



Mecanoquímica para contribuir a la valorización de los residuos agroindustriales: revisión del tema*

Yamileth González Velásquez^a ■ Robin Zuluaga Gallego^b ■ Piedad Gañán Rojo^c

Resumen: la valorización de los residuos agroindustriales es una alternativa para mejorar su disposición y reducir su impacto ambiental. Dentro de las opciones más habituales se encuentran el aislamiento de componentes activos, proceso que suele requerir el uso de solventes orgánicos. La mecanoquímica se ha convertido en una opción novedosa para producir nuevos materiales. Dentro de sus ventajas se encuentra, justamente, el reducido consumo de solventes y la disminución de los tiempos de síntesis para llevar a cabo algunas reacciones químicas. En los últimos años se ha explorado su posible utilización en actividades que involucran el aprovechamiento de residuos. En este trabajo se busca, entonces, responder a la pregunta base: ¿en cuáles procesos de valorización o aprovechamiento de desechos agrícolas o agroindustriales, en especial los de tipo lignocelulósico, es útil emplear operaciones ligadas con la mecanoquímica? Al identificar estos elementos, es posible orientar operaciones o estrategias que permitan mejorar la eficiencia de algunos de ellos. Para realizar este trabajo se consideraron algunos elementos de las metodologías de revisión sistemática de bibliografía, convirtiéndolo en el primer documento de su tipo. La formulación de pregunta base, antes presentada, orientó de forma eficaz la búsqueda y la identificación de la información pertinente que fue analizada. De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidencia que la mecanoquímica, efectivamente, puede ser incluida en procesos de manejo de residuos agroindustriales, al incrementar la eficiencia de algunas operaciones, reducir el tiempo de proceso y el consumo de reactivos.

Palabras clave: mecanoquímica; residuos agrícolas; molienda; catálisis; celulosa; reacciones químicas

Recibido: 08/10/2021

Aceptado: 02/06/2022

Disponible en línea: 30/06/2023

* Artículo de revisión

a Ingeniera química. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín (Colombia).

Correo electrónico: yamileth.gonzalez@upb.edu.co ORCID: No cuenta con esta información

b Doctor en ingeniería, ingeniero agroindustrial. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín (Colombia).

Correo electrónico: robin.zuluaga@upb.edu.co ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7039-0038>

c Doctora en ingeniería de materiales, ingeniera química. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín

(Colombia). Correo electrónico: piedad.ganan@upb.edu.co ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2596-2591>

Cómo citar: Y. Goonzález, R. Zuluaga, P. Gañán, "Mecanoquímica para contribuir a la valorización de los residuos agroindustriales: revisión del tema Rev. Fac. Cienc. Básicas, vol. 17, n.º 2, pp. 125-144, jun., 2023, DOI: <https://doi.org/10.18359/rfcb.5999>

Mechano-chemistry to contribute to the valorization of agro industrial waste: a review of the topic

Abstract: The valuing of agro industrial waste is an alternative to improving its disposal and reducing its environmental impact. Among the most common options is the isolation of active components, a process that often requires the use of organic solvents. Mechano-chemistry has become a novel option for producing new materials. Among its advantages is precisely the reduced consumption of solvents and the reduction of synthesis times to carry out some chemical reactions. In recent years, its possible use in activities involving the use of waste has been explored. This work seeks, therefore, to answer the basic question: in which valorization or use processes of agricultural or agro industrial waste, especially lignocellulose waste, is it useful to use operations linked to mechano chemistry? By identifying these elements, it is possible to guide operations or develop strategies that improve the efficiency of some of them. To carry out this work, some elements of the systematic review methodologies of the literature were considered, making it the first document of its kind. The formulation of the basic question, presented above, effectively guided the search and identification of relevant information that was analyzed. According to the results obtained, it is evident that mechano-chemistry can indeed be included in agro industrial waste management processes by increasing the efficiency of some operations, reducing the processing time, and reducing the consumption of reagents.

Keywords: mechano-chemistry; agricultural waste; grinding; catalysis; cellulose; chemical reactions.

Mecanoquímica para contribuir para a valorização dos resíduos agroindustriais: revisão do tema

Resumo: A valorização dos resíduos agroindustriais é uma alternativa para melhorar sua disposição e reduzir seu impacto ambiental. Entre as opções mais comuns encontra-se o isolamento de componentes ativos, processo que costuma requerer o uso de solventes orgânicos. A mecanoquímica tornou-se uma opção inovadora para produzir novos materiais. Entre suas vantagens, encontram-se justamente o consumo reduzido de solventes e a diminuição dos tempos de síntese para realizar algumas reações químicas. Nos últimos anos, sua possível utilização em atividades que envolvam o aproveitamento de resíduos tem sido explorada. Neste trabalho, busca-se, então, responder à pergunta-chave: em quais processos de valorização ou aproveitamento de resíduos agrícolas ou agroindustriais — especialmente os de tipo lignocelulósico — é útil empregar operações relacionadas com a mecanoquímica? Ao identificar esses elementos, é possível orientar operações ou estratégias que permitam melhorar a eficiência de alguns deles. Para realizar este trabalho, alguns elementos das metodologias de revisão sistemática de bibliografia foram considerados, o que o torna o primeiro documento desse tipo. A formulação da pergunta-chave apresentada anteriormente orientou de forma eficaz a busca e a identificação da informação pertinente que foi analisada. De acordo com os resultados obtidos, evidencia-se que a mecanoquímica, efetivamente, pode ser incluída em

processos de gestão de resíduos agroindustriais por aumentar a eficiência de algumas operações, reduzir o tempo de processo e o consumo de reativos.

Palavras-chave: mecanoquímica; resíduos agrícolas; moagem; catálise; celulose; reações químicas.

Introducción

El manejo de los residuos agroindustriales es un reto constante, pues su incorrecta disposición deteriora el medio ambiente y la salud humana, debido a posibles contaminaciones de las fuentes hídricas superficiales y subterráneas, bien sea por los vertimientos en zonas cercanas a ríos, canales y arroyos o por la descarga de lixiviados producto de su descomposición [1].

Desde hace varias décadas, diversas investigaciones se han venido enfocando en la utilización, la valorización y el aprovechamiento de los residuos agroindustriales lignocelulósicos, con el fin de reducir el impacto ambiental que ocasiona su disposición y por el potencial interés en algunas de las moléculas que pueden ser obtenidas o aisladas de ellos, tanto para el desarrollo de múltiples productos [2], como para la generación de energía [3-4].

Dentro de las alternativas analizadas para el aprovechamiento de este tipo de residuos, y solo para mencionar unas pocas, se encuentran las siguientes: la producción de composta [5], bioetanol [6], biodiésel [7], biogás [8], alimentos para animales [9], fabricación de materiales para la construcción [10] o la elaboración de sistemas para la remoción de contaminantes en aguas residuales [11].

