

Logros y desafíos en la producción catalítica de biocombustibles de 2° generación valéricos

Achievements and challenges regarding the catalytic production of 2nd generation valeric biofuels

Presentación: 23/10/2025

Francisco Agustín Martínez

Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Centro Científico Tecnológico Santa Fe, Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica, Argentina.
fame5184@gmail.com

Karla Geraldine Martínez Figueredo

Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Centro Científico Tecnológico Santa Fe, Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica, Argentina.
karlamfig@gmail.com

Darío Jobino Segobia

Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Centro Científico Tecnológico Santa Fe, Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica, Argentina / Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química, Santa Fe, Argentina.
dariojob1@gmail.com

Nicolás Maximiliano Bertero

Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Centro Científico Tecnológico Santa Fe, Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica, Argentina / Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química, Santa Fe, Argentina.
nbertero@fiq.unl.edu.ar

Resumen

En este trabajo exponemos las principales características de los biocombustibles de 2° generación valéricos, describiendo además las rutas de obtención catalíticas más importantes, los logros conseguidos en los últimos años en esta línea de investigación en el INCAPE - CCT Santa Fe y los principales desafíos pendientes. Por último, se explica la importancia de realizar un abordaje interdisciplinario al tema, destacando la relevancia de la integración de la ingeniería química con otras ramas de la ingeniería, de manera de poder evaluar la potencialidad técnica de estos biocombustibles para la transición energética del transporte y la movilidad en la provincia de Santa Fe.

Palabras claves: Biocombustibles valéricos, biomasa provincia, Catálisis multifuncional, multidisciplinariedad.

Abstract

In this work, we present the main characteristics of second-generation valeric biofuels, explaining the most important catalytic production routes, the achievements made in recent years in this line of research at INCAPE - CCT Santa Fe, and also highlighting the main challenges ahead. Finally, we explain the importance of an interdisciplinary approach to the topic, highlighting the importance of integrating chemical engineering with other branches of engineering to assess the technical potential of these biofuels for the energy transition of transportation and mobility in the province of Santa Fe.

Keywords: Valeric biofuels, provincial biomass, Multifunctional catalysis, multidisciplinary.

Introducción

La exploración y desarrollo de nuevas fuentes de energía que no contribuyan al aumento desmedido de las emisiones de gases de efecto invernadero son la opción más prometedora para el sector transporte en las próximas décadas, dado que dicho sector sigue consumiendo mayormente recursos fósiles como el petróleo (Köhler et al., 2009). Por citar un ejemplo, del total de la energía producida en Estados Unidos durante los años 2023 y 2024 el 28,1 % fue consumida por el sector transporte, habiendo provenido el 93,0 % de dicha energía de fuentes fósiles (U.S. Energy Information Administration, 2025). Sin embargo, factores tales como la creciente demanda energética mundial, la volatilidad de los precios del petróleo, la

inestabilidad en países de Medio Oriente y el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera motivaron la búsqueda de combustibles alternativos más renovables como los biocombustibles.

La 1° generación de biocombustibles utiliza como materia primas aceites vegetales o azúcares que también podrían ser destinados a propósitos alimenticios, lo que genera un dilema ético, especialmente en países en vías de desarrollo como el nuestro. Un claro ejemplo de esto es el biodiesel producido en Argentina a partir de aceite de soja. Este biodiesel, el cual se emplea mezclado al 7,5 % con gasoil (D'Angelo et al., 2025) no alcanza para solucionar el déficit de gasoil en el país, teniéndose que importar gasoil en el año 2024 por un monto de 1088 millones de dólares (Razzetti, 2025). De no hacerlo, los sectores agrícolas y del transporte en nuestro país se ven seriamente afectados, como se evidenció en el mes de junio del año 2022. A diferencia de Argentina, en Brasil la proporción del biodiésel actual usada es del 15 % y se espera que llegue al 20 % (como en EEUU en 2030).

Similarmente al diésel, la nafta también pasa por una situación deficitaria en el país. A pesar de que las refinerías operan a su máxima capacidad, sigue siendo necesario importar gasolina. Muestra de ello es que, en los últimos ocho años, el bioetanol proveniente de 6 plantas a base de maíz y 11 plantas a base de caña de azúcar evitó importaciones de naftas por 5.050 millones de dólares (D'Angelo & Calzada, 2025). Actualmente en la gasolina se usa un 12 % de bioetanol, pero se está considerando elevar esto al 15 % para evitar desabastecimientos de naftas.

Resulta evidente que la producción de combustibles de tipo diésel y gasolina debe crecer en Argentina. Además, es necesario comenzar a pensar en producir biocombustibles de 2° generación, de manera que sus materias primas no compitan por el área sembrada con cultivos cuyo fin es alimenticio. Así, la biomasa lignocelulósica ha sido identificada como una materia prima muy promisoría para obtener estos biocombustibles debido a que: a) se puede encontrar en gran cantidad en residuos agrícolas y forestales; b) es una biomasa abundante y relativamente poco costosa.

