemplo	Relación molar del DES	Referencia
I	$\text{Cat}^+ \times \text{X}^- \times \text{Z} \times \text{MCl}_x$ (haluro cuaternario + cloruro metálico)	ChCl + ZnCl_2	1:2	Wang et al., 2025
II	$\text{Cat}^+ \times \text{X}^- \times \text{Z} \times \text{MCl}_x \times \text{YH}_2\text{O}$ (haluro cuaternario + cloruro metálico hidratado)	ChCl + $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1:2	Perez Bravo et al., 2026
III	$\text{Cat}^+ \times \text{X}^- \times \text{Z} \times \text{YZ}$ (haluro cuaternario + donante de enlace de hidrógeno)	ChCl + ácido orgánico ChCl: ácido málico	1:1 1:2	Sari et al., 2025
IV	$\text{MCl}_x + \text{YZ} = (\text{MCl}_{x-1})^+ \text{RZ} + (\text{MCl}_{x+1})^-$ (haluro metálico hidratado + donante de enlaces de hidrógeno)	ZnCl_2 + Urea	1: 3.5	Smith et al., 2014

Cat⁺: cualquier catión de amonio, fosfonio, sulfonio u otro ($\text{C}_5\text{H}_{14}\text{NO}^+$, H^+); **X⁻**: una base de Lewis, normalmente un anión haluro (Cl, Br, CONH_2 y OH); **Y**: un ácido de Lewis o de Brønsted (generalmente urea); **Z**: número de moléculas de Y que interactúan con el anión; **M**: metal (Zn^{2+} , Sn^{2+} , Al^{3+} , Ga^{3+} , In^{3+} , Cr^{3+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+})

La mayoría de los DES se sintetizan a partir de compuestos provenientes de fuentes renovables. En particular, los sistemas constituidos exclusivamente por metabolitos naturales de origen vegetal como ácidos orgánicos, azúcares y sales de amonio, reciben la denominación de DES naturales o NADES (Natural Deep Eutectic Solvent, por sus siglas en inglés). La posibilidad de modificar tanto la naturaleza como la proporción de sus componentes permite ajustar sus propiedades fisicoquímicas de acuerdo con los requerimientos de cada aplicación. Además, la amplia disponibilidad y el origen biológico de estos compuestos fortalecen su perfil sostenible (Abbott et al., 2004). Su alta biodegradabilidad y biocompatibilidad han impulsado su utilización en numerosas aplicaciones relacionadas con la biotecnología y la bioingeniería.

Producción de moléculas plataforma mediante DES

Actualmente, los polisacáridos estructurales presentes en la biomasa lignocelulósica, especialmente la celulosa y la hemicelulosa, se someten a procesos de hidrólisis enzimática o ácida para producir monosacáridos, principalmente glucosa y fructosa, además de diversos intermediarios solubles con ayuda de los DES. Posteriormente, estos azúcares se convierten, mediante rutas de síntesis selectiva, en una amplia gama de compuestos

orgánicos de alto valor agregado, entre los que sobresalen el ácido levulínico, el furfural, el 5-clorometilfurfural (CMF), el 5-(acetoxi)metilfurfural (AMF), 5-hidroximetilfurfural (HMF), entre otros (Tabla 2) (Mariscal et al., 2016).

Tabla 2. Obtención de moléculas plataforma usando solventes eutécticos profundos

Fuente de biomasa	DES	Propiedades de formación del DES	Método de reacción	t (h)	T (°C)	Molécula extraída o separada/ Conversión (%)	Referencia
Pasto	ChCl/ etilenglicol	Radio molar (1: 15 o 1: 20) Temperatura (60 °C) Tiempo formación (2 h)	Calentamiento en baño de aceite	0,5	180	Furfural/ 75%	Chen y Wan, 2019
Celulosa de girasol	ChCl/ ácido oxálico ChCl/ácido cítrico ChCl/ácido tartárico	Radio molar (1:1) Temperatura (100 °C) Tiempo de formación (2 h) pH (-0.89)	Microondas	0,017	180	Ácido levulínico/ 76% HMF/ 4% Furfural/ 6% Ácido fórmico/1%	Sert et al., 2018
Celulosa de girasol	N,N-dietiletanol amonio/ ácido oxálico	Radio molar (3:2) Temperatura de formación (100 °C)	Microondas	0,083	170	Ácido levulínico / 25 % HMF/ 5 % Furfural/ 5% Ácido fórmico/ 10%	Arslanoğlu y Sert, 2019
Celulosa de residuos agrícolas	ChCl/p-TSA	Radio molar (1:1) Temperatura de formación (60 °C) Tiempo de formación (2 h)	Microondas	0,5	80 °C	HMF/ 93%	Arora et al., 2019