Aunque todas ellas contribuyen con la mitigación de la problemática ambiental, también pueden tener algunas desventajas en este sentido. Por ejemplo, en el caso de la producción de composta se generan gases como el CO_2 (dióxido de carbono), el CH_4 (metano) o el N_2O (óxido nitroso), que tienen impactos adversos, bien sea por sus olores característicos, como por su participación en el efecto invernadero [12]. En cuanto a la producción de biocombustibles, que precisamente se orienta a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, es importante analizar el método a emplear, tanto para el tratamiento de la materia prima como para su producción, pues es posible que allí se puedan generar nuevas sustancias que alteren su impacto sobre el medio ambiente.

Para la producción de biocombustibles [13] o de sustancias bioactivas que pueden ser aisladas de los residuos lignocelulósicos, es necesario realizar

operaciones previas que requieren el uso de solventes orgánicos [14-16].

A lo anterior podemos sumar que algunos de los procesos requeridos para el aprovechamiento o valorización de los residuos agroindustriales pueden tener una eficiencia limitada, tardar largos periodos de tiempo y, en algunas ocasiones, requieren el uso de temperatura. Estos son aspectos que pueden significar incrementos en el consumo de energía o la potencial degradación de compuestos termolábiles que, antes de la extracción, eran potencialmente utilizables, pero que tras ser obtenidos perdieron dicha capacidad [17].

La mecanoquímica se viene considerando como una alternativa novedosa y sostenible para sintetizar o extraer sustancias, contribuir a mejorar el desempeño de algunos procesos de aprovechamiento de residuos, reducir el consumo de solventes orgánicos [18], disminuir los tiempos de síntesis o facilitar el desarrollo de reacciones que serían más complejas de llevar a cabo por otros medios [17].

El concepto de mecanoquímica fue definido en el año de 1997 por la IUPAC y tiene que ver con inducir el desarrollo de reacciones químicas por la absorción de energía mecánica [19]. Las reacciones mecanoquímicas son reconocidas por iniciar con la rotura de enlaces primarios; sin embargo, el paso inicial, en la mayoría de ellas, es la emisión de electrones de baja energía. La absorción de estos electrones crea especies negativas que dan cabida a nuevos cambios químicos [20]. Los equipos más empleados para realizar estos procesos corresponden a los molinos de bolas [21].

El uso de la mecanoquímica con el empleo de molinos de bolas está en crecimiento, en especial, como una etapa adicional de algunos procesos de valorización de residuos. En este trabajo se busca responder a la siguiente pregunta: ¿en cuáles procesos de valorización o aprovechamiento de desechos agrícolas o agroindustriales, en especial de tipo lignocelulósicos, es útil emplear operaciones ligadas con la mecanoquímica?

Para abordar su solución surgen preguntas de apoyo como estas: ¿en qué momento deben realizarse las acciones mecánicas?, ¿qué tipo de equipos se emplean?, ¿a qué escala se han realizado estos

procesos?, ¿qué mejoras aporta su uso? Para resolver estos cuestionamientos se realizó una revisión de literatura y para llevarla a cabo se optó por tomar algunos elementos de la declaración Prisma (*Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analysis*) [22]. Este tipo de estrategias permiten orientar la búsqueda hacia aspectos o intereses específicos. Estas técnicas han sido empleadas en estudios en el campo de la salud, pero empiezan a valorarse y emplearse más en las áreas de ingeniería, gracias a la efectividad y a la calidad de los resultados obtenidos [23].

Metodología

Fase de búsqueda y recolección de datos

Para la fase de identificación de las ecuaciones de búsqueda que permitieran ubicar la mayor

cantidad posible de artículos científicos relacionados con el tema, se tomaron de base las palabras clave expuestas en la Tabla 1.

La creación de las ecuaciones de búsqueda se realizó al combinar inicialmente las palabras clave de cada fila y luego se procedió a mezclar las ubicadas en la columna uno con todas las demás que aparecen en el resto de columnas. Esta forma de realizar el proceso permitió ubicar la mayor cantidad posible de documentos.

La búsqueda se realizó identificando estas palabras clave, bien fuera en el título, el resumen o el *abstract*. *Scopus* fue la base de datos con la que se realizaron las pruebas preliminares de verificación de la pertinencia de las palabras seleccionadas para este trabajo. Se identificaron artículos publicados entre enero de 2005 y diciembre de 2020. Posteriormente, considerando que algunos textos podrían no ser incluidos en esta base de datos, también se empleó *Google Scholar*.

Tabla 1. Palabras clave empleadas para la generación de ecuaciones de búsqueda

Palabras clave		
Elemento clave ligado a proceso	Elemento clave ligado a componentes de los residuos	Elemento clave ligado a residuos
<i>Mechanochemistry</i>	<i>Agroindustrial</i>	<i>Residue</i>
<i>Ball milling</i>	<i>Organic material</i>	<i>Waste</i>
<i>Mechanocatalysis</i>	<i>Cellulose</i>	
<i>Mechanical treatment</i>	<i>Lignin</i>	
	<i>Hemicellulose</i>	
	<i>Pectin</i>	

Fuente: elaboración propia.

Fase de selección de artículos

La relación de los artículos hallados se encuentra en la Tabla 2, donde se indica que el total corresponde a 3543. Tras su identificación, a continuación, fueron sometidos a un proceso inicial de selección con la aplicación de criterios de inclusión: 1) todos los documentos deberían corresponder a artículos científicos publicados hasta el 31 de diciembre de 2020, y 2) que estuvieran publicados en revistas, que de acuerdo con la clasificación *Scimago Journal*

Rank (SJR) del 2019, se ubicaran en las categorías Q1 o Q2. Tal como se indica en la Tabla 2, el total de documentos potencialmente relevantes, tras aplicar estos filtros, corresponden a 151. Cada uno de ellos fue analizado con detenimiento, tanto en su título como en su resumen para identificar que el contenido estuviera relacionado con el uso de la mecanoquímica en el aprovechamiento de residuos agroindustriales lignocelulósicos. De este nuevo cribado de la información se obtuvieron 58 textos.

Los textos seleccionados fueron analizados una vez. En esta oportunidad se buscó que permitieran responder a las preguntas planteadas antes. Esta nueva selección arrojó 35 resultados. En esta última fase se emplearon como criterios de exclusión, los siguientes: 1) los textos deberían tener menciones directas sobre las materias primas consideradas, y 2) que dichas menciones correspondieran a residuos lignocelulósicos. Los 35 artículos

finalmente seleccionados fueron caracterizados de acuerdo con el nombre del artículo, el nombre del autor, el país de origen del autor, el nombre de la revista, el cuartil según el SJR del 2019, el año de publicación del artículo, el tipo de residuo agroindustrial empleado, una breve descripción de la temática presentada en cada artículo y los elementos que permitieran dar respuesta a las preguntas planteadas.