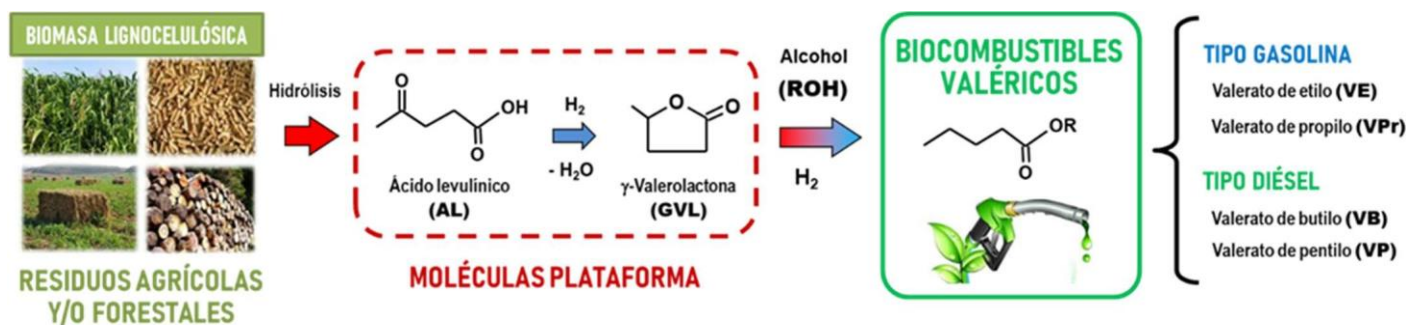


Fig. 1: Producción catalítica de biocombustibles de 2° generación valéricos desde moléculas plataforma derivadas de biomasa lignocelulósica proveniente de residuos forestales y agrícolas.

La biomasa lignocelulósica proveniente de residuos forestales y agrícolas, consistente mayormente en tres polímeros naturales celulosa, hemicelulosa y lignina (Kang et al., 2018), puede hidrolizarse y convertirse inicialmente en moléculas más sencillas y reactivas denominadas moléculas plataforma, como son el ácido levulinico (AL) (Climent et al., 2014) y la γ-valerolactona (GVL) mostradas en la Figura 1 (Alonso et al., 2013). En los últimos años estos procesos de deconstrucción de lignocelulosa mediante hidrólisis ácida han logrado grandes avances técnicos, aumentando su rendimiento, al igual que la hidrogenación catalítica de LA a GVL.

Entre los productos que pueden obtenerse a partir de la GVL en una biorrefinería se encuentran los ésteres valéricos, o valeratos de alquilo (VA), los cuales tienen un apreciable contenido energético, son débilmente polares, presentan una buena estabilidad a la oxidación y no son corrosivos, propiedades que los convierten en atractivos biocombustibles (Lange et al., 2010). En la Tabla 1 se resumen las principales propiedades fisicoquímicas de los biocombustibles valéricos y las de los biocombustibles actuales de 1° generación.

Específicamente los VA de cadena relativamente larga, como el valerato de pentilo (VP) y butilo (VB), exhiben propiedades compatibles con cortes diésel (Lange et al., 2010), mientras que los de cadena más corta, como el valeratos de propilo (VPr) y etilo (VE), muestran propiedades combustibles similares a los cortes de gasolina. El comportamiento de los VA como biocombustibles en motores de combustión interna fue analizado por algunos autores (Lange et al., 2010)(Contino et al., 2013)(Contino et al., 2014), arribando a la conclusión de que los mismos pueden usarse puros o al 20% en mezclas con sus contrapartes fósiles sin reducir significativamente la eficiencia del motor ni aumentar marcadamente las emisiones, aunque se desconoce si este porcentaje podría ser mayor.

Propiedad	Bioetanol	VE	VPr	Biodiesel (FAME)	VB	VP
Contenido de oxígeno (%p/p)	35	24,6	22,2	11	20,2	18,6
Densidad (kg/l)	0,79	0,874	0,870	0,88	0,868	0,874
Azufre (ppm)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	26,9	30,3	31,5	38	32,6	33,5
Rango de destilación (°C)	78,3	142	167	340-355	187	206
BRON	108,6	100	90	-	-	10
Índice de cetanos	8	17,1	-	50-65	24,5	30,3
Estabilidad	Buena	Buena	Buena	Marginal	Buena	Buena

Tabla 1: Comparación de las propiedades de los biocombustibles de 2° generación valéricos y los de 1° generación [VE: valerato de etilo; VPr: valerato de propilo; VB: valerato de butilo; VP: valerato de pentilo].

Estado del arte en relación a la producción de biocombustibles valéricos

Las principales rutas de reacción para la obtención de un valerato de alquilo con un grupo hidrocarbonado R a partir de GVL se muestran en la Figura 2.