Continúa en la página siguiente

Tabla 2. Continuación

Fuente de biomasa	DES	Propiedades de formación del DES	Método de reacción	t (h)	T (°C)	Molécula extraída o separada/ Conversión (%)	Referencia
Glucosa	ChCl/AlCl ₃	Radio molar (1:1) Temperatura de formación (80 °C) Contenido de agua (1.0 g)	Calentamiento en baño de aceite	14	120	Furano/ 73% HMF/ 53% AMF/17%	Zuo et al., 2021
Fructosa	ChCl/AlCl ₃ ·6H ₂ O	Radio molar (5:1) Temperatura de formación (100 °C)	Calentamiento a Reflujo	5	120	CMF/ 50% HMF/ 8%	Zuo et al., 2016
Paja de arroz	ChCl/ ácido oxálico	Radio molar (1:1) Temperatura de formación (80 °C)	One-pot	2	100	Ácido levulínico/ 52%	Hak et al., 2024
Soluciones acuosas de ácido levulínico	Butanol/ tri-n-octilamina (TOA)	Radio molar (3:1) T (25 °C) Tiempo de formación (30 min) Contenido de agua (50%)	Extracciones líquido-líquido en tubos de centrifuga	4	25	Ácido levulínico/ 96%	Mai et al., 2023
Furfural	ChCl/ ácido oxálico	Radio molar (1:3) Temperatura de formación (50 °C) Contenido de agua (5 ml)	Calentamiento en baño de aceite	24	50	Ácido maléico/ 96% Ácido fumárico/ 96%	Ni et al., 2019

Los DES con acidez de Brönsted y de Lewis se han utilizado ampliamente en la conversión de biomasa hacia compuestos plataforma como HMF y otros productos de alto valor agregado. El HMF y sus derivados alquilados se producen comúnmente en medios acuosos o alcohólicos mediante la deshidratación catalítica de carbohidratos, incluyendo xilosa,

fructosa y glucosa, empleando sistemas ácidos basados en catalizadores minerales, sólidos o metálicos. En este contexto, las reacciones asistidas por microondas han incrementado la eficiencia de formación de HMF al acelerar la transferencia de energía y reducir los tiempos de reacción. Sin embargo, estos sistemas aún presentan limitaciones importantes, debido a que requieren temperaturas relativamente elevadas que favorecen la rehidratación del HMF y disminuyen el rendimiento global del proceso. Además, bajo condiciones ácidas, ocurren reacciones secundarias de condensación que generan huminas, complicando las etapas posteriores de separación y purificación del producto (Zuo et al., 2016, 2021).

Se ha estudiado la conversión directa de carbohidratos a CMF mediante un sistema bifásico constituido por metil isobutil cetona (MIBK) y un disolvente eutéctico profundo basado en CHCl_3 y $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Este sistema opera bajo condiciones moderadas (5 mmol (0,9 g) de fructosa, 5 mmol de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 30 ml de MIBK, a 120 °C, durante 5 h) y evita el empleo de ácidos concentrados. Durante el proceso, la fructosa disuelta en el DES experimenta inicialmente una deshidratación hacia HMF catalizada por $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en la fase polar. Posteriormente, el HMF migra rápidamente hacia la fase orgánica de MIBK, donde ocurre su halogenación para formar CMF. Esta transformación se favorece por la generación in situ de HCl a partir de la hidrólisis de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. El sistema DES–MIBK permitió obtener rendimientos superiores al 50 % en peso de CMF, incluso utilizando concentraciones elevadas de sustrato (>15 % p/p), sin necesidad de recurrir a HCl concentrado. Además, en esta estrategia los carbohidratos no solo funcionan como reactivos, sino que también participan como componentes estructurales del sistema eutéctico (Zuo et al., 2016).