Tabla 2. Búsqueda y selección de los textos analizados

Fuente de información	Resultados de la búsqueda	Resultados potencialmente relevantes	Seleccionados con la aplicación de filtros	Seleccionados para el análisis
<i>Scopus</i>	3365	129	44	28
<i>Google Scholar</i>	178	22	14	6
<i>Total de artículos</i>	3543	151	58	35

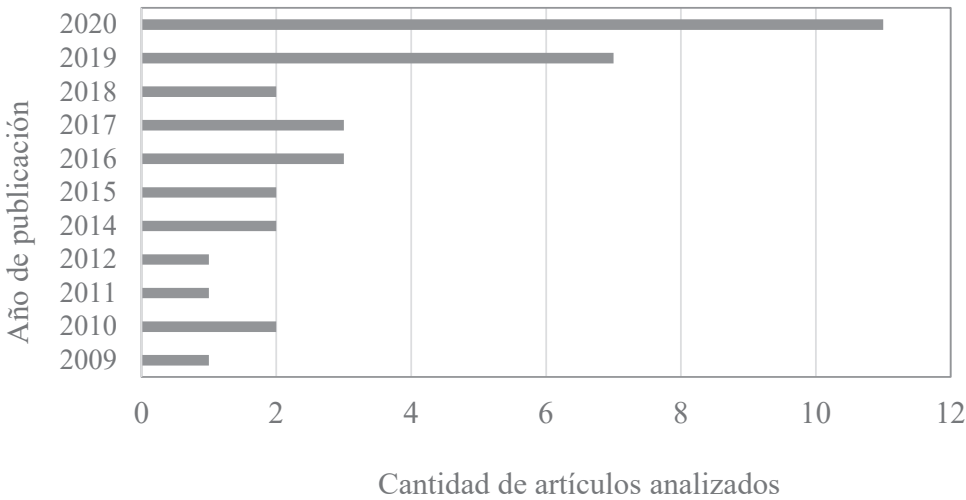
Fuente: elaboración propia.

Resultados y análisis

En la Figura 1 se presenta la relación de los 35 textos analizados en función de su año de publicación. Se aprecia que la mayor cantidad de artículos publicados en un mismo año corresponde al 2020, con un total de 11. Se destaca también que,

pese a que la ventana de observación se consideró desde el año 2005, los primeros artículos identificados tienen como fecha el año 2009. Ambos aspectos sugieren que la temática es actual y que se encuentra en crecimiento, y que es pertinente para el campo de la valorización de los residuos agroindustriales.

Figura 1. Relación del número de publicaciones sobre el tema, por año.



Fuente: elaboración propia.

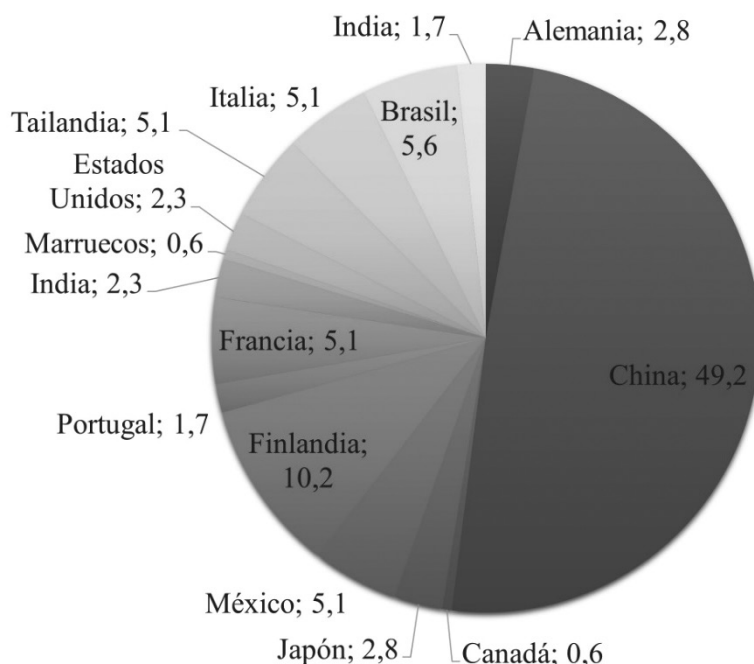
El 80 % de las publicaciones identificadas se encuentran en la categoría Q1, según la clasificación SJR del 2019. De acuerdo con la información indicada en la Figura 2, se aprecia que la temática ha sido considerada por autores de múltiples regiones del mundo, destacándose la participación de investigadores chinos. En el caso de Iberoamérica, los autores proceden de Brasil.

En la Tabla 3 se presentan los principales hallazgos en los 35 documentos analizados relacionados con el uso de la mecanoquímica en procesos de valorización de residuos agroindustriales. Con el fin dar respuesta a la pregunta base y a las complementarias planteadas, la información de la Tabla 3 se encuentra organizada de esta forma: tipo de residuo, proceso de valorización o aprovechamiento del residuo o desecho agroindustrial, objetivo del trabajo, momento en el que se realizan las acciones mecánicas, tipo de molienda utilizada, equipos

empleados, escala del ensayo y las mejoras que introduce su uso.

De acuerdo con lo observado, el tipo de residuo agroindustrial más identificado, con un total de ocho (8) trabajos, corresponde a los asociados con diferentes tipos de madera. Hay 14 artículos en los que se analizan desechos de cereales, que incluyen soja, cebada, maíz, arroz y trigo. Existen, a su vez, estudios que emplean otros menos conocidos o que han experimentado un previo tratamiento, como es el caso de residuos de arroz digeridos por rumiantes [24] o los obtenidos tras la extracción de otras sustancias, como los provenientes de la obtención previa de glicirricina de las raíces de regaliz [25]. Estos trabajos indican que, efectivamente, la mecanoquímica puede ser una alternativa de interés para avanzar aún más en la estrategia de aprovechamiento de los residuos de un proceso agroindustrial.

Figura 2. Países de procedencia de los autores de los textos seleccionados



Fuente: elaboración propia.

Para dar respuesta a la pregunta base de esta investigación (¿en cuáles procesos de valorización o de aprovechamiento de desechos agrícolas o agroindustriales, en especial los de

tipo lignocelulósico, es útil emplear operaciones ligadas con la mecanoquímica?), en la Tabla 3 se compilan los identificados, que han sido agrupados por afinidad en once categorías. Ellas son

las siguientes: aislamiento de nanoestructuras de celulosa, biorrefinerías, degradación enzimática, elaboración de composites, hidrólisis de la celulosa, producción de bioaceites, producción de biocombustibles, producción de bioetanol, producción de moléculas, reducción de azúcares y remoción de contaminantes.

La categoría con más documentos, que corresponde al 29 % de los hallazgos, tiene que ver con la elaboración de composites. Le sigue la producción de biocombustibles con el 20 %. Los temas que tienen menores porcentajes corresponden a los relacionados con la hidrólisis de celulosa y la producción de bioetanol. Sin embargo, se destaca el hallazgo de documentos ligados con el uso de la mecanoquímica en biorrefinerías.

Respecto a la pregunta de apoyo ligada con el momento en que se incluyen las acciones mecánicas, en cerca del 71 % de los artículos analizados se aprecia su uso como una etapa previa a la realización de otras operaciones. Esta implementación ha resultado clave para procesos como la hidrólisis, los tratamiento enzimáticos o térmicos empleados en la producción de biocombustibles, bioaceites, o en la obtención de moléculas de bajo peso molecular.

Cuando la molienda ha sido realizada como última etapa, generalmente se busca reducir el tamaño de un material final que será empleado, bien sea para la remoción de contaminantes [34], la elaboración de composites de matriz polimérica [36] y el aislamiento de nanoestructuras de celulosa [35]. En este último caso se resalta que los artículos encontrados fueron publicados entre los años 2019-2020, lo que refleja su grado de novedad y actualidad para estos procesos.

