

*Artículo de Divulgación*

# Valorización de la biomasa por medio de catálisis homogénea

Biomass valorization by homogeneous catalysis

**Diego Roa<sup>1</sup>, Alma Arévalo<sup>1</sup> y Juventino J. García<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito interior, Ciudad Universitaria. CDMX, 04510. México.

\*Correspondencia: [juvent@unam.mx](mailto:juvent@unam.mx) (Juventino J. García)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v17i2.1200>

Recibido: 19 de abril de 2023; Aceptado: 30 de agosto de 2023

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado

## Resumen

Genéricamente podemos considerar a la biomasa como todo aquel material proveniente del crecimiento de microorganismos, plantas o animales, dicho material representa una fuente de residuos y en consecuencia de diversas moléculas de interés, las cuales pueden ser transformadas a otros productos de valor añadido y potencialmente útiles. Uno de los propósitos para su aprovechamiento sería el uso preferente de biomasa de desecho o en desuso, con lo cual se logra la disminución de residuos y el costo de las materias primas. De la hidrólisis de la biomasa se puede llegar a diversas moléculas o bloques de construcción entre los que se destacan, pero no se limitan al furfural y sus derivados, hasta llegar al ácido levulínico (AL). El AL es considerado como una plataforma química a partir de la cual se pueden realizar diversas transformaciones químicas y con ello preparar una gran variedad de productos útiles a nivel industrial y en la academia. Para lo anterior, el uso de metodologías catalíticas es otro aspecto deseable, ya que con ello se logra la disminución de subproductos, tiempos de reacción y consumo de energía. En este trabajo se resalta el uso de metales abundantes en la naturaleza para efectuar dichas transformaciones catalíticas.

**Palabras clave:** biomasa, catálisis, homogénea, sustentable, metales, ácido levulínico.

## Abstract

Biomass can be considered any material from microorganisms, plants, or animals growing; such material represents a source of a variety of molecules of interest that can be transformed into new value-added useful products. A target for this is the use of waste or final-use biomass, aiming to reduce the production of residues and lower the cost of raw materials. Several molecules and building blocks of interest can be derived from biomass hydrolysis, including furfural and closely

related derivatives to yield Levulinic Acid (LA). LA is considered a chemical platform from which it is possible to prepare a variety of valuable products for industry and academia. To achieve that, using catalytic methodologies is a desirable aspect to achieve fewer byproducts, shorter reaction times, and low energy consumption. This work focuses on using earth-abundant metals to make these catalytic transformations.

**Keywords:** biomass, catalysis, homogeneous, sustainable, metals, levulinic acid.

## 1. Introducción

Históricamente la biomasa ha sido una fuente de alimentación y energía, así como una fuente de medicamentos, fragancias y condimentos. No obstante, fue hasta la segunda mitad del siglo XIX que inició la conversión industrial de la biomasa a productos químicos y materiales útiles, con la producción de ésteres de celulosa y de linóleoum. Desde inicios del siglo XXI ha ido en aumento el número de productos obtenidos a partir de la biomasa a saber, diversos sabores y fragancias son producidos por la conversión catalítica de terpenos; así como surfactantes y lubricantes fabricados por la industria de aceites vegetales y un gran número de materias primas son obtenidas por la conversión de carbohidratos procedentes de diferentes cultivos. Sin embargo, los productos derivados de la biomasa sufrieron una fuerte competencia económica por los productos menos costosos obtenidos a partir de hidrocarburos por medio de rutas convencionales las cuales han sido constantemente optimizadas en los últimos cien años (Gallezot, 2012; Ravelli y Samori, 2021).

La sociedad utiliza en la actualidad mucha energía y productos de consumo provenientes de la industria química, desde combustibles hasta productos farmacéuticos. Los combustibles fósiles eran usados ocasionalmente hasta la revolución industrial, pero en tiempos recientes el mantenimiento de altos niveles de producción y consumo al menor costo ha implicado una fuerte dependencia de dichos combustibles a nivel global (Gallezot, 2012).

Hoy en día se busca reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de acuerdo con el protocolo de Kyoto aunado a la disminución de las reservas de combustibles fósiles, lo cual ha dirigido la atención de la comunidad científica a la búsqueda de soluciones innovadoras para el abatimiento de los niveles de CO<sub>2</sub> y para el reemplazo de las fuentes fósiles por fuentes renovables y sustentables. En este contexto la biomasa ha ganado interés como una fuente de diversas materias primas o plataformas químicas de compuestos basados en carbono (Kamm *et al.*, 2006).