Se ha desarrollado una estrategia alternativa para la conversión de glucosa derivada de biomasa utilizando un sistema bifásico basado en DES en medio acuoso, integrado por glucosa, CHCl_3 , agua y acetato de etilo (EtAc) como codisolvente. Bajo estas condiciones, el sistema permite obtener, en una sola etapa y mediante el ajuste de las variables de reacción, diferentes derivados furánicos, entre ellos HMF, CMF y 5-etoximetilfurfural (EMF). El proceso alcanzó un rendimiento global de compuestos furánicos del 73 %, incluyendo 53 % de HMF y 17 % de AMF, incluso a elevadas concentraciones de glucosa y bajo condiciones moderadas de operación. Además, la mezcla de furanos obtenida puede transformarse directamente en productos de mayor valor agregado, como ácido 2,5-furandicarboxílico mediante oxidación o dimetilfurano mediante hidrogenación. Estos resultados evidencian

una ruta sintética sostenible para la valorización de glucosa lignocelulósica, basada en materiales y sistemas catalíticos de bajo impacto ambiental, lo que fortalece su potencial de aplicación a escala industrial (Chen y Wan, 2019).

Se ha propuesto una estrategia eficiente para la valorización de celulosa obtenida a partir de residuos lignocelulósicos subutilizados, como paja de trigo, cáscara de arroz y bagazo, mediante el uso de hidróxido de colina. Este compuesto, biodegradable y de bajo costo, funciona simultáneamente como líquido iónico básico y medio de disolución, permitiendo reemplazar las sales alcalinas convencionales de naturaleza corrosiva. El proceso produce fibras de celulosa con alta pureza sin necesidad de emplear agentes oxidantes ni etapas adicionales de blanqueamiento. Posteriormente, la celulosa obtenida se convierte en HMF con altos rendimientos utilizando DES ácidos basados en colina, los cuales además pueden recuperarse y reutilizarse con facilidad. En conjunto, estos resultados demuestran una ruta integrada y sostenible para la valorización de biomasa residual (Sert et al., 2018).

El ácido levulínico (AL), destacado como una molécula plataforma de alta relevancia industrial, se produce tradicionalmente mediante procesos catalizados por ácidos minerales fuertes, principalmente ácido clorhídrico y ácido sulfúrico. Sin embargo, investigaciones recientes han orientado sus esfuerzos hacia la obtención directa de AL a partir de celulosa utilizando DES, tanto en reactores convencionales como en sistemas asistidos por microondas. En este contexto, se evaluó la conversión de celulosa derivada de tallos de girasol hacia ácido levulínico y ácido fórmico empleando tres sistemas DES basados en ChCl: ácido oxálico, ChCl: ácido cítrico y ChCl: ácido tartárico, los cuales actuaron simultáneamente como medio de reacción y catalizador. Entre los sistemas analizados, ChCl: ácido oxálico exhibió el mejor desempeño catalítico, alcanzando una eficiencia de carbono del 99 % a 180 °C en reactor de microondas con un tiempo de reacción de apenas 1 min. Bajo estas condiciones, el proceso logró un rendimiento sobresaliente de AL del 76 % (Sert et al., 2018).

De manera similar, se ha estudiado la conversión de celulosa en AL utilizando un DES como sistema catalítico. En particular, se evaluó el desempeño de uno constituido por cloruro de N,N-dietiletanolamonio y ácido oxálico en un reactor asistido por microondas. Los resultados demostraron la elevada eficacia del sistema en un intervalo de temperaturas entre 150 y 170°C y tiempos de reacción de 2,5 a 7,5 min. Las condiciones óptimas se

alcanzaron a 170 °C con un tiempo de reacción de 5 min, obteniéndose una eficiencia máxima de carbono del 38 % (Arslanoğlu y Sert, 2019).

Asimismo, se ha reportado la síntesis de tres DES hidrofóbicos utilizando tri-n-octilamina (TOA) como HBA y diferentes alcoholes, butanol, 2-octanol y mentol, como donadores de enlaces de hidrógeno HBD. El estudio evaluó sistemáticamente diversos parámetros operativos, incluyendo la relación molar HBD/HBA, la temperatura de extracción, el tiempo de contacto, el pH de la solución, la concentración inicial de AL y la relación volumétrica DES/agua. Entre los sistemas analizados, el DES basado en butanol–TOA presentó el mejor desempeño, alcanzando una eficiencia máxima de extracción de ácido levulínico del $95,79 \pm 1,4$ % (Mai et al., 2023).