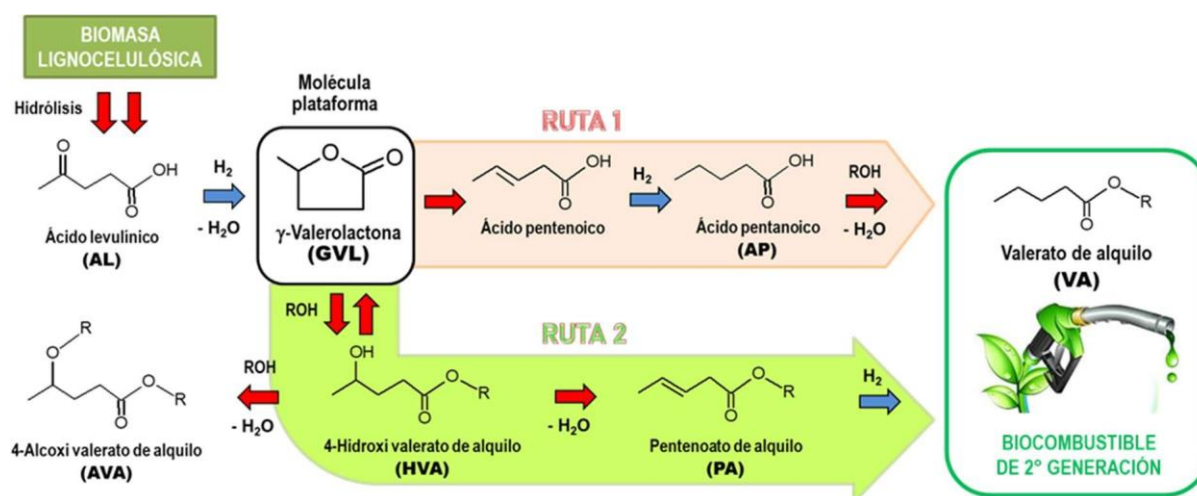


Fig. 2: Principales rutas catalíticas para la obtención de biocombustibles valéricos desde γ-valerolactona (GVL), alcohol (ROH) e H₂ (C reacción química catalizada por ácido; C reacción catalizada por metal).

Un análisis minucioso del estado del arte en lo relativo a la producción de VA fue elaborado por nuestro grupo en el año 2023 (Martínez Figueredo, Martínez, et al., 2023). La RUTA 1 (Figura 2), propuesta por Lange y col., involucra al intermediario ácido pentanoico, rápidamente hidrogenable sobre la función metálica a ácido pentanoico (AP). Estos autores estudiaron inicialmente la conversión de GVL a AP sobre 150 catalizadores, obteniendo el mejor resultado (selectividad a AP de 80-85% trabajando a 250 °C, 10 bar de H₂, una relación molar H₂/GVL de 9:1 con una velocidad espacial WHSV=2 h⁻¹) sobre Pt/HZSM5/SiO₂, observando una dramática desactivación. Seguidamente, para la esterificación de AP a VE, se empleó una resina de intercambio iónico ácida, alcanzando una selectividad de VE superior al 95%. Estos autores no estudiaron la conversión directa de GVL a VE o de GVL a VP en procesos “one-pot”. Wang y col. informaron la producción conjunta de AP y VE sobre un catalizador de Cu(10%)/@HZSM-5 (Si/Al=100) preparado por cristalización hidrotérmica *in-situ* usando partículas de CuO/SiO₂ como gérmenes de cristalización. La dispersión del Cu fue del 41%, obteniéndose nanopartículas de Cu en fuerte interacción con el soporte. Alimentando una solución de GVL en EtOH a un reactor de lecho fijo continuo (a 300 °C, 10 bar de H₂ y con WHSV=0,6 h⁻¹) informaron un rendimiento conjunto de AP y VE del 80%. Estos autores también ensayaron Co(10%)/@HZSM-5 (Si/Al=150), preparado de la misma manera pero usando partículas de Co₃O₄/SiO₂ como gérmenes de cristalización, logrando obtener una selectividad conjunta a AP y VE del 93,3% en las mismas condiciones de reacción. Xu y col. estudiaron la conversión de GVL en EtOH sobre catalizadores de Cu (con 30% de carga) y soportados en diferentes sólidos ácidos, en condiciones discontinuas (a 200 °C y 50 bar de H₂) informando una selectividad conjunta a AP y VE del 53% a una conversión de GVL del 21% (productividad combinada a VE y AP de 1,5 mmol.g⁻¹.h⁻¹) luego de 6 h sobre un catalizador de Cu-WO₃/ZrO₂. En el caso particular de la obtención de VP, Yan y col. usando catalizadores de Pd/HY en un proceso discontinuo y sin utilizar PeOH adicional lograron un valor de productividad de 89 mmol.g⁻¹.h⁻¹, aunque con cargas de Pd muy altas (mayores o iguales a 5%) y en condiciones severas (T > 250 °C y p_{H2} > 60 bar).

Por otro lado, la RUTA 2 de reacción para obtener VA desde GVL (Figura 2) implica: (1) la adición nucleofílica del ROH a la GVL sobre sitios ácidos para formar el intermediario 4-hidroxi valerato de alquilo (HVA); (2) la deshidratación del HVA al pentenoato de alquilo (PA) sobre la función ácida y (3) la posterior hidrogenación del PA a VA sobre sitios metálicos. Inicialmente, Chan-Thaw y col. estudiaron la producción de VE sobre catalizadores de Cu (cargas entre 5 y 8%) soportados en $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ preparados por el método de quimisorción- hidrólisis. El reactor se operó de manera discontinua durante 20 h a 250 °C, 10 bar de H_2 , 700 rpm, con relación GVL/catalizador de 10:1 (en peso) y relación GVL/EtOH de 1:10 (molar). La mejor selectividad a VE (59%) se alcanzó a una conversión de GVL de 69% sobre Cu(8%)/ $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ (4,7% de ZrO_2). Respecto a la obtención de VP, podemos decir que en todos los estudios donde se utilizaron catalizadores de Cu la productividad a VP estuvo entre 48 y 92 $\text{mmol.g}_M^{-1}.\text{h}^{-1}$. Velisoju y col. exploraron la producción continua de VE en fase gaseosa a partir de GVL sobre catalizadores de Ni(10%)/HZSM-5 promovidos, alimentando una mezcla de GVL (al 10%) en EtOH y realizando la reacción a 250 °C en flujo de H_2 (WHSV=0,54 $\text{mL.g}_C^{-1}.\text{s}^{-1}$). Los promotores metálicos fueron Cr, Mo y W (al 2%), los cuales se incorporaron al catalizador por coimpregnación con el precursor $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, usando una zeolita HZSM5 (Si/Al=40) como soporte. Aunque se logró una elevada selectividad a VE (58,6-92,0%), la conversión de GVL fue inferior al 10%, por lo que la productividad a VE estuvo sólo entre 9 y 19,1 $\text{mmol.g}_M^{-1}.\text{h}^{-1}$. Finalmente, Sun y col. ensayaron Co(10%)/HZSM5 en la conversión de GVL en presencia de EtOH a 240 °C y 30 bar de H_2 , obteniendo en 3 h una conversión de GVL del 93% y una selectividad a VE y PA del 69% y 22% respectivamente. En la RUTA 2, el mayor desafío pasa por aumentar la conversión de GVL y la selectividad a AV, logrando mayores valores de productividad al biocombustible deseado.

Resumen de resultados obtenidos en GICIC-INCAPE

Este desafiante tema de investigación viene siendo estudiado hace aproximadamente 6 años por investigadores del Grupo de Investigaciones en Ciencias e Ingeniería Catalíticas (GICIC) perteneciente al Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica (INCAPE) del Centro Científico Tecnológico de la ciudad de Santa Fe, obteniéndose los resultados que se describen aquí en el marco de dos tesis doctorales, la de la Dra. Karla Martínez Figueredo y la del Ing. Francisco Martínez, ambas financiadas con becas doctorales del CONICET.

En el inicio de esta línea de investigación, en base al análisis de la literatura disponible, se identificó la necesidad de incluir en el sistema catalítico dos funciones catalíticas diferentes, una ácida y otra metálica, para poder llevar adelante las transformaciones químicas deseadas a lo largo de la RUTA 2 de conversión de GVL a VP. En este sentido, se llevó adelante un diseño sistemático, donde se estudió inicialmente el desempeño de diferentes sólidos ácidos bien diferenciados en cuanto a densidad total de sitios ácidos, fuerza ácida y naturaleza Lewis (L)/Brønsted (B) para poder seleccionar un soporte ácido adecuado. De este estudio, el cual incluyó muestras comerciales de SiO_2 , $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, zeolitas NaY, HY, HMOR, HBEA y HZSM-5 y muestras preparadas en laboratorio de HPA/ SiO_2 y ZnO/SiO_2 , se obtuvo como conclusión que la muestra de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ con una relación $L/(L+B)=0.79$ y una fuerza ácida muy variada fue más selectiva al intermediario PA deseado que al indeseable AVA, aunque el balance de átomos de carbono sólo alcanzó el 75% al final de la reacción, indicando que una gran cantidad de GVL o de intermediarios reactivos permanecieron adsorbidos sobre este sólido (Martínez Figueredo, Segobia, et al., 2022). Estos resultados permitieron seleccionar la $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (SA) como un soporte promisorio para el sistema catalítico bifuncional. Cabe aclarar que, a pesar de realizar pruebas preliminares en diferentes condiciones térmicas, no se observó una actividad apreciable a temperaturas inferiores a 230 °C. Por esto, y en acuerdo con la literatura, la temperatura de reacción se fijó en 250 °C.

Los primeros catalizadores bifuncionales que se prepararon en el grupo de trabajo fueron del tipo Ni(8%)/SA y la incorporación del Ni al soporte SA se realizó por dos métodos diferentes: impregnación a humedad incipiente (I) y precipitación-deposición (PD) (Martínez Figueredo et al., 2020). La reacción de conversión de GVL se llevó a cabo a 250 °C, 10 bar de presión de H_2 , empleando 250 mg de catalizador bifuncional y una relación $\text{PeOH/GVL}=40/1,5$ (vol.). Se observó que el método de preparación de catalizadores bifuncionales de Ni tiene un impacto significativo en la actividad catalítica para la producción “one-pot” de VP a partir de GVL, PeOH e H_2 . El método de precipitación-deposición, que produce una mayor dispersión de Ni, reduce significativamente la densidad de sitios ácidos en el catalizador bifuncional Ni/SA-PD y, en consecuencia, el rendimiento catalítico. Por el contrario, mediante el método de impregnación a humedad incipiente, se obtiene un catalizador Ni/SA-I poco disperso y con mayor densidad total de sitios ácidos mostrando un desempeño significativamente mejor. Sin embargo, el método de preparación no tiene un impacto tan significativo en la selectividad catalítica, alcanzando una selectividad a VP del 71,6 % y el 82,2 % para Ni/SA-PD y Ni/SA-I respectivamente. Empleando el catalizador de Ni/SA-I tres veces consecutivas fue posible verificar que ocurre una cierta desactivación. La conversión de GVL disminuyó del 75,2% en el primer ciclo de reacción al 59,2% en el tercer ciclo. Las caídas para el rendimiento en VP y la selectividad a VP del primer ciclo al tercero fueron de aproximadamente 30,2% y 28,6% respectivamente, pudiéndose comprobar que esta desactivación no se debe a la lixiviación del Ni. Finalmente,

durante un ciclo de reacción de 24 h con Ni/SA-I se logró una conversión de GVL del 83,5 % con una selectividad a VP del 87,8 % alcanzando de esta manera una productividad a VP de 58,0 mmol.g⁻¹.h⁻¹, es decir del mismo orden al obtenido con catalizadores de Cu por otros autores.

Cabe mencionar que también se prepararon catalizadores de Co/SA y Cu/SA por impregnación a humedad incipiente con cargas metálicas de alrededor del 8%, aunque el desempeño catalítico de estas muestras fue ligeramente inferior al del catalizador Ni(8%)/SA-I, razón por la cual no se siguieron estudiando.

A ese momento (año 2020), el uso de catalizadores basados en metales nobles estaba casi exclusivamente asociado a la RUTA 1 de obtención de VA, no habiéndose prácticamente empleado este tipo de catalizadores en la RUTA 2. Esto motivó al grupo a preparar, caracterizar y ensayar catalizadores basados en metales nobles en la RUTA 2 de obtención de VP desde GVL, PeOH e H₂. De esta forma, se prepararon por impregnación a humedad incipiente, empleando precursores clorados, catalizadores basados en Pt, Pd, Ru e Ir con cargas metálicas cercanas al 1% (Martínez Figueredo et al., 2021). Entre estas muestras, el catalizador de Pt/SA obtuvo el mayor valor de productividad a VP (300,1 mmol.g⁻¹.h⁻¹) alcanzando una conversión de GVL del 69,4% y un rendimiento a VP del 51,0% luego de 8 h. Sobre Ru e Ir, aunque las conversiones han sido levemente inferiores a la obtenida con Pt (60,6 y 57,7% respectivamente), los rendimientos en VP resultaron sensiblemente menores (16,0 y 11,9%) debido a la formación de AVA o a la acumulación de PA debido a una menor capacidad del metal para hidrogenar el PA a VA. De esta manera con Pt/SA se mejoró significativamente la productividad a VP aunque empleando catalizadores de mayor costo que en el caso de Ni/SA, debido al contenido de metal noble.

Siguiendo esta línea, y con el objeto de ensayar otros metales nobles, se prepararon catalizadores basados en Rh y Pd con 1% de carga metálica por impregnación a humedad incipiente a partir también de precursores clorados (Martínez Figueredo, Virgilio, et al., 2022). En general se observó que la densidad total de sitios ácidos del catalizador basado en Pd era sensiblemente mayor a la del basado en Rh. Respecto del balance Lewis/ Brønsted, el catalizador de Rh/SA mostró una relación L/(L+B)=0,65 mientras que para Pd/SA fue de 0,66, es decir que los catalizadores bifuncionales contenían una proporción similar y más baja de sitios Lewis que el soporte SA, con L/(L+B)=0,79. Por otro lado, se verificó que el tamaño medio de las partículas metálicas era de 5,6 nm y 3,7 nm para Rh y Pd respectivamente. Al ensayar la actividad catalítica de estas muestras en la conversión de GVL en PeOH a 250 °C y 10 bar de H₂ se encontró que luego de 8 h, la conversión de GVL alcanzó valores de 60,5 y 81,1% para Rh/SA y Pd/SA respectivamente, mientras que la selectividad a VP fue de 74,5 y 86,4%. Con estos catalizadores fue posible obtener unos valores de productividad a VP de 376,5 y 660,7 mmol.g⁻¹.h⁻¹ para Rh/SA y Pd/SA respectivamente, que siguen siendo hasta ahora los valores más altos publicados en la literatura (Karla Geraldine Martínez Figueredo, 2022).

La tesis doctoral en curso del Ing. Francisco Martínez se orientó a la optimización del sistema catalítico, tanto en lo que respecta al desempeño del soporte de SA como al de la función metálica. Inicialmente se planteó el estudio de la influencia de la relación Si/Al del soporte de SA en la producción de PA, empleando 4 muestras comerciales de este soporte las cuales fueron extensamente caracterizadas (Martínez et al., 2024). De este estudio fue posible seleccionar la SA que más promovía las reacciones deseables frente a las indeseables.

Luego de esta optimización del soporte de SA en lo que a propiedades ácidas se refiere y teniendo en cuenta que los metales más promisorios para formar parte del sistema catalítico bifuncional eran Pt, Rh y Pd, la tesis del Ing. Francisco Martínez se enfoca actualmente en la exploración del efecto de la carga y del precursor metálico en estos catalizadores sobre la productividad a VP en las mismas condiciones experimentales ensayadas previamente. Con todo el conocimiento adquirido hasta ese momento, el grupo de trabajo publicó un *review* sobre este tema (Martínez Figueredo, Martínez, et al., 2023), donde se explica que la optimización de la función ácida proporcionada por la SA (variando la relación Si/Al) y la dispersión metálica (variando el precursor metálico y la carga) resultan claves para aumentar la productividad, revisando lo publicado hasta el momento.

Recientemente, en nuestro grupo se realizaron ensayos de producción de VP y VB sobre catalizadores de Pt, también soportados en SA, pero con cargas de Pt cercanas al 0,3% obteniendo una productividad a VP y VB entre 990 y 1100 mmol.g⁻¹.h⁻¹ (Martínez et al., 2025a), es decir valores entre 11 y 15 veces superiores a los informados por otros autores con catalizadores de Cu. Actualmente se están escribiendo un par de artículos científicos que incluyen estos últimos notables resultados. Sin embargo, el resultado más significativo fue el obtenido con un catalizador de Pt(0,1%)/SA sobre el cual se logró una productividad superlativa a VP de 2650 mmol.g⁻¹.h⁻¹ luego de 8 h, que resulta ser entre 28 y 37 veces superior a los valores informados con catalizadores de Cu. Esto claramente muestra el gran potencial de estos catalizadores bifuncionales.

Desafíos catalíticos pendientes

Los principales desafíos a abordar en esta línea de investigación son los siguientes: (1) Seguir aumentando la productividad a VA a través de la modificación de variables como acidez superficial, naturaleza del metal, dispersión metálica, carga metálica y precursor; (2) ensayar catalizadores bifuncionales en la producción de

valeratos compatibles con cortes de gasolina (VPr y VE); (3) construir un sistema de reacción que permita estudiar el comportamiento de estos catalizadores en procesos continuos, más compatibles con la producción a gran escala de biocombustibles; (4) investigar más sobre las causas de la desactivación observada sobre estos catalizadores.

Algunos de estos desafíos están siendo abordados en la tesis doctoral del Ing. Francisco Martínez, pero para el abordaje de otros se necesitará contar con más recursos humanos, equipamiento y fuentes de financiamiento. Relativo a este último punto, cabe mencionar que el sistema científico argentino se encuentra pasando por una profunda crisis de financiamiento. Por desgracia, esta falta de subsidios también impacta de manera directa en la captación de recursos humanos para el sistema científico, dado que muchos jóvenes profesionales no se ven atraídos por el estado actual del mismo y prefieren orientarse al mercado laboral privado. En este sentido, es necesario revalorizar el sistema científico argentino por medio de alianzas o proyectos en conjunto con el sector privado, el cual podría beneficiarse con el desarrollo de estas tecnologías.

Importancia del enfoque multidisciplinario

Aunque los resultados obtenidos en el GICIC-INCAPE en esta línea de investigación son novedosos y vienen siendo los mejores informados en revistas científicas de prestigio internacional, es relevante mencionar que para que los biocombustibles valéricos puedan ser una alternativa sustentable para reemplazar los combustibles fósiles hace falta estudiar su potencialidad real en una probable transición energética abordando la temática de manera multidisciplinaria. Esto se debe a las siguientes razones: (1) no se tienen certezas sobre el potencial real de producción de la molécula plataforma GVL a partir de desechos agrícolas y forestales en las provincias argentinas; (2) se desconoce hasta donde se puede aumentar la productividad de los procesos catalíticos y (3) hay pocos estudios de la utilización como combustibles de VA en motores de combustión interna.

En Argentina se han realizado algunos estudios y mapas espaciales de biomasa residual con potencial energético, por ejemplo, los elaborados por proyecto PROBIOMASA–WISDOM (FAO–INTA), que estiman la oferta de residuos agrícolas y forestales a nivel provincial mediante metodologías SIG, (Denaday et al., 2020)(Sapino et al., 2018) e iniciativas del MAGyP y de la Secretaría de Energía que publican balances energéticos por radio censal y mapas de potencial bioeconómico a escala nacional (Mapa Del Potencial Bioeconómico Argentino. Primera Estimación Georreferenciada Del Potencial Bioeconómico Del País, 2023) (Ministerio de Agricultura, 2025). No obstante, estos estudios presentan las siguientes limitaciones: (a) las exclusiones aplicadas son de carácter general y no permiten saber con precisión qué fracción de la biomasa residual puede ser efectivamente aprovechada en cada contexto local y (b) no incluyen información sistemática sobre la composición química de los residuos (celulosa, hemicelulosa, lignina). La literatura indica rangos promedio de 40–80 % de celulosa, 15–30 % de hemicelulosa y 10–25 % de lignina en residuos agrícolas y forestales (Menéndez & Hilbert, 2013), pero con una fuerte variabilidad espacial y temporal, lo que hace que la incertidumbre en las estimaciones de la biomasa aprovechable para la producción de moléculas plataforma AL y GVL sea elevada.

En segundo lugar, aunque se vienen realizando importantes avances en el aumento de la productividad a AV, todavía se desconoce hasta que valores se podría llegar. Además, falta realizar un estudio de la estabilidad a largo plazo de los catalizadores en procesos de tipo continuos, compatibles con una producción a gran escala.

Finalmente, respecto al uso de estos biocombustibles en motores, los grupos de Lange y col. (Lange et al., 2010) y Contino y col. (Contino et al., 2013)(Contino et al., 2014) realizaron ensayos experimentales con VA puros o mezclándolos al 20% con cortes fósiles, concluyendo que los mismos no reducen la eficiencia del motor ni aumentan las emisiones significativamente. El mayor interrogante en el estudio de la combustión, y lo que resultaría sumamente importante para evaluar la viabilidad de la transición energética, es saber si esa proporción del 20% en VA puede aumentarse.

Todas estas incertidumbres motivaron la conformación de un equipo multidisciplinario conformado por docentes investigadores de FCA-UNL, INCAPE y CIMEC quienes abordarán esta temática en el marco del proyecto CTI en Red recientemente otorgado titulado “Estudio estadístico, experimental y computacional de alternativas energéticas renovables: producción y uso en motores de biocombustibles valéricos y furánicos obtenibles de biomasa provincial”. Este tipo de proyectos resulta imprescindible para evaluar la factibilidad real de la transición energética a mediano plazo. Cabe mencionar que los institutos INCAPE y CIMEC ya han comenzado a colaborar en el marco del proyecto de cooperación internacional titulado: “Abordaje interdisciplinario teórico-experimental para una transición energética de los países de la región mediante la integración de combustibles ecológicos y movilidad eléctrica”, en el cual participan las siguientes instituciones: ANII (Uruguay), FAPESP (Brasil), CONACYT (Paraguay) y CONICET (Argentina). La primera reunión de trabajo de este proyecto ya tuvo lugar el mes de Marzo de 2025 y pudimos contar con la presencia de destacados investigadores de dichas instituciones en las instalaciones del INCAPE y CIMEC en el CCT – Santa Fe.

Conclusiones

Los biocombustibles valéricos tienen propiedades interesantes para el reemplazo de combustibles fósiles tipo diésel y gasolina, además el estudio de su producción catalítica viene arrojando prometedores resultados. Sin embargo, son muy pocos los grupos de investigación de Argentina que han abordado esta temática concreta y parece necesitarse de un abordaje multidisciplinario para evaluar la factibilidad técnica real de su empleo en la transición energética del sector del transporte en la provincia de Santa Fe. En base a la difícil situación económica actual del sistema científico argentino, la creación de convenios con empresas interesadas o la presentación conjunta de proyectos entre grupos de investigación argentinos y extranjeros o entre científicos argentinos y empresas se perfilan como importantes alternativas para conseguir subsidios para esta línea de investigación de tema prioritario.

Referencias

- Alonso, D. M., Wettstein, S. G., & Dumesic, J. A. (2013). Gamma-valerolactone, a sustainable platform molecule derived from lignocellulosic biomass. *Green Chemistry*, 15(3), 584–595. <https://doi.org/10.1039/c3gc37065h>
- Climent, M. J., Corma, A., & Iborra, S. (2014). Conversion of biomass platform molecules into fuel additives and liquid hydrocarbon fuels. *Green Chemistry*, 16(2), 516–547. <https://doi.org/10.1039/c3gc41492b>
- Contino, F., Dagaut, P., Dayma, G., Halter, F., Foucher, F., & Mounaïm-Rousselle, C. (2014). Combustion and emissions characteristics of valeric biofuels in a compression ignition engine. *Journal of Energy Engineering*, 140(3), 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000161](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000161)
- Contino, F., Foucher, F., Halter, F., Dayma, G., Dagaut, P., & Mounaïm-Rousselle, C. (2013). Engine Performances and Emissions of Second-Generation Biofuels in Spark Ignition Engines: The Case of Methyl and Ethyl Valerates. *SAE Technical Paper*, 24, 98–103.
- D'Angelo, G., & Calzada, J. (2025). *La industria del bioetanol alcanzó nuevos máximos en 2024*. <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/la-83>
- D'Angelo, G., Calzada, J., & Sinópoli, G. (2025). *El aporte del biodiesel a la economía argentina*. <https://www.bcr.com.ar/es/print/pdf/node/108885>
- Denaday, F., Escartín, C., Parodi, G., & Spinazzola, E. (2020). *Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina*. https://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/19-Actualizacion-balance-biomasa.pdf
- Kang, S., Fu, J., & Zhang, G. (2018). From lignocellulosic biomass to levulinic acid: A review on acid-catalyzed hydrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 340–362.
- Karla Geraldine Martínez Figueredo. (2022). *Tesis Doctoral: Conversión de derivados de biomasa mediante sistemas catalíticos bifuncionales para la producción de biocombustibles*. Facultad de Ingeniería Química (FIQ) - Universidad Nacional del Litoral (UNL).
- Köhler, J., Whitmarsh, L., Nykvist, B., Schilperoord, M., Bergman, N., & Haxeltine, A. (2009). A transitions model for sustainable mobility. *Ecological Economics*, 68(12), 2985–2995. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.06.027>
- Lange, J. P., Price, R., Ayoub, P. M., Louis, J., Petrus, L., Clarke, L., & Gosselink, H. (2010). Valeric biofuels: A platform of cellulosic transportation fuels. *Angewandte Chemie - International Edition*, 49(26), 4479–4483. <https://doi.org/10.1002/anie.201000655>
- Mapa del Potencial Bioeconómico Argentino. Primera estimación georreferenciada del potencial bioeconómico del país*. (2023).
- Martínez, F. A., Segobia, D. J., & Bertero, N. M. (2024). Concurrent production of diesel valeric biofuel and a fuel additive in a one-pot process over SiO₂–Al₂O₃-supported catalysts: influence of the Si/Al ratio. *Sustainable Energy & Fuels*, 8, 5785–5792.
- Martínez, F. A., Vecchietti, M. J., Segobia, D. J., & Bertero, N. M. (2025, October). Conversión de gama-valerolactona en el biocombustible valerato de pentilo sobre Pt/SiO₂-Al₂O₃. *Anales Del XXIV Congreso Argentino de Catálisis (CAC 2025)*, Octubre de 2025, San Luis, Argentina.
- Martínez Figueredo, K. G., Martínez, F. A., Segobia, D. J., & Bertero, N. M. (2023). Valeric Biofuels from Biomass-Derived γ-Valerolactone: A Critical Overview of Production Processes. *ChemPlusChem*, 88(11), e2023003. <https://doi.org/10.1002/cplu.202300381>
- Martínez Figueredo, K. G., Segobia, D. J., & Bertero, N. M. (2020). Influence of the preparation method on the performance of Ni-based bifunctional catalysts in the one-pot conversion of γ-valerolactone to valeric biofuel. *Catalysis Communications*, 144(April), 106087. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2020.106087>
- Martínez Figueredo, K. G., Segobia, D. J., & Bertero, N. M. (2022). Pentyl valerate biofuel from γ-valerolactone in one-pot process: Insights on the key role of acid sites of the catalytic support. *Energy Conversion and Management: X*, 13, 100162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100162>

- Martínez Figueredo, K. G., Virgilio, E. M., Segobia, D. J., & Bertero, N. M. (2021). Valeric Biofuel Production from γ -Valerolactone over Bifunctional Catalysts with Moderate Noble-Metal Loading. *ChemPlusChem*, 86, 1342–1346. <https://doi.org/10.1002/cplu.202100249>
- Martínez Figueredo, K. G., Virgilio, E. M., Segobia, D. J., & Bertero, N. M. (2022). Production of pentyl valerate from γ -valerolactone, pentanol and H₂ using Pd and Rh-based bifunctional catalysts. *Reaction Chemistry & Engineering*, 7, 1997–2008. <https://doi.org/10.1039/D2RE00121G>
- Menéndez, J. E., & Hilbert, J. A. (2013). *Cuantificación y uso de biomasa de residuos de cultivos en Argentina para bioenergía (Análisis químico de los rastros)*.
- Ministerio de Agricultura, G. y P. (MAGyP). (2025). *Biomasa Residual para Bioeconomía. Observatorio de Bioeconomía*.
- Razzetti, N. (2025, March 15). *Parece joda: El agro argentino usa gasoil importado cuando podría autoabastecerse con biodiésel 100% nacional*. Bichos de Campo. <https://bichosdecampo.com/parece-joda-el-agro-argentino-usa-gasoil-importado-cuando-podria-autoabastecerse-con-biodiesel-100-nacional/>
- Sapino, V., Lacelli, G., Cardozo, F., León, C., Chiavassa, A., & Huerga, I. (2018). *Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa. Metodología WISDOM. Provincia de Santa Fe*. https://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/WISDOM_SantaFe_interior-web.pdf
- U.S. Energy Information Administration. (2025). June 2025 Monthly Energy Review. In *U.S. Energy Information Administration* (Issue 04). <https://www.eia.gov/mer>