Tanto en la arena académica como en la industrial, se han investigado metodologías para utilizar la biomasa como materia prima en la preparación de compuestos orgánicos debido a su disponibilidad, alta regeneración y facilidad de distribución (Mika *et al.*, 2018). El uso de la biomasa es uno de los temas clave en el desarrollo sustentable debido a que las fuentes biológicas son renovables y neutras en términos del CO<sub>2</sub> producido-reutilizado (huella de CO<sub>2</sub> virtualmente nula), en marcado contraste con los combustibles fósiles generadores de CO<sub>2</sub> (Arakawa *et al.*, 2001). Las moléculas obtenidas de la biomasa contienen en su estructura grupos funcionales que potencialmente requerirían un menor número de etapas en la síntesis de compuestos químicos comparado con los hidrocarburos. Adicionalmente, los productos de la biomasa podrían tener propiedades más atractivas comparadas con los productos derivados de los hidrocarburos, por ejemplo, la biodegradabilidad y la biocompatibilidad, por lo que en algunos países como los Estados Unidos existen programas

gubernamentales del Departamento de Energía para la implementación del uso de biomasa. En Europa la organización SUSCHEM promueve el incremento del uso de materias primas renovables para la producción de derivados químicos y de energía (Gallezot, 2007).

Considerando los principios básicos de los procesos sustentables la biomasa haría posible lograr ciertos objetivos como son: disminución de la contaminación, disminución del uso o fabricación de productos químicos peligrosos, reducción de materiales de desecho por tecnologías de conversión más eficientes y el uso de biomasa como una fuente de energía renovable, bajo el concepto de "biorrefinería" como la integración de diversos procesos de conversión para la generación de combustibles y la obtención de productos químicos de valor agregado, empleando preferentemente todos los átomos de carbono provenientes de las materias primas (economía atómica) (Corma *et al.*, 2007).

Una tendencia encontrada en los sistemas catalíticos para la hidrogenación de derivados de la biomasa ha sido el uso metales nobles (Mika y Horváth, 2021). Los cuales, debido a su poca abundancia y altos costos, limitan sus aplicaciones y la sustentabilidad de la biorrefinería. Considerando lo anterior, una alternativa al uso de catalizadores de metales nobles es emplear catalizadores basados principalmente en metales de la primera serie de transición (por ejemplo, Fe, Ti ó Mn), lo cual ha ganado mucha atención para su uso en la valorización de derivados de la biomasa y se ha convertido en un tema de interés en los últimos años (Dutta *et al.*, 2019).

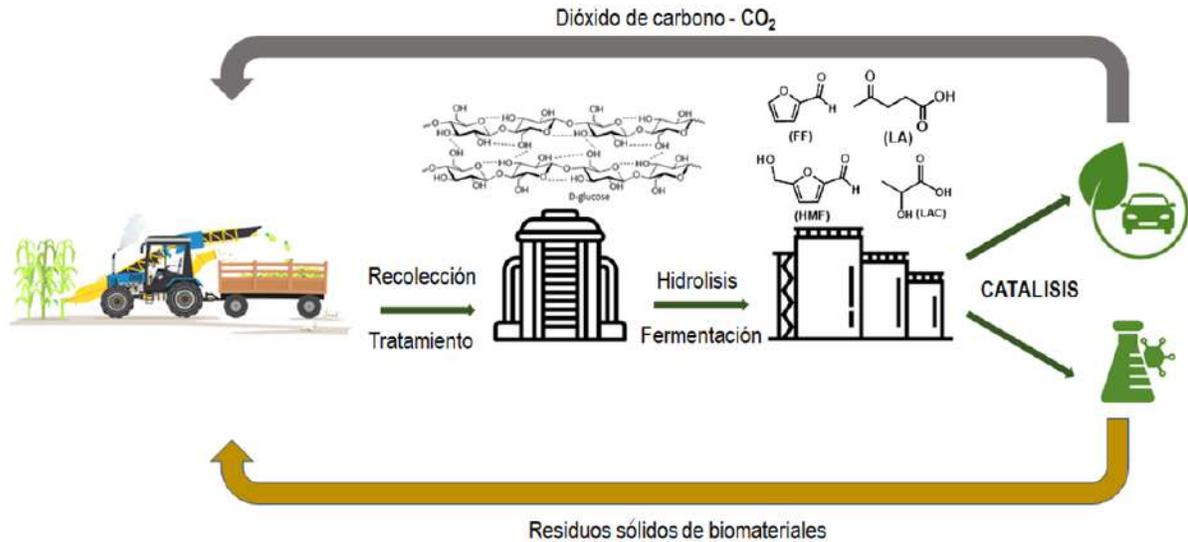
## 2. Biomasa y el concepto de Biorrefinería

La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) define a la biomasa como "Material producido por el crecimiento de microorganismos, plantas o animales" (IUPAC, 1997). Hoy en día el interés se centra preferentemente en el material de desecho de dicha biomasa, el cual no tiene un uso directo como alimento, intermediario químico o fibras procedentes de ésta. Los desechos antes mencionados pueden provenir de la industria agropecuaria, sargazo y/o biosólidos de desechos urbanos entre muchos otros.