Asimismo, se ha informado la conversión de paja de arroz en AL mediante una estrategia integrada que combina la disolución de la biomasa en un DES de naturaleza ácido carboxílico con una etapa posterior de hidrólisis ácida. Entre los sistemas evaluados, el DES compuesto por ChCl y ácido oxálico exhibió una alta capacidad de solubilización de la biomasa a 100 °C durante 2 h. Posteriormente, la celulosa disuelta se transformó en AL mediante tratamiento con HCl bajo condiciones moderadas de reacción (120 °C durante 10 h a presión atmosférica), alcanzando un rendimiento del 52 %. Este enfoque ofrece ventajas significativas frente a los procesos convencionales, ya que evita el aislamiento de intermediarios como glucosa y HMF, opera bajo condiciones menos severas y utiliza sistemas DES de bajo costo. De esta manera, esta estrategia integrada de una sola etapa representa una alternativa eficiente y potencialmente viable desde el punto de vista económico para la producción de ácido levulínico (Hak et al., 2024).

El ácido maleico y el ácido fumárico, junto con sus respectivos anhídridos, representan intermediarios C4 de alta importancia industrial debido a sus aplicaciones en la fabricación de resinas, aditivos lubricantes, recubrimientos y compuestos farmacéuticos. En este marco, la oxidación de furfural utilizando un sistema eutéctico profundo basado en ChCl y ácido oxálico permitió alcanzar una conversión completa del sustrato, con formación selectiva de ácidos maleico y fumárico en un tiempo relativamente corto de 6 h. La reacción transcurrió en un intervalo moderado de temperatura (50–60 °C), demostrando la capacidad de los DES para promover transformaciones químicas selectivas bajo condiciones suaves de operación (Liu et al., 2018; Scelsi et al., 2021).

Diversos estudios han evidenciado la conversión catalítica de materias primas como celulosa, fructosa y glucosa hacia una amplia gama de compuestos de alto valor agregado, incluyendo ácido fórmico, ácido ferúlico, ácido clorogénico, ácido glucurónico, ácido maléico y ácido fumárico, mediante el empleo de DES. La actividad catalítica de estos sistemas depende estrechamente de la naturaleza química de sus componentes. En particular, los DES formulados con ácidos orgánicos, como ácido oxálico, y alcoholes como 1,3-butanodiol, glicerol o etilenglicol, combinados con ChCl en diferentes proporciones molares, originan sistemas con propiedades ácidas de Lewis. Estos resultados destacan la elevada versatilidad de estos disolventes y su capacidad para promover eficientemente la transformación de biomasa en productos químicos de interés industrial (Qu et al., 2017).

En esta línea, se ha utilizado un sistema de DES formulado a partir de cloruro de potasio y etilenglicol para extraer compuestos fenólicos, entre ellos ácido ferúlico, ácido cinámico y ácido gálico, presentes en cáscaras de naranja mediante extracción sólido-líquido. El proceso alcanzó su máximo desempeño al incorporar un 10 % en peso de agua al DES y operar a 50 °C durante 100 min, condiciones bajo las cuales el sistema superó la eficiencia de extracción obtenida con una solución convencional de etanol al 30 % en peso. Además, el estudio demostró que incrementos adicionales en la concentración del DES o en la temperatura de operación no mejoraron significativamente el rendimiento de extracción (Ozturk et al., 2018).

También, se ha diseñado un sistema integrado para la producción y separación de ácido glucurónico a partir de celulosa utilizando DES basados en $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ como fase catalítica. Entre los sistemas evaluados, el compuesto por $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y etilenglicol exhibió el mayor desempeño catalítico, alcanzando un rendimiento de ácido glucurónico del 52,7 %, superior al obtenido con soluciones acuosas de FeCl_3 bajo condiciones equivalentes. Estos resultados demuestran la elevada capacidad de este tipo de DES para promover simultáneamente la conversión de la biomasa y la separación de productos, reforzando así su potencial en procesos de valorización lignocelulósica (Li et al., 2017).