Respecto al tipo de equipos empleados, de acuerdo con lo reportado en la Tabla 3, se destaca que en el 57 % de los trabajos se han empleado molinos de bolas convencionales. Mientras que en el 37 % de ellos se emplean molinos de bolas planetarios.

Sobre la forma de realizar los procesos de molienda, según lo registrado en la Tabla 3, cerca del 75 % de los trabajos analizados fueron realizados en seco. Este aspecto es importante, pues se encuentra en línea con una de las principales ventajas

que ofrece la mecanoquímica: la reducción en el uso de solventes.

En los casos que se realizan en húmedo, en la mayoría de ellos se emplean bases acuosas, lo cual permite disminuir el consumo de solventes orgánicos. En algunas ocasiones, pese a que la molienda se realice en seco, se lleva a cabo una impregnación previa, en la que se emplea, por ejemplo, una sustancia ácida [29]. Esta última estrategia, nuevamente, se traduce en la disminución del consumo de solventes.

También es interesante constatar que, pese a que en el 95 % de los estudios identificados, los equipos de molienda son de escala de laboratorio, se han realizado esfuerzos para evaluar el impacto de la mecanoquímica a nivel de planta piloto [31] e incluso se han encontrado estudios sobre propuestas de implementación para biorrefinerías [32-33].

En general, en todos los trabajos, el tiempo de molienda es una variable que es necesario controlar, pues afecta la efectividad del tratamiento mecánico. Por ejemplo, cuando es corto, de menos de 20 minutos, suele ser menos eficiente respecto a tiempos más prolongados. Sin embargo, es necesario evitar excederse, pues, por ejemplo, cuando la acción mecánica se extiende por varias horas, es posible que la muestra experimente algún tipo de degradación térmica indeseada que afecte o altere su estructura, morfología o propiedades [37].

Otro aspecto que ha sido identificado en estos trabajos y que debe ser considerado en la implementación de los procesos de la mecanoquímica, tiene que ver con los tiempos de pausa entre las acciones mecánicas. Estos son importantes, en especial cuando se busca promover la realización de reacciones químicas, pues si son muy prolongados, ocasionan el enfriamiento de la mezcla. Esta alteración de la temperatura de la reacción puede contribuir con la reducción de la eficiencia, afectando el grado de conversión, que incluso podría ser inferior al esperado [37].

Un aspecto adicional que ha sido identificado en este estudio y que debe ser considerado al momento de introducir las acciones mecánicas, con el empleo de molinos de bolas, en un proceso específico, tiene que ver con la velocidad de rotación del molino. Este factor afecta el rendimiento de

los procesos, al condicionar o al alterar no solo el tamaño del material, sino su estructura cristalina. Un ejemplo ello se ha sido observado por Lempiäinen *et al.* [33] al apreciar que, al incrementar esta variable, lograban un menor tamaño de partícula y un mejor rendimiento en la conversión de los azúcares reductores.

Sin embargo, si este valor se eleva sustancialmente, el aumento en el área superficial de las muestras puede motivar la formación de aglomerados que dificultan las operaciones posteriores y reducen la eficiencia o la utilidad de incorporar las acciones mecánicas. Por esto es necesario realizar estudios para encontrar los valores óptimos que permitan optimizar aspectos como el tamaño de partícula o la estructura cristalina. La realización de este tipo de indagaciones previas también puede ser de utilidad para contribuir en la reducción del tiempo que tardan los procesos de valorización y para optimizar el consumo energético que supone la implementación de las acciones mecánicas.

A modo de apoyo en esta línea, se puede destacar que en más del 60 % de los trabajos analizados en la presente revisión se sugiere que la velocidad de rotación óptima para los molinos de bolas se encuentra alrededor de 500 rpm [36, 38]. Este valor puede servir de punto de referencia al momento de iniciar acciones de molienda en otros procesos de aprovechamiento de residuos lignocelulósicos.

Como se ha indicado en otros apartados de este texto, algunos procesos como la obtención de biocombustibles se pueden ver beneficiados por la implementación de un pretratamiento a base de

molienda. Estas acciones han sido valiosas para aumentar la eficiencia de la hidrólisis de la biomasa, maximizando la producción de azúcares y el rendimiento de los procesos de fermentación [39]. Esta acción permite alterar el área de superficie accesible, la cristalinidad de la celulosa, el contenido y distribución de la lignina y modifica la estructura de la hemicelulosa, beneficiando el proceso [40].

Pese a las grandes ventajas que presenta el uso de acciones mecánicas y que se resaltan en todos los artículos analizados, existe un aspecto que debe ser considerado y que corresponde a la rentabilidad del proceso con respecto al requerimiento energético de los diferentes molinos empleados. Para analizar este requerimiento se debe considerar el tipo de biomasa y la relación del tamaño de partícula antes y después de la molienda [40]. El tamaño de partícula antes del proceso de molienda influye de manera considerable en el gasto energético, debido a que guarda relación con el tiempo que se requiere para reducir la materia prima hasta el tamaño de partícula que se necesita. Pasar de partículas muy grandes a muy pequeñas requiere suficiente energía. Es pertinente considerar cortar, triturar o moler las materias primas antes de usar los molinos de bolas. Se sugiere, entonces, que los pretratamientos mecánicos inicien con una preparación de la materia prima que incluye lavado, corte o molienda superficial y un tamizado que permita facilitar el trabajo a la hora de efectuar el tratamiento mecánico con el molino de bolas, de modo que este pueda realizar, de forma más efectiva, su labor y optimizar de esta forma su consumo energético.

Tabla 3. Información de los artículos analizados

Artículo analizado	Tipo de residuo	Proceso de valorización o aprovechamiento del residuo o desecho agroindustrial	Objetivo del trabajo	Momento en que se realizan las acciones mecánicas	Molienda	Equipos empleados	Escala del ensayo	Mejoras que aporta la molienda
Flores-Velázquez et al. 2020 [50]	Residuos de plantas de banano	Aislamiento de nanoestructuras de celulosa	Se analiza el efecto de la molienda sobre las propiedades de muestras de celulosa aisladas mediante procesos químicos de los residuos de plantas de banano	Se realiza sobre las muestras de celulosa aisladas de los residuos	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Afecta propiedades de la celulosa como su solubilidad en solventes orgánicos y producción de 5-HMF (hidroximetilfurfural)
Nagarajan et al. 2019 [35]	Residuos de coco	Aislamiento de nanoestructuras de celulosa	Para apoyar los procesos químicos que son necesarios de implementar para aislar nanofibras de celulosa	Tras los tratamientos químicos se realiza el proceso de molienda	Molienda en seco y molienda en húmedo empleando agua	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Contribuye al aislamiento de nanofibras de celulosa
Souza et al. 2020 [52]	Residuos de soja	Aislamiento de nanoestructuras de celulosa	Aislamiento y modificación de nanofibras de celulosa	Se realiza tras el aislamiento de nanocelulosa	Molienda en húmedo con etanol o surfactantes	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Molienda es útil para avanzar con la modificación de las nanofibras de celulosa
Kaufman Rechulsk et al. 2015 [32]	Residuos de madera	Biorrefinería	Análisis fenomenológico del escalado de la depolimerización mecanocatalítica de biomasa lignocelulósica	Se realiza previo a otros procesos químicos	Molienda en húmedo con ácidos	Molino de bolas	Escala piloto	Formación de moléculas más pequeñas beneficiada por la molienda
Lempiäinen et al. 2020 [33]	Residuos de madera	Biorrefinería	Busca la conversión de la materia lignocelulósica en azúcares	Se realiza previo a otros procesos químicos	Molienda en húmedo con ácidos	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Reducción del tamaño de la muestra beneficia los demás procesos
da Silva et al. 2010 [30]	Residuos de caña de azúcar	Degradación enzimática	Mejoramiento de la efectividad en el proceso de hidrólisis enzimática	Se realiza previo a la hidrólisis enzimática	Molienda en seco	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Reduce la cristalinidad de la celulosa facilitando el proceso de hidrólisis enzimática