Actualmente la atención académica mundial está enfocada en que a mediano o largo plazo la obtención de energía o de materias primas sea satisfecha con productos provenientes de recursos renovables y que dichas sustancias sean transformadas en nuevos productos útiles. Se busca que las materias primas no sean tóxicas (como las provenientes de la biomasa) y que los productos obtenidos resulten ser biodegradables. Se pretende que la emisión de gases de efecto invernadero, se compense por completo con el consumo de CO<sub>2</sub> como materia prima, logrando una huella de carbono virtualmente neutra, contrario al uso de fuentes fósiles los cuales aumentan la producción de CO<sub>2</sub>.

Considerando las premisas anteriores se establecen los principios de una biorrefinería, la cual la define la Agencia Internacional de Energía -Bioenergía (IEA Bioenergy) como "un proceso sostenible para la transformación de la biomasa en una gama de productos de base biológica como los alimentos, piensos, productos químicos, materiales y bio-energía a saber biocombustibles, generación de energía y/o calor" (De Jong *et al.*, 2020). De manera análoga a una refinería tradicional que emplea fuentes fósiles, se requiere el uso de catalizadores para llevar a cabo las transformaciones químicas de la materia prima de manera selectiva y temperaturas de reacción más bajas, para que el

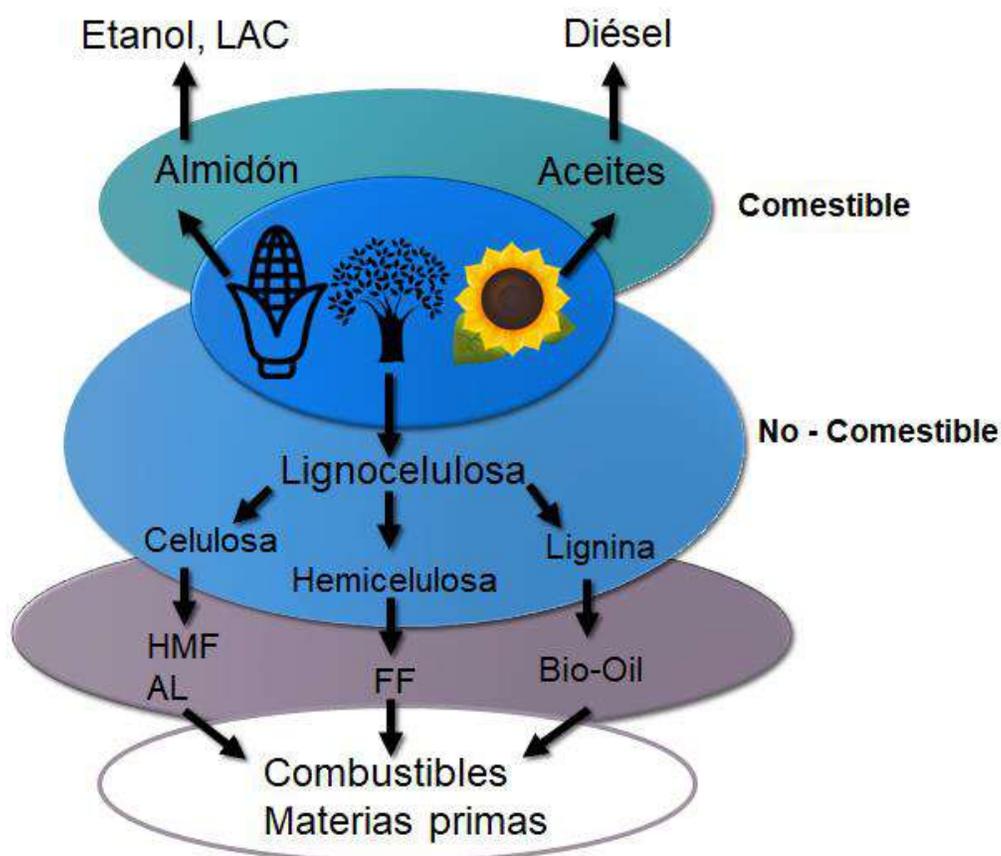
proceso sea sustentable ambiental y energéticamente. En la Fig. 1, se muestra un modelo conceptual simplificado de una biorrefinería, basado en la economía circular (Stegmann *et al.*, 2020).



**Figura 1.** Modelo conceptual simplificado de una biorrefinería  
**Figure 1.** Simplified conceptual model of a biorefinery

De forma general se pueden agrupar tres clases de materias primas derivadas de la biomasa apropiadas para la producción de combustibles renovables: materias primas amiláceas (incluidos los azúcares), triglicéridos y materiales lignocelulósicos. En la Fig. 2 se muestran los diversos biocombustibles que se pueden obtener con cada una de las materias primas antes mencionadas (Alonso *et al.*, 2010). Las amiláceas están compuestas por polisacáridos de glucosa unidos por enlaces glucosídicos  $\alpha$ , como la amilasa y la amilopectina, sustancias que se hidrolizan fácilmente a los monómeros de azúcar correspondientes lo que facilita su procesamiento, como ocurre en las instalaciones de bioetanol de primera generación.