De manera complementaria, se han empleado nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4 ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{NPs}$) y sistemas híbridos DES- $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{NPs}$ en procesos de extracción magnética en fase sólida destinados a la purificación de ácido ferúlico a partir de salvado de trigo. La

optimización de los solventes de lavado y elución permitió alcanzar recuperaciones de extracción del 89 %. Además, el método mostró una elevada reproducibilidad, con recuperaciones comprendidas entre 78 % y 97 % para diferentes niveles de concentración y desviaciones estándar relativas inferiores al 4,5 %. El desempeño sobresaliente de los sistemas DES-Fe₃O₄NPs confirma su viabilidad como estrategia eficiente para la purificación selectiva de compuestos presentes en matrices complejas (Sharma et al., 2023).

DISCUSIÓN

Los DES han exhibido una elevada eficiencia como sistemas catalíticos en la producción y separación de moléculas plataforma derivadas de la biomasa, constituyendo una alternativa sostenible frente a los métodos convencionales. Su implementación permite transformar procesos tradicionalmente heterogéneos en sistemas homogéneos, favoreciendo así una mayor eficiencia en la conversión de materias primas como celulosa, fructosa y glucosa hacia compuestos de alto valor agregado, entre ellos ácido fórmico, ácido ferúlico, ácido clorogénico, ácido glucurónico, ácido maleico y ácido fumárico. Este comportamiento pone de manifiesto la versatilidad de los DES dentro del marco de la química verde y destaca su potencial para impulsar el aprovechamiento de recursos renovables mediante procesos más eficientes y ambientalmente compatibles (Qu et al., 2017). Como ejemplo representativo, un sistema DES basado en FeCl₃·6H₂O y etilenglicol permitió convertir celulosa en ácido glucurónico con un rendimiento del 53 % (Li et al., 2017).

De manera complementaria, sistemas híbridos basados en DES y nanopartículas magnéticas de Fe₃O₄ han demostrado una elevada eficiencia en procesos de extracción magnética en fase sólida, alcanzando recuperaciones de ácido ferúlico de hasta el 89 % a partir de salvado de trigo (Sharma et al., 2023). En relación con la producción de ácidos C₄, la oxidación de furfural en un DES formulado con cloruro de colina y ácido oxálico permitió lograr una conversión completa del sustrato con alta selectividad hacia ácido maleico y ácido fumárico bajo condiciones moderadas de reacción (Liu et al., 2018; Scelsi et al., 2021). Asimismo, los DES han mostrado un desempeño sobresaliente en procesos de extracción sólido-líquido de compuestos fenólicos, incluyendo ácido ferúlico, ácido cinámico y ácido gálico, a partir de residuos agrícolas, superando la eficiencia obtenida mediante métodos convencionales (Mariscal et al., 2016). En conjunto, estos avances

evidencian la capacidad de los DES para optimizar tanto las etapas de conversión como los procesos de extracción de compuestos orgánicos, consolidando su papel como herramientas estratégicas para el desarrollo de tecnologías industriales más eficientes y sostenibles.

El uso de DES constituye una estrategia sostenible y altamente prometedora para la valorización de biomasa lignocelulósica hacia compuestos plataforma de elevado valor agregado, como el HMF y sus derivados. En particular, los DES que incorporan sitios ácidos de Brønsted y Lewis favorecen la deshidratación catalítica de carbohidratos bajo condiciones moderadas de operación, disminuyendo los problemas asociados a temperaturas elevadas y reduciendo la rehidratación del producto, fenómenos que normalmente afectan el rendimiento y la pureza del HMF (Zuo et al., 2016, 2021).

Diversas investigaciones han confirmado la eficiencia de estos sistemas en múltiples aplicaciones. Por ejemplo, se ha demostrado la conversión directa de carbohidratos hacia CMF en una sola etapa utilizando un DES basado en ChCl: etilenglicol (1:2), en un sistema bifásico con relación molar 7:2 de acetona: DES y 1.5 p/p $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. De manera similar, otros estudios han evaluado la transformación de glucosa derivada de biomasa en distintos compuestos furánicos mediante sistemas bifásicos acuosos basados en DES (Chen y Wan, 2019). Además, los DES han facilitado la extracción de celulosa a partir de residuos agrícolas y su posterior conversión en HMF con altos rendimientos, fortaleciendo así su papel como alternativa ecológica y económicamente viable frente a los solventes convencionales (Sert et al., 2018). En conjunto, estos avances consolidan a los DES como plataformas versátiles capaces de mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos de conversión de biomasa lignocelulósica.

Los sistemas basados en DES han demostrado un elevado potencial para la producción y recuperación sostenible de AL a partir de diferentes matrices lignocelulósicas. Diversos estudios evidencian que estos medios, particularmente la mezcla ChCl: ácido oxálico (1:1), alcanzan altas eficiencias de conversión de carbono y rendimientos sobresalientes de ácido levulínico al funcionar simultáneamente como medio de reacción y sistema catalítico en reactores asistidos por microondas. Bajo estas condiciones, se ha reportado un rendimiento de ácido levulínico del 76 % a 180 °C con un tiempo de reacción de apenas 1 min (Hak et al., 2024).

La versatilidad de los DES también se refleja en la conversión de celulosa hacia ácido levulínico mediante sistemas constituidos por cloruro de N,N-dietiletanolamonio y ácido oxálico, los cuales alcanzan eficiencias de carbono de hasta 38 % bajo condiciones optimizadas de operación (Mai et al., 2023). Por lo tanto, la integración de DES basados en ácidos carboxílicos como HBD con etapas posteriores de hidrólisis ácida han permitido la conversión directa de distintos materiales lignocelulósicos como paja de arroz en ácido levulínico mediante un proceso integrado de una sola etapa, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia global respecto a las rutas convencionales de conversión.

CONCLUSIONES

Los DES representan una sustitución sostenible y técnicamente viable frente a los disolventes convencionales derivados del petróleo, debido a su baja toxicidad, elevada biodegradabilidad, reducido costo de producción y propiedades fisicoquímicas ajustables. Su implementación en procesos de pretratamiento y conversión de biomasa lignocelulósica incrementa significativamente la eficiencia global, ya que disminuye la recalcitrancia estructural de la biomasa y facilita la obtención de moléculas plataforma de alto valor agregado. Los DES de tipo III particularmente, permiten integrar etapas de reacción y separación dentro de procesos más simples y eficientes, alcanzando altos niveles de rendimiento y selectividad bajo condiciones moderadas de operación. Por lo cual, estas características consolidan el potencial de los DES como herramientas estratégicas para el desarrollo de procesos industriales más sostenibles y ambientalmente compatibles.

REFERENCIAS

- Abbott, A. P., Boothby, D., Capper, G., Davies, D. L. y Rasheed, R. K. (2004). Deep Eutectic Solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: Versatile alternatives to ionic liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 126(29), 9142–9147. <https://doi.org/10.1021/ja048266j>
- Abbott, A. P., Capper, G., Davies, D. L., Rasheed, R. K. y Tambyrajah, V. (2003). Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chemical Communications*, (1), 70–71. <https://doi.org/10.1039/b210714g>
- Ai, B., Li, W., Woome, J., Li, M., Pu, Y., Sheng, Z., Zheng, L., Adediji, A., Ragauskas, A. J. y Shi, J. (2020). Natural deep eutectic solvent mediated extrusion for continuous high-solid pretreatment of lignocellulosic biomass. *Green Chemistry*, 22(19), 6372–6383. <https://doi.org/10.1039/d0gc01560a>
- Arora, S., Gupta, N. y Singh, V. (2019). Choline Based Basic Ionic Liquid (BIL)/ Acidic DES Mediated Cellulose Rich Fractionation of Agricultural Waste Biomass and Valorization to 5-HMF. *Waste and Biomass Valorization*, 11(7), 3345–3354. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00603-2>
- Arslanoğlu, A. y Sert, M. (2019). Direct conversion of biomass to platform chemicals, catalyzed using a deep eutectic solvent of N,N diethyl ethanol ammonium chloride-oxalic acid in a microwave reactor. *Fuel*, 258(1), 116142. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116142>
- Cañadas, R., González-Miquel, M., González, E. J., Díaz, I. y Rodríguez, M. (2020). Overview of neoteric solvents as extractants in food industry: A focus on phenolic compounds separation from liquid streams. *Food Research International*, 136, 109558. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109558>
- Chen, Z. y Wan, C. (2019). A novel deep eutectic solvent/acetone biphasic system for high-yield furfural production. *Bioresource Technology Reports*, 8, 100318. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100318>
- Clarke, C. J., Tu, W. C., Levers, O., Bröhl, A. y Hallett, J. P. (2018). Green and Sustainable Solvents in Chemical Processes. *Chemical Reviews*, 118(2), 747–800. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00571>
- Espinosa Negrín, A. M., López González, L. M. y Casdelo Gutiérrez, N. L. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: a brief review of the principal methods applied. *Centro Azúcar*, 48(3), 108–119.
- Francisco, M., Van Den Bruinhorst, A. y Kroon, M. C. (2013). Low-transition-temperature mixtures (LTTMs): A new generation of designer solvents. *Angewandte Chemie International Edition*, 52(11), 3074–3085. <https://doi.org/10.1002/anie.201207548>
- Hak, C., Panchai, P., Nutongkaew, T., Grisdanurak, N. y Tulaphol, S. (2024). One-pot levulinic acid production from rice straw by acid hydrolysis in deep eutectic solvent. *Chemical Engineering Communications*, 211(3), 366–378. <https://doi.org/10.1080/00986445.2022.2056454>

- Hansen, B. B., Spittle, S., Chen, B., Poe, D., Zhang, Y., Klein, J. M., Horton, A., Adhikari, L., Zelovich, T., Doherty, B. W., Gurkan, B., Maginn, E. J., Ragauskas, A., Dadmun, M., Zawodzinski, T. A., Baker, G. A., Tuckerman, M. E., Savinell, R. F. y Sangoro, J. R. (2021). Deep Eutectic Solvents: A Review of Fundamentals and Applications. *Chemical Reviews*, 121(3), 1232–1285. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00385>
- Li, G., Zhu, T. y Row, K. H. (2017). Isolation of Ferulic Acid from Wheat Bran with a Deep Eutectic Solvent and Modified Silica Gel. *Analytical Letters*, 50(12), 1926–1938. <https://doi.org/10.1080/00032719.2016.1261879>
- Li, X., Choi, J., Ahn, W. y Row, K. H. (2018). Preparation and Application of Porous Materials based on Deep Eutectic Solvents. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 48(1), 73-85. <https://doi.org/10.1080/10408347.2017.1383881>
- Li, X. y Row, K. H. (2016). Development of deep eutectic solvents applied in extraction and separation. *Journal of Separation Science*, 39(18), 3505–3520. <https://doi.org/10.1002/jssc.201600633>
- Liu, F., Xue, Z., Zhao, X., Mou, H., He, J. y Mu, T. (2018). Catalytic deep eutectic solvents for highly efficient conversion of cellulose to gluconic acid with gluconic acid self-precipitation separation. *Chemical Communications*, 54(48), 6140–6143. <https://doi.org/10.1039/c8cc03798a>
- Mai, Y., Xian, X., Hu, L., Zhang, X., Zheng, X., Tao, S. y Lin, X. (2023). Chinese Journal of Chemical Engineering Liquid – liquid extraction of levulinic acid from aqueous solutions using hydrophobic tri- n - octylamine / alcohol-based deep eutectic solvent. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 54, 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.10.005>
- Mariscal, R., Maireles-Torres, P., Ojeda, M., Sádaba, I. y López Granados, M. (2016). Furfural: A renewable and versatile platform molecule for the synthesis of chemicals and fuels. *Energy and Environmental Science*, 9(4), 1144–1189. <https://doi.org/10.1039/c5ee02666k>
- Ni, Y., Bi, Z., Su, H. y Yan, L. (2019). Deep eutectic solvent (DES) as both solvent and catalyst for oxidation of furfural to maleic acid and fumaric acid. *Green Chemistry*, 21(5), 1075–1079. <https://doi.org/10.1039/c8gc04022b>
- Ozturk, B., Parkinson, C. y Gonzalez-Miquel, M. (2018). Extraction of polyphenolic antioxidants from orange peel waste using deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*, 206, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.052>
- Perez Bravo, J. J., Harings, J. A. W., Copello, G. J. y González-Benito, J. (2026). Preparation of ferric chloride-based deep eutectic solvents and characterization of their physicochemical properties. *Journal of Molecular Liquids*, 444, 129180. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.129180>

- Qu, Q., Tang, W., Tang, B. y Zhu, T. (2017). Highly selective purification of ferulic acid from wheat bran using deep eutectic solvents modified magnetic nanoparticles. *Separation Science and Technology*, 52(6), 1022-1030. <https://doi.org/10.1080/01496395.2017.1281299>
- Quadros, G. T., Valente, L. C. L., Abenante, L., Barcellos, T., Hartwig, D. y Lenardão, E. J. (2025). Bio-based Green Solvents in Organic Synthesis. An Updated Review. *Sustainability & Circularity NOW*, 2(CP). <https://doi.org/10.1055/a-2646-0474>
- Sari, I. P., Zulaicha, A. S. y Triyanti, S. B. (2025). Choline Chloride Based Deep Eutectic Solvents : Physicochemical Properties Aand Spectroscopic Insights. *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*, 9(2), 23–34. <http://dx.doi.org/10.23960/analit.v9i02.200>
- Scelsi, E., Angelini, A. y Pastore, C. (2021). Deep Eutectic Solvents for the Valorization of Lignocellulosic Biomasses towards Fine Chemicals. *Biomass*, 1(1), 29–59. <https://doi.org/10.3390/biomass1010003>
- Sert, M., Arslanoğlu, A. y Ballice, L. (2018). Conversion of sunflower stalk-based cellulose to the valuable products using choline chloride based deep eutectic solvents. *Renewable Energy*, 118, 993–1000. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.083>
- Sharma, V., Nargotra, P., Sharma, S. y Bajaj, B. K. (2023). Efficient bioconversion of sugarcane tops biomass into biofuel-ethanol using an optimized alkali-ionic liquid pretreatment approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(2), 841–854. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01123-z>
- Singh, M. B., Kumar, V. S., Chaudhary, M. y Singh, P. (2021). A mini review on synthesis, properties and applications of deep eutectic solvents. *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(11), 100210. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100210>
- Singh, P., Kumar, P., Kumari, K., Sharma, P., Mozumdar, S. y Chandra, R. (2011). A rapid and simple route for the synthesis of lead and palladium nanoparticles in tetrazolium based ionic liquid. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 78(2), 909–912. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2010.11.039>
- Smith, E. L., Abbott, A. P. y Ryder, K. S. (2014). Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications. *Chemical Reviews*, 114(21), 11060–11082. <https://doi.org/10.1021/cr300162p>
- Vicente, F. A., Tkalec, N. y Likozar, B. (2024). Responsive deep eutectic solvents: mechanisms, applications and their role in sustainable chemistry. *Chemical Communications*, 61(6), 1002–1013. <https://doi.org/10.1039/d4cc05157b>
- Wang, C., Lu, X., Deng, R., Guo, M., Gao, M., Ru, J., Xu, C., Hua, Y. y Zhang, Q. (2025). Metal separation and recovery employing choline chloride-based deep eutectic solvents: Diverse functions of water. In *Separation and Purification Technology*, 364, 132341. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132341>

- Wang, H., Zhang, Y., Bi, W. y Chen, D. D. Y. (2026). Sustainable and high efficiency natural hydrophobic deep eutectic solvents in analytical chemistry. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 198, 118736. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2026.118736>
- Wang, M., Wang, J., Zhou, Y., Zhang, M., Xia, Q., Bi, W. y Chen, D. D. Y. (2017). Ecofriendly Mechanochemical Extraction of Bioactive Compounds from Plants with Deep Eutectic Solvents. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(7), 6297–6303. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01378>
- Zhang, Q., De Oliveira Vigier, K., Royer, S. y Jérôme, F. (2012). Deep eutectic solvents: Syntheses, properties and applications. *Chemical Society Reviews*, 41(21), 7108–7146. <https://doi.org/10.1039/c2cs35178a>
- Zuo, M., Jia, W., Feng, Y., Zeng, X., Tang, X., Sun, Y. y Lin, L. (2021). Effective selectivity conversion of glucose to furan chemicals in the aqueous deep eutectic solvent. *Renewable Energy*, 164, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.019>
- Zuo, M., Li, Z., Jiang, Y., Tang, X., Zeng, X., Sun, Y. y Lin, L. (2016). Green catalytic conversion of bio-based sugars to 5-chloromethyl furfural in deep eutectic solvent, catalyzed by metal chlorides. *RSC Advances*, 6(32), 27004–27007. <https://doi.org/10.1039/c6ra00267f>