Artículo analizado	Tipo de residuo	Proceso de valorización o aprovechamiento del residuo o desecho agroindustrial	Objetivo del trabajo	Momento en que se realizan las acciones mecánicas	Molienda	Equipos empleados	Escala del ensayo	Mejoras que aporta la molienda
Silva et al. 2012 [31]	Residuos de trigo	Degradación enzimática	Analizan el efecto de diferentes procesos de molienda. Uso de molinos de bolas beneficia los procesos de sacarización para producir bioetanol	Se realiza previo a la hidrólisis enzimática	Molienda en seco	Molino de bolas	Planta piloto	Contribuye a los procesos de sacarización porque permite reducir el tamaño de partícula y altera la cristalinidad de la celulosa
Ahmad et al. 2019 [47]	Residuos de madera	Elaboración de composites	Desarrollo de composites a base de sustancias orgánicas y minerales	Previo al proceso térmico	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Permite incrementar la fracción amorfa de sílice en las muestras
Baheti et al. 2014 [49]	Residuos de fibras de yute	Elaboración de composites	Desarrollo de composites a base de nanoestructuras de celulosa y matriz de PLA (poliácido láctico)	Realizado previo a la elaboración del composite	Molienda en húmedo con agua como solvente	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Beneficia la reducción de tamaño de las muestras de yute
Chen et al. 2019 [48]	Residuos de madera	Elaboración de composites	Procesos de molienda en seco y en húmedo para mejorar desempeño de composites sin adición de matriz	Realizado previo a las muestras de madera y luego empleado en presencia de los agentes requeridos para las reacciones químicas	Previo en seco y posterior molienda en húmedo con catalizador-res	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Contribuye tanto a la reducción de tamaño como a la modificación química que se realiza en este trabajo
da Silva et al. 2020 [30]	Residuos de madera	Elaboración de composites	Aislamiento de nanofibras de celulosa y elaboración de biocomposites con el empleo como matriz del copolímero PBAT (Poli(butilén adipato-co-tereftalato))	Se realiza previo a los procesos químicos requeridos para aislar las nanofibras de celulosa	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Contribuye al aislamiento de nanofibras de celulosa y a su modificación química
Kumagai y Sasaki 2009 [46]	Residuos de arroz	Elaboración de composites	Desarrollo de composites a base de sílice/carbón sin presencia de matriz adicional	Previo al tratamiento térmico que permite la formación final del composite	Molienda en seco	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Mejora las condiciones de moldeo y la procesabilidad del material

Artículo analizado	Tipo de residuo	Proceso de valorización o aprovechamiento del residuo o desecho agroindustrial	Objetivo del trabajo	Momento en que se realizan las acciones mecánicas	Molienda	Equipos empleados	Escala del ensayo	Mejoras que aporta la molienda
Santulli et al. 2020 [25]	Residuos de extracción de glicirricina de las raíces de regaliz	Elaboración de composites	Desarrollo de materiales compuestos a base de resinas termorrígidas	Molienda previa a la adición al polímero termorrígido	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Permite reducir el tamaño de las muestras de fibras que serán empleadas para elaborar el composite
Santulli et al. 2020 [25]	Residuos de extracción de glicirricina de las raíces de regaliz	Elaboración de composites	Desarrollo de materiales compuestos a base de resinas termorrígidas	Molienda previa a la adición al polímero termorrígido	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Permite reducir el tamaño de las muestras de fibras que serán empleadas para elaborar el composite
Viscusi et al. 2020 [27]	Fibras de cáñamo	Elaboración de composites	Fibras de cáñamo funcionalizadas mediante tratamiento alcalino asistido por acciones mecánicas	Combinación de tratamiento mecánico y químico	Molienda en húmedo con NaOH	Molino de bolas	Escala de laboratorio	El índice de cristalinidad de las fibras aumenta debido a la remoción de los componentes no cristalinos de las fibras
Xue et al. 2019 [36]	Residuos de arroz	Elaboración de composites	Biochars como carga para cauchos naturales	Muestras limpias y secas sometidas a los procesos de molienda	Molienda con agua y etanol	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Variaciones en las características superficiales y tamaños de poro de algunas muestras que permiten mejorar el desempeño del composite
Zhang et al. 2014 [24]	Residuos de vinaza de yuca	Elaboración de composites	Desarrollo de composites a base de residuos sin adición de matriz	Realizado previo a la elaboración del composite	Molienda en seco con cataliza-dores	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Modificación química exitosa. Se evidencia alteraciones en las estructuras cristalinas. Ambos cambios afectan el desempeño del composite
Su et al. 2018 [43]	Estiércol de vaca	Hidrólisis de celulosa	Hidrólisis de la celulosa en agua	Previo a los ensayos de hidrólisis catalítica	Molienda en seco	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Mejora la dispersión y homogeneidad de las muestras que se traduce en incrementos en la generación de glucosa

Artículo analizado	Tipo de residuo	Proceso de valorización o aprovechamiento del residuo o desecho agroindustrial	Objetivo del trabajo	Momento en que se realizan las acciones mecánicas	Molienda	Equipos empleados	Escala del ensayo	Mejoras que aporta la molienda
Yang et al. 2020 [53]	Residuos de madera	Producción de bioaceites	Procesos de conversión de bioaceites	Se realiza antes de la alcoholólisis	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Permite mejorar los procesos de alcoholólisis
Buaban et al. 2010 [39]	Residuos de caña de azúcar	Producción de biocombustibles	Procesos de hidrólisis enzimática y fermentación	Previo a los procesos de hidrólisis enzimática	Molienda en seco	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Mejora la eficiencia de la hidrólisis enzimática
Gong et al. 2016 [44]	Residuos de madera	Producción de biocombustibles	Producción de biocombustibles alternativos al carbón empleando torrefacción	Previo a la torrefacción	Molienda en seco	Molino de bolas ultrafino vibratorio	Escala de laboratorio	Genera reducción en la cristalinidad de la celulosa y reduce la estabilidad térmica de componentes no celulósicos permitiendo que se degraden a menores temperaturas.
Huang et al. 2019 [54]	Residuos de caña de azúcar	Producción de biocombustibles	Se emplea para la generación de biocombustibles	Se realiza previa a la sacarificación	Molienda en húmedo con soluciones de NaOH	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Pretratamiento mecánico permite mejorar la eficiencia de la sacarificación enzimática al beneficiar la modificación de la lignina durante el proceso
Liao et al. 2011 [38]	Residuos de vinaza de yuca	Producción de biocombustibles	Producción de bioetanol	Reducción de tamaño previo al uso de otros equipos de reducción de tamaño	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Permite la presencia mayor cantidad de zonas amorfas que benefician la activación química
Licari et al. 2016 [40]	Residuos de caña de azúcar	Producción de biocombustibles	Generación de biocombustibles	Aplicado previo a la hidrólisis enzimática	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Permite una mayor accesibilidad de las enzimas para los procesos de generación de moléculas de menor peso molecular
Shi et al. 2015 [45]	Residuos de maíz	Producción de biocombustibles	Obtención de biocombustibles	Molienda tras los procesos de ozonólisis y antes de la hidrólisis enzimática	Molienda en seco	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Beneficia la hidrólisis enzimática y la sacarización vía deslignificación y reducción de la cristalinidad de la celulosa