Los triglicéridos están compuestos de ácidos grasos y glicerol derivados tanto de fuentes vegetales como animales. Las fuentes de triglicéridos para la producción de biodiesel incluyen varios aceites vegetales, productos derivados del aceite de desecho (p. ej., grasa amarilla) y algas. La lignocelulosa es la clase de biomasa más abundante. Mientras que el almidón y los triglicéridos solo están presentes en algunos cultivos, la lignocelulosa contribuye a la integridad estructural de las plantas y, por lo tanto, resulta omnipresente. La mayoría de los cultivos energéticos y la biomasa residual considerada para la producción de energía son materias primas lignocelulósicas, entre los que se incluyen desechos de pastos y trigo, residuos agrícolas, desechos municipales y residuos del procesamiento de la madera. La lignocelulosa se compone de tres fracciones diferentes: lignina, hemicelulosa y celulosa (Huber y Corma, 2007).

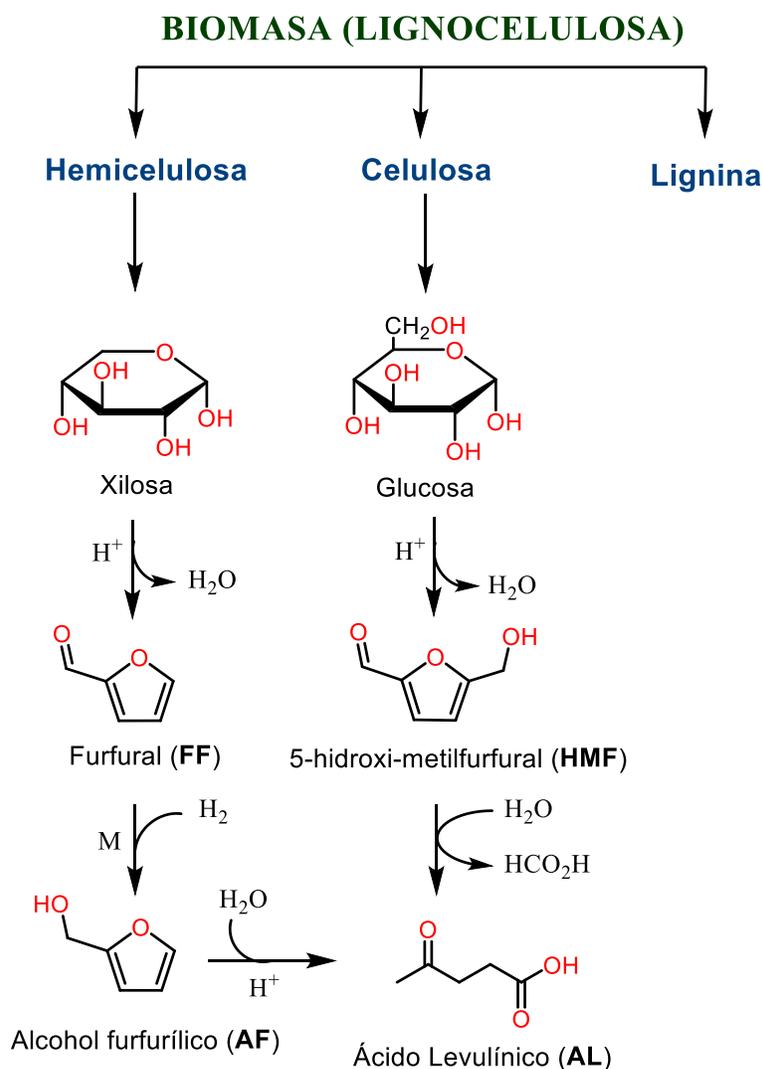


**Figura 2.** Materias primas derivadas de la biomasa y plataformas para la conversión a biocombustibles.

**Figure 2.** Biomass-derived feedstocks and platforms for conversion to biofuels.

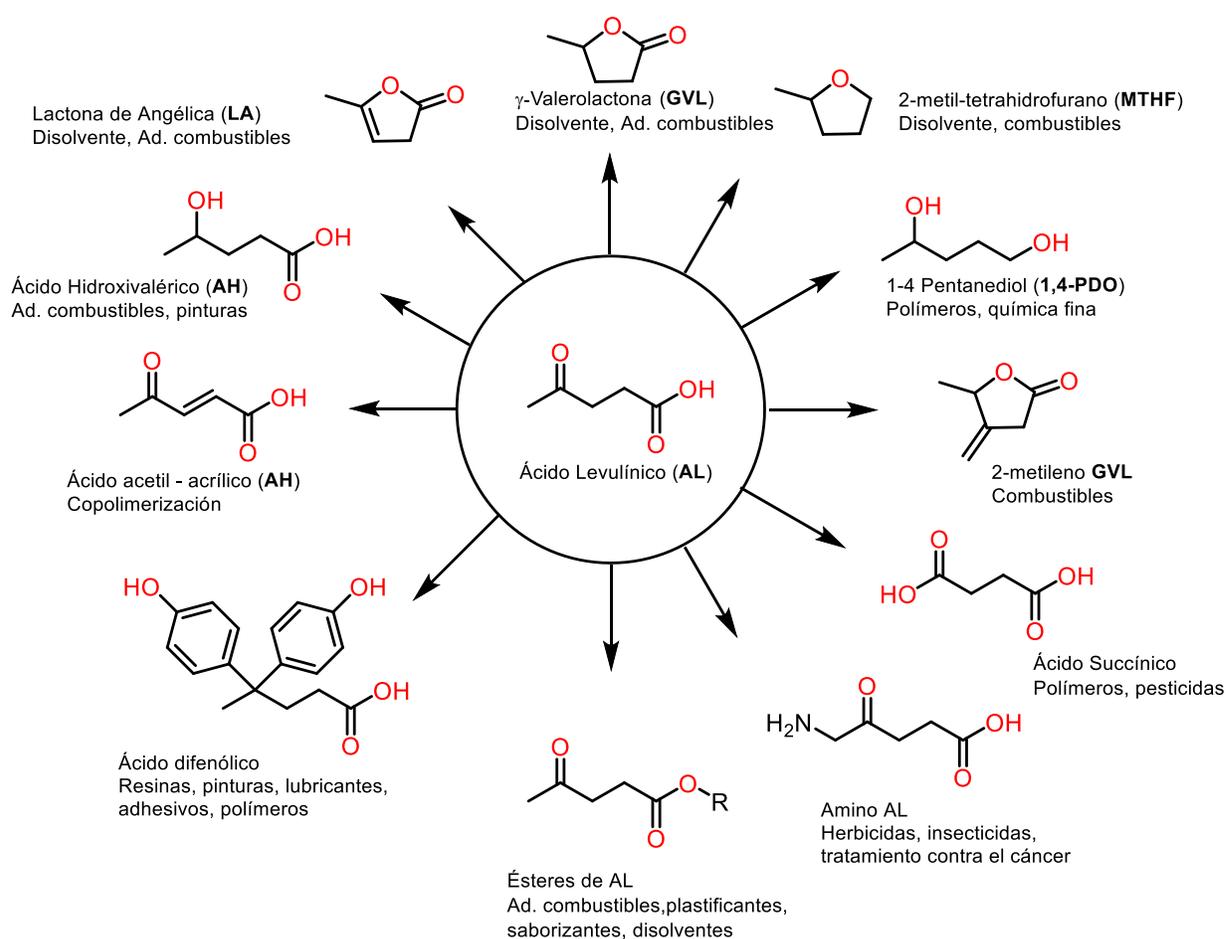
### 3. El ácido levulínico como plataforma química

De la ruptura de los tres componentes principales de la lignocelulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina; Fig. 2) por vía de la hidrólisis se obtienen moléculas pequeñas, conocidas como bloques de construcción o plataformas químicas iniciales conocidas como IPC's por sus siglas en inglés. Aunado a lo anterior, el departamento de energía de los Estados Unidos, realizó un estudio y proyección económica de cada una de ellas, para establecer su uso potencial en la elaboración de materias primas o productos ya en uso, o nuevos productos de interés, pero de fuerte demanda entre los consumidores. Se determinaron 12 plataformas químicas selectas la de mayor proyección, es el ácido levulínico (**AL**), que es además el producto principal en la hidrólisis de la hemicelulosa, Fig. 3 (Werpy y Peterson, 2004; Alonso *et al.*, 2013).



**Figura 3.** Obtención del ácido levulínico (AL) a partir de la lignocelulosa.  
**Figure 3.** Obtaining levulinic acid (LA) from lignocellulose.

El **AL** es una de las moléculas derivadas de la biomasa más importantes porque tiene dos grupos funcionales reactivos y está disponible comercialmente a bajo costo como residuo de celulosa (Clement, *et al.*, 2014). Entre los productos derivados de su hidrogenación se encuentran el ácido hidrovalérico (**AH**) usado en la industria de pinturas, el 1-4 pentanediol (**1,4-PDO**) usado como monómero para la elaboración de polímeros y en la química fina (es decir en la síntesis de alto valor añadido), la  $\gamma$ -valerolactona (**GVL**) y el 2-metiltetrahidrofurano (**MTHF**) estos dos últimos usados como aditivos para combustibles y disolventes, ver Fig. 4 (Kumaravel *et al.*, 2019).



**Figura 4.** Diversos productos derivados del ácido levulínico.

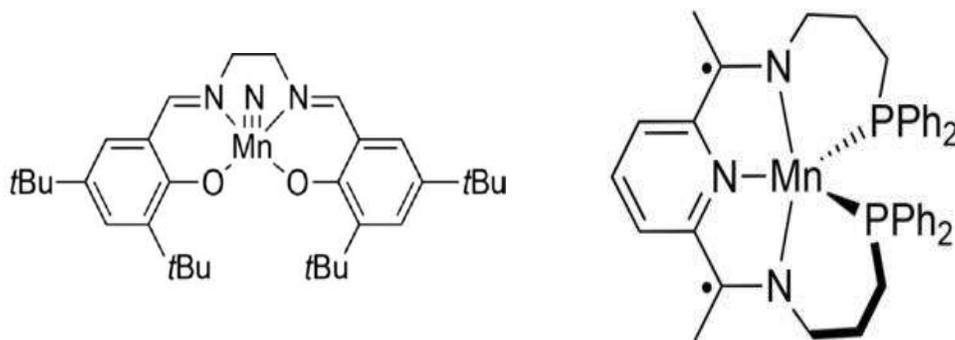
**Figure 4.** Various products derived from levulinic acid.

#### 4. En camino a procesos catalíticos sustentables

Hoy en día la mayoría de los sistemas catalíticos para la conversión de **AL** en materiales de valor agregado están basados en metales nobles, especialmente en la hidrogenación del **AL** a **GVL** o **2-MTHF** (Mika y Horváth, 2021). Sin embargo, debido a la baja abundancia de metales nobles en la naturaleza, el uso de estos metales conduce directamente a un aumento en los costos de la biorrefinería y una menor sustentabilidad. Por ello, buscando alternativas al uso de catalizadores de metales nobles, surge el interés del empleo de metales no nobles en dichos sistemas catalíticos, basados principalmente en metales de la primera serie de transición (abundantes), los cuales han atraído mucha atención para ser usados en la valorización de **AL**, proceso que se ha convertido en un tema de interés y actualidad (Dutta *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Jurado-Vázquez *et al.*, 2021).

Para ejemplificar lo anterior cabe mencionar un ejemplo reciente en el área de catálisis homogénea con metales abundantes como el manganeso (Mn). El uso de compuestos organometálicos de Mn desencadenó un gran interés en la última década y aún lo continúa haciendo (Valyaev *et al.*, 2016; Sortais, 2021). Quizás desde el descubrimiento de los primeros sistemas catalíticos eficientes de (des)hidrogenación empleando Mn por Beller y Milstein a principios del 2016 esta área evolucionó explosivamente para convertirse en un objeto de estudio muy competido en el campo de la catálisis (Elangovan *et al.*, 2016; Mukherjee *et al.*, 2016).

Considerando los informes iniciales con manganeso la bibliografía reciente pone en evidencia que las arquitecturas de los complejos originales conteniendo ligantes tridentados (o pinzas, Fig. 5) no son requisitos necesarios para obtener catalizadores de hidrogenación eficientes, ya que los complejos que contienen ligantes bidentados, menos elaborados pueden ser competitivos o incluso superiores en términos de actividad catalítica y/o ámbito de aplicación (Garduño y García, 2018).

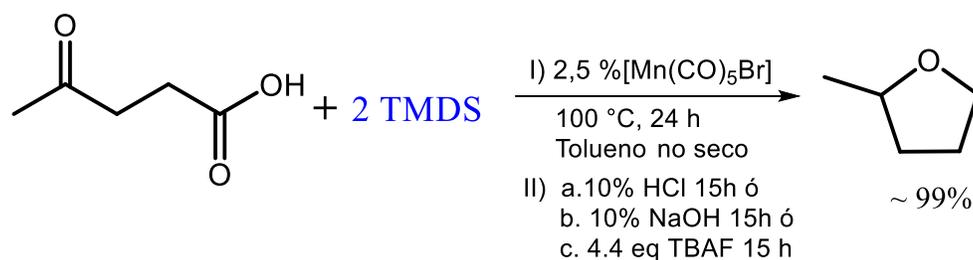


**Figura 5.** Ejemplos de compuestos de manganeso con ligantes polidentados usados en reducción catalítica.

**Figure 5.** Examples of manganese compounds with polydentate ligands used in catalytic reduction.

Hoy en día se han documentado varios casos exitosos de sistemas catalíticos de Mn(I) que contienen solo ligandos donadores auxiliares simples o incluso se basan únicamente en precursores del carbonilo metálico, lo que indica la existencia de mecanismos de reacción no convencionales que sin duda surgen de la especificidad de la química de complejos organometálicos de manganeso (Gulyaeva *et al.*, 2022).

Nuestro grupo de trabajo ha hecho algunas contribuciones recientes en el campo antes descrito, entre los cuales se puede mencionar de forma particular las reacciones de reducción y ciclación del ácido levulínico para la formación de 2-metiltetrahidrotiofeno, catalizada por complejos comercialmente disponibles de Mn y fuentes de hidrógeno de bajo costo provenientes de los desechos de la fabricación de siliconas, como es el caso del tetrametildisiloxano (TMDS) el cual se ilustra en la Fig. 6 (Roa y García, 2021).



**Figura 6.** Ejemplo de reducción y ciclación con manganeso.  
**Figure 6.** Example of reduction and cyclization with manganese.

## Conclusiones y perspectivas

El uso de materiales provenientes de la biomasa, particularmente de los desperdicios o productos de desecho, en conjunto con procesos catalizados por metales abundantes ofrece la posibilidad de disminuir la contaminación por residuos y el poder producir artículos de valor agregado de interés para la sociedad de manera sostenible. Muchos de esos procesos están en vías de optimización para su uso en el futuro cercano, idealmente en la sustitución gradual de los combustibles y materiales fósiles.

## Agradecimientos

Se agradece ampliamente al CONACYT y DGAPA-UNAM el apoyo recibido para la realización de las investigaciones relacionadas con esta temática.

## Conflicto de interés

Los autores no tienen conflicto de interés que declarar.

## Referencias

- Alonso, D. M., Bond, J. Q. & Dumesic, J. A. (2010). Catalytic conversion of biomass to biofuels. *Green chemistry* 12(9): 1493-1513. <https://doi.org/10.1039/C004654J>
- Alonso, D. M., Wettstein, S. G. & Dumesic, J. A. (2013). Gamma-valerolactone, a sustainable platform molecule derived from lignocellulosic biomass. *Green Chem.* 15(3): 584-595. <https://doi.org/10.1039/C3GC37065H>
- Arakawa, H., Aresta, M., Armor, J. N., Barteau, M. A., Beckman, E. J., Bell, A. T. & Tumas, W. (2001). Catalysis research of relevance to carbon management: progress, challenges, and opportunities. *Chem. Rev.* 101(4): 953-996. <https://doi.org/10.1021/cr000018s>

- Clement, M. J., Corma, A. & Iborra, S. (2014). Conversion of biomass platform molecules into fuel additives and liquid hydrocarbon fuels. *Green Chem.* 16(2): 516-547. <https://doi.org/10.1039/C3GC41492B>
- Corma, A., Iborra, S. & Velty, A. (2007). Chemical routes for the transformation of biomass into chemicals. *Chem. Rev.* 107(6): 2411-2502. <https://doi.org/10.1021/cr050989d>
- De Jong, E., Higson, A., Walsh, P. & Wellisch, M. (2020). Bio-based chemicals. IEA Bioenergy.
- Dutta, S., Iris, K. M., Tsang, D. C., Ng, Y. H., Ok, Y. S., Sherwood, J. & Clark, J. H. (2019). Green synthesis of gamma-valerolactone (GVL) through hydrogenation of biomass-derived levulinic acid using non-noble metal catalysts: A critical review. *Chemical Engineering Journal* 372: 992-1006. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.199>
- Elangovan, S., Topf, C., Fischer, S., Jiao, H., Spannenberg, A., Baumann, W. & Beller, M. (2016). Selective catalytic hydrogenations of nitriles, ketones, and aldehydes by well-defined manganese pincer complexes. *J. Am. Chem. Soc.* 138(28): 8809-8814. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b03709>
- Gallezot, P. (2007). Catalytic routes from renewables to fine chemicals. *Catal. Today* 121(1-2): 76-91. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2006.11.019>
- Gallezot, P. (2012). Conversion of biomass to selected chemical products. *Chem. Soc. Rev.* 41(4): 1538-1558. <https://doi.org/10.1039/C1CS15147A>
- Garduño, J. A. & García, J. J. (2018). Non-pincer Mn (I) organometallics for the selective catalytic hydrogenation of nitriles to primary amines. *ACS Catalysis* 9(1): 392-401. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b03899>
- Gulyaeva, E. S., Osipova, E. S., Buhaibeh, R., Canac, Y., Sortais, J. B., & Valyaev, D. A. (2022). Towards ligand simplification in manganese-catalyzed hydrogenation and hydrosilylation processes. *Coord. Chem. Rev.* 458: 214421. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214421>
- Huber, G. W. & Corma, A. (2007). Synergies between bio-and oil refineries for the production of fuels from biomass. *Angew. Chemie International Edition* 46(38): 7184-7201. <https://doi.org/10.1002/anie.200604504>
- IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught & A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019-) created by Chalk. S. J. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.
- Jurado-Vázquez, T, Arévalo, A. & García, J. J. (2021). Transfer Hydrogenation of Levulinic Acid to  $\gamma$ -Valerolactone and Pyrrolidones Using a Homogeneous Nickel Catalyst. *Eur. J. Inorg. Chem.* 5: 445-450. <https://doi.org/10.1002/ejic.202001063>
- Kamm, B., Gruber, P. R. & Kamm, M. (2006). Biorefineries. Industrial processes and products. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527619849>
- Kumaravel, S., Thiripuranthagan, S., Radhakrishnan, R., Erusappan, E., Durai, M., Devarajan, A. & Mukannan, A. (2019). Liquid phase esterification of levulinic acid into ethyl levulinate over sulphobenzylated nanoporous Al-SBA-15 catalyst. *J. of Nanoscience and Nanotechnology* 19(11):6965-6977. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16637>

- Liu, Z., Yang, Z., Wang, P., Yu, X., Wu, Y., Wang, H. & Liu, Z. (2019). Co-catalyzed hydrogenation of levulinic acid to  $\gamma$ -valerolactone under atmospheric pressure. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 7(22): 18236-18241. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04803>
- Mika, L. T. & Horváth, I. T. (2021). Homogeneous transition metal catalyzed conversion of levulinic acid to gamma-valerolactone. In Peter C. Ford & Rudi van Eldik (Eds.) *Advances in Inorganic Chemistry* 77 (pp. 1-25). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.adioch.2021.02.004>
- Mika, L. T., Cséfalvay, E. & Németh, Á. (2018). Catalytic conversion of carbohydrates to initial platform chemicals: chemistry and sustainability. *Chem. Rev.* 118(2): 505-613. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00395>
- Mukherjee, A., Nerush, A., Leitus, G., Shimon, L. J., Ben David, Y., Espinosa Jalapa, N. A. & Milstein, D. (2016). Manganese-catalyzed environmentally benign dehydrogenative coupling of alcohols and amines to form aldimines and H<sub>2</sub>: a catalytic and mechanistic study. *J. Am. Chem. Soc.* 138(13): 4298-4301. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b13519>
- Ravelli, D. & Samori, C. (Eds.) (2021). Biomass Valorization: Sustainable Methods for the Production of Chemicals. *John Wiley & Sons.* <https://www.wiley.com/en-au/Biomass+Valorization:+Sustainable+Methods+for+the+Production+of+Chemicals-p-9783527347179>
- Roa, D. A. & García, J. J. (2021) Mild reduction with silanes and reductive amination of levulinic acid using a simple manganese catalyst. *Inorg. Chim. Acta* 516: 120167. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2020.120167>
- Sortais, Jean-Baptiste (Ed.). (2021). Manganese catalysis in organic synthesis. *John Wiley & Sons.* ISBN: 978-3-527-34730-8. <https://www.wiley-vch.de/en/areas-interest/natural-sciences/chemistry-11ch/catalysis-11ch4/manganese-catalysis-in-organic-synthesis-978-3-527-34730-8>
- Stegmann, P, Londo, M. & Junginger, M., (2020). The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation & Recycling: X* 6: 100029. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>
- Valyaev, D. A., Lavigne, G. & Lugan, N. (2016). Manganese organometallic compounds in homogeneous catalysis: Past, present, and prospects. *Coord. Chem. Rev.* 308: 191-235. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.06.015>
- Werpy, T. & Petersen, G. (Eds.) (2004). Top value-added chemicals from biomass: volume I--Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas (No. DOE/GO-102004-1992). National Renewable Energy Lab. <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35523.pdf>

## Notas sobre las figuras.

Se informa lo siguiente para los efectos que proceda con los derechos de autor:

**Figura 1.** Creación propia

**Figura 2.** Adaptada de: Alonso, D. M., Bond, J. Q. & Dumesic, J. (2010). Catalytic conversion of biomass to biofuels. *A. Green chem.* 12(9): 1493-1513. <https://doi.org/10.1039/C004654J>

**Figura 3.** Adaptada de: Alonso, D. M., Wettstein, S. G. & Dumesic, J. A. (2013). Gamma-valerolactone, a sustainable platform molecule derived from lignocellulosic biomass. *Green Chem.* 15(3): 584-595. <https://doi.org/10.1039/C3GC37065H>

**Figura 4.** Adaptada de: Kumaravel, S., Thiripuranthagan, S., Radhakrishnan, R., Erusappan, E., Durai, M., Devarajan, A. & Mukannan, A. J. (2019). Liquid Phase Esterification of Levulinic Acid into Ethyl Levulinate Over Sulphobenzylated Nanoporous Al-SBA-15 Catalyst. *Nanosci. Nanotechnol.* 19(11): 6965-6977. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16637>

**Figura 5.** Creación propia

**Figura 6.** Creación propia

2023 TECNOCENCIA CHIHUAHUA

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>