Artículo analizado	Tipo de residuo	Proceso de valorización o aprovechamiento del residuo o desecho agroindustrial	Objetivo del trabajo	Momento en que se realizan las acciones mecánicas	Molienda	Equipos empleados	Escala del ensayo	Mejoras que aporta la molienda
Zhang et al. 2018 [13]	Residuos de arroz digeridos por rumiantes	Producción de biocombustibles	Empleado dentro de una estrategia de producción de bioetanol	Se realiza previo a la hidrólisis enzimática	Molienda en seco	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Afecta el área superficial de las muestras y el grado de cristalinidad beneficiando la conversión de celulosa en glucosa
Liu et al. 2020 [28]	Residuos de maíz	Producción de bioetanol	Se estudia la producción de glucosa e hidrolizados de glucosa que pueden ser empleados en la elaboración de etanol	Se realiza previamente a la hidrólisis	Molienda en seco con y sin catalizadores	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Mezclado del material con los catalizadores mejora la eficiencia del proceso de hidrólisis y de la conversión de la celulosa en glucosa. Ventaja: Mezclado previo sin emplear solventes
Lappalainen and Dong 2019 [29]	Residuos de madera	Producción de moléculas	Proceso de formación de azúcares a partir del material lignocelulósico	Se realiza previo a los procesos químicos	Molienda en seco de material preimpregnado con ácido	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Mejoras en los procesos de formación de azúcares debido a la depolimerización
Sousa Ribeiro et al. 2017 [26]	Residuos de algodón y papel	Producción de moléculas	Producción de sorbitol que podrían ser empleados en alimentos, productos cosméticos y farmacéuticos, en papel y tabaco y como precursores de plásticos	Se realiza para reducir el tamaño y la mezcla con el catalizador	Molienda en presencia de un catalizador a base de rutenio	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Contribuye a la producción de sorbitol
Schneider et al. 2017 [37]	Residuos de cebada	Reducción de azúcares	Conversión eficiente de lignocelulosa, especialmente de hemicelulosa, en azúcares reductores como xilosa y galactosa	Se realiza la molienda en presencia de un catalizador tipo sal a base de potasio	Molienda en seco	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Contribuye a mejorar la formación de azúcares

Artículo analizado	Tipo de residuo	Proceso de valorización o aprovechamiento del residuo o desecho agroindustrial	Objetivo del trabajo	Momento en que se realizan las acciones mecánicas	Molienda	Equipos empleados	Escala del ensayo	Mejoras que aporta la molienda
Ma et al. 2020 [34]	Residuos de plantas medicinales chinas	Remoción de contaminantes	Biochars para la remoción o inmovilización de antibióticos como el TC (tetraciclina) presentes en fuentes de agua o en aguas residuales	Previo a los ensayos de absorción	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Mejora la capacidad de absorción de TC por parte de las muestras debido a las variaciones en el tamaño de partícula y el área superficial
Shen y Zhang 2019 [42]	Residuos de arroz	Remoción de contaminantes	Biochars a base de carbono/sílice para adsorción de compuestos orgánicos y volátiles como el tolueno o el fenol	Biochars previos activados con KOH molidos antes del tratamiento térmico	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Molienda beneficia la presencia de estructuras porosas que son útiles para la absorción de contaminantes
Xiang et al. 2020 [41]	Residuos de trigo	Remoción de contaminantes	Biochars para absorber antibióticos como el TCH (clorhidrato de tetraciclina) en soluciones acuosas	Previo a los ensayos de absorción	Molienda en seco	Molino de bolas planetario	Escala de laboratorio	Mejora significativamente de las características superficiales de algunas muestras
Yang et al. 2020 [51]	Residuos de plantas de Lotus	Remoción de contaminantes	Uso del proceso mecánico para mejorar el comportamiento como absorbente de contaminantes, como tintes, formaldehído e iones de metales pesados	Se realiza para reducir el tamaño	Molienda en seco	Molino de bolas	Escala de laboratorio	Permite mejorar el desempeño de las muestras para absorber los contaminantes

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En este trabajo ha sido posible responder a la pregunta base postulada sobre el uso de la mecanoquímica: ¿en cuáles procesos de valorización o aprovechamiento de desechos agrícolas o agroindustriales, en especial de tipo lignocelulósicos, es útil emplear operaciones ligadas con la con la mecanoquímica? Para resolverla se han empleado elementos de la declaración Prisma, los cuales han demostrado ser valiosos para realizar la búsqueda y selección de la información que ha sido analizada. Los resultados obtenidos demuestran que este tipo de metodología puede ser empleada en trabajos ligados a la ingeniería y a las ciencias básicas, pues contribuye, de forma ágil y certera, con la identificación de textos relevantes sobre un tema específico.

Gracias al uso de esta estrategia metodológica fue posible identificar 35 trabajos. En ellos se identificó que la aplicación de la mecanoquímica es viable en once tipos de acciones que involucran la valorización de residuos agrícolas y agroindustriales, en mayor medida para la elaboración de composites. También se destaca que el tipo de equipo para realizar estas acciones corresponde a los molinos de bolas.

Gracias a las acciones mecánicas, las muestras experimentan diversos cambios, que pueden ser variaciones en su tamaño, alteraciones en su estructura cristalina o modificaciones superficiales; todos contribuyen positivamente con el mejoramiento y la calidad de las operaciones de valorización de los residuos.

En este estudio también ha sido posible constatar que la implementación de estas acciones mecánicas viene en aumento, gracias a su bajo nivel de complejidad, lo que permitirá contribuir en la eficiencia y la efectividad de procesos, y aportar con actividades que reduzcan el impacto ambiental de los residuos agrícolas y agroindustriales.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la red Nanocelia-Cyted.

Referencias

- [1]. N. L. Rivera, Propuesta de un programa para el manejo de los residuos sólidos en la plaza de mercado de Cereté, Córdoba. Tesis de maestría en gestión ambiental. Bogotá: Universidad Pontificia Javiera, 2009.
- [2]. C. Gómez Hoyos, P. Mazo Márquez, L. Penagos Vélez, A. Serpa Guerra, A. Eceiza, L. Urbina, J. Velásquez-Cock, P. Gañán Rojo, L. Vélez Acosta y R. Zuluaga, “Cocoa shell: an industrial by-product for the preparation of suspensions of holocellulose nanofibers and fat”. *Cellulose*. vol. 27, no. 18, pp. 10873-10884, 2020. [Internet]. doi:10.1007/s10570-020-03222-6
- [3]. S. Saval. “Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro”, *BioTecnología*. vol. 16, no. 2, pp. 14-46, 2012. [Internet]. Disponible en: https://smbb.mx/wp-content/uploads/2017/10/Revista_2012_V16_n2.pdf
- [4]. M. E. Durán-García. “Gasificación del aserrín de pino (*Pinus arizonica*) en un reactor de lecho fluidizado: análisis de las variables del proceso”, *Maderas-Cienc Tecnol*. vol. 18, no. 4, pp. 633-650, 2016. [Internet]. Disponible en: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/2561>
- [5]. Y. Wang, L. Liu, J. Yang, Y. Duan, Y. Luo, M. Y. Taherzadeh, Y. Li, H. Li, M. K. Awasthi y Z. Zhao, “The diversity of microbial community and function varied in response to different agricultural residues composting”. *Sci. Total Environ*. vol. 715, no. 1, pp. 1-11, 2020. [Internet]. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136983
- [6]. A. Gupta y J. P. Verma, “Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review”. *Renew. Sust. Energ. Rev*. vol. 41, no. 1, pp. 550-567, 2015. [Internet]. doi:10.1016/j.rser.2014.08.032
- [7]. G. Baskar y R. Aiswarya, “Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks”. *Renew. Sust. Energ. Rev*. vol. 57, no. 1, pp. 496-504, 2016. [Internet]. doi:10.1016/j.rser.2015.12.101
- [8]. M. Samer, S. Abdelaziz, M. Refai y E. Abdelsalam, “Techno-economic assessment of dry fermentation in household biogas units through co-digestion of manure and agricultural crop residues in Egypt”. *Renew. Energy*. vol. 149, pp. 226-234, 2020. [Internet]. doi:10.1016/j.renene.2019.12.058
- [9]. E. B. N. Graminha, A. Z. L. Gonçalves, R. D. P. B. Pirotta, M. A. A. Balsalobre, R. Da Silva y E. Gomes, “Enzyme production by solid-state fermentation: Application to animal nutrition”. *Anim. Feed Sci*.

- Technol.* vol. 144, no. 1-2, pp. 1-22, 2008. [Internet]. doi:10.1016/j.anifeeds.2007.09.029
- [10]. A. Sales y S. A. Lima, "Use of brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement". *Waste Management*. vol. 30, no. 6, pp. 114-22, 2010. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20163947/>
- [11]. Y. A. Vargas Corredor y L. I. Pérez Pérez, "Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente". *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. vol. 14, no. 1, pp. 59-72, 2018. [Internet]. doi:10.18359/rfcb.3108
- [12]. M. A. Sánchez-Monedero, N. Serramiá, C. García-Ortiz Civantos, A. Fernández-Hernández y A. Roig, "Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products". *Chemosphere*. vol. 81, no. 1, pp. 18-25, 2010. [Internet]. doi:10.1016/j.chemosphere.2010.07.022
- [13]. H. Zhang, P. Zhang, J. Ye, Y. Wu, J. Liu, W. Fang, D. Xu, B. Wang, L. Yan y G. Zeng, "Comparison of various pretreatments for ethanol production enhancement from solid residue after rumen fluid digestion of rice straw". *Bioresour. Technol.* vol. 247, pp. 147-156, 2018. [Internet]. doi:10.1016/j.biortech.2017.09.065
- [14]. J. Azmir, I. S. M. Zaidul, M. M. Rahman, K. M. Sharif, A. Mohamed, F. Sahena, M. H. A. Jahurul, K. Ghaffoor, N. A. N. Norulaini y N. A. N. Omar, "Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review". *J. Food Eng.* vol. 117, no. 4, pp. 426-436, 2013. [Internet]. doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014
- [15]. M. N. Safdar, T. Kausar, S. Jabbar, A. Mumtaz, K. Ahad y A. A. Saddozai, "Extraction and quantification of polyphenols from kinnow (*Citrus reticulata* L.) peel using ultrasound and maceration techniques". *J. Food Drug Anal.* vol. 25, no. 3, pp. 488-500, 2017. [Internet]. doi:10.1016/j.jfda.2016.07.010
- [16]. M. Vinatoru, "An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs". *Ultrason Sonochem.* vol. 8, no. 3, pp. 303-313, 2001. [Internet]. doi:10.1016/S1350-4177(01)00071-2
- [17]. K. Wu, T. Ju, Y. Deng y J. Xi, "Mechanochemical assisted extraction: A novel, efficient, eco-friendly technology". *Trends Food Sci. Technol.* vol. 66, pp. 166-175, 2017. [Internet]. doi:10.1016/j.tifs.2017.06.011
- [18]. M. Baláz, "Ball milling of eggshell waste as a green and sustainable approach: A review". *Adv. Colloid Interface Sci.* vol. 256, pp. 256-275, 2018. [Internet]. doi:10.1016/j.cis.2018.04.001
- [19]. A. A. Paneque-Quevedo, "Mecanoquímica: Una visión general más allá de la química inorgánica". *Revista Cubana de Química*. vol. 31, pp. 71-86, 2019. Disponible: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000400071&lng=es&tlng=es
- [20]. L. Takacs, "What is unique about mechanochemical reactions?". *Acta Phys. Pol. A*. vol. 126, no. 4, pp. 1040-1043, 2014. Disponible en: <http://przrbybwn.icm.edu.pl/APP/PDF/126/a126z4p40.pdf>
- [21]. E. Colacino, M. Carta, G. Pia, A. Porcheddu, P. C. Ricci y F. Delogu, "Processing and investigation methods in mechanochemical kinetics. ACS Omega". vol. 3, no. 8, pp. 9196-9209, 2018. [Internet]. doi:10.1021/acsomega.8b01431
- [22]. J. Reed, M. Phillips, A. S. Van Epps y D. Zwicky, "An early look at a scoping review of systematic review methodologies in engineering". *Proc. - Front. Educ. Conf. (FIE)*. pp 1-4, 2020. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9274232>
- [23]. M. Peter, C. M. Godfrey, H. B. Khalil, P. McInerney, D. Parker y C. B. R. N. Soares. "Guidance for conducting systematic scoping reviews". *Int. J. Evid. Based Healthc.* vol. 13, no. 3, pp. 141-146, 2015. Disponible en: https://journals.lww.com/ijebh/Fulltext/2015/09000/Guidance_for_conducting_systematic_scoping_reviews.5.aspx
- [24]. Y. Zhang, T. Gan, Y. Luo, X. Zhao, H. Hu, Z. Huang, A. Huang y X. Qin, "A green and efficient method for preparing acetylated cassava stillage residue and the production of all-plant fibre composites". *Compos. Sci. Technol.* vol. 102, pp. 139-144, 2014. [Internet]. doi:10.1016/j.compscitech.2014.07.028
- [25]. C. Santulli, M. Rallini, D. Puglia, S. Gabrielli, L. Torre y E. Marcantoni, "Characterization of licorice root waste for prospective use as filler in more eco-friendly composite materials". *Processes*. vol. 8, no. 6, pp. 1-12, 2020. [Internet]. doi:10.3390/pr8060733
- [26]. L. Sousa Ribeiro, J. J. de Melo Órfão y M. F. Ribeiro Pereira. "Direct catalytic production of sorbitol from waste cellulosic materials". *Bioresour. Technol.* vol. 232, pp. 152-158, 2017. [Internet]. doi:10.1016/j.biortech.2017.02.008
- [27]. G. Viscusi, G. Barra y G. Gorrasi, "Modification of hemp fibers through alkaline attack assisted by mechanical milling: effect of processing time on the morphology of the system". *Cellulose*. vol. 27, pp. 8653-8665, 2020. [Internet]. doi:10.1007/s10570-020-03406-0
- [28]. X. Liu, H. Liu, P. Yan, L. Mao, Z. Xu y Z. C. Zhang, "Mechanocatalytic synergy for expedited cellulosic

- ethanol production compatible with integrated bio-refinery". *ACS Sustain. Chem. Eng.* vol. 8, no. 6, pp. 2399-2408, 2020. [Internet]. doi:10.1021/acssuschemeng.9b06018
- [29]. K. Lappalainen y Y. Dong, "Simultaneous production of furfural and levulinic acid from pine sawdust via acid-catalysed mechanical depolymerization and microwave irradiation". *Biomass Bioenerg.* vol. 123, pp. 159-165, 2019. [Internet]. doi:10.1016/j.biombioe.2019.02.017
- [30]. C. G. da Silva, F. S. Kano y D. S. Rosa, "Lignocellulosic nanofiber from Eucalyptus waste by a green process and their influence in bionanocomposites". *Waste Biomass.* vol. 11, pp. 3761-3774, 2019. [Internet]. doi:10.1007/s12649-019-00610-3
- [31]. G. G. D. Silva, M. Couturier, J-G. Berrin, A. Buléon y X. Rouau, "Effects of grinding processes on enzymatic degradation of wheat straw". *Bioresour. Technol.* vol. 103, no. 1, pp. 192-200, 2012. [Internet]. doi:10.1016/j.biortech.2011.09.073
- [32]. M. Kaufman Rechulski, M., U. Richter, F. Schüth y R. Rinaldi. "Mechanocatalytic depolymerization of lignocellulose performed on hectogram and kilogram scales". *Ind. Eng. Chem. Res.* vol. 54, no. 16, pp. 4581-4592, 2015. [Internet]. doi:10.1021/acs.iecr.5b00224
- [33]. H. Lempiäinen, K. Lappalainen, J. Haverinen, T. Tuuttila, T. Hu, M. Jaakkola y U. Lassi. "The Effect of mechanocatalytic pretreatment on the structure and depolymerization of willow. *Catalysts.* vol. 10, no. 255, pp. 1-17, 2020. [Internet]. doi:10.3390/catal10020255
- [34]. X. Ma, Y. Xin, Q. Yan, X. Pan, S. Xin, X. Huang, Q. Chen y G. Liu, "Adsorption characteristics of tetracycline onto biochars as affected by solution chemistry conditions and ball milling treatment". *Water Air Soil Pollut.* vol. 231, no. 387, pp. 1-15, 2020. [Internet]. doi:10.1007/s11270-020-04769-7
- [35]. K. J. Nagarajan, A. N. Balaji y N. R. Ramanujam, "Extraction of cellulose nanofibers from cocos nucifera var aurantiaca peduncle by ball milling combined with chemical treatment". *Carbohydr. Polym.* vol. 212, pp. 312-322, 2019. [Internet]. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.02.063
- [36]. B. Xue, X. Wang, J. Sui, D. Xu, Y. Zhu y X. Liu, "A facile ball milling method to produce sustainable pyrolytic rice husk bio-filler for reinforcement of rubber mechanical property". *Ind. Crops Prod.* vol. 141, pp. 111791, 2019. [Internet]. doi:10.1016/j.indcrop.2019.111791
- [37]. L. Schneider, J. Haverinen, M. Jaakkola y U. Lassi, "Effective saccharification of lignocellulosic barley straw by mechanocatalytic pretreatment using potassium pyrosulfate as a catalyst". *Bioresour. Technol.* vol. 234, pp. 1-7, 2017. [Internet]. doi:10.1016/j.biortech.2017.03.020
- [38]. Z. Liao, Z. Huang, H. Hu, Y. Zhang y Y. Tan, "Microscopic structure and properties changes of cassava stillage residue pretreated by mechanical activation". *Bioresour. Technol.* vol. 102, no. 17, pp. 7953-7958, 2011. [Internet]. doi: 10.1016/j.biortech.2011.05.067
- [39]. B. Buaban, H. Inoue, S. Yano, S. Tanapongpipat, V. Ruanglek, V. Champreda, R. Pichyangkura, S. Rengpipat y L. Eurwilaichitr, "Bioethanol production from ball milled bagasse using an on-site produced fungal enzyme cocktail and xylose-fermenting *Pichia stipites*". *J. Biosci. Bioeng.* vol. 110, no. 1, pp. 18-25, 2010. [Internet]. doi: 10.1016/j.jbiosc.2009.12.003
- [40]. A. Licari, F. Monlau, A. Solhy, P. Buche y A. Barakat, "Comparison of various milling modes combined to the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Glucose yield and energy efficiency". *Energy.* vol. 102, pp. 335-342, 2016. [Internet]. doi:10.1016/j.energy.2016.02.083
- [41]. W. Xiang, Y. Wan, X. Zhang, Z. Tan, T. Xia, Y. Zheng y B. Gao, "Adsorption of tetracycline hydrochloride onto ball-milled biochar: Governing factors and mechanisms". *Chemosphere.* vol. 255. [Internet]. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127057
- [42]. Y. Shen y N. Zhang, "Facile synthesis of porous carbons from silica-rich rice husk char for volatile organic compounds (vocs) sorption". *Bioresour. Technol.* vol. 282, pp. 294-300, 2019. [Internet]. doi:10.1016/j.biortech.2019.03.025
- [43]. J. Su, M. Qiu, F. Shen y X. Qi, "Efficient hydrolysis of cellulose to glucose in water by agricultural residue-derived solid acid catalyst". *Cellulose.* vol. 25, pp. 17-22, 2018. [Internet]. doi:10.1007/s10570-017-1603-4
- [44]. C. Gong, J. Huang, C. Feng, G. Wang, L. Tabil y D. Wang, "Effects and mechanism of ball milling on torrefaction of pine sawdust". *Bioresour. Technology,* vol. 214, pp. 242-247, 2016. [Internet]. doi:10.1016/j.biortech.2016.04.062
- [45]. F. Shi, H. Xiang y Y. Li. "Combined pretreatment using ozonolysis and ball milling to improve enzymatic saccharification of corn straw". *Bioresour. Technol.* vol. 179, pp. 444-451, 2015. [Internet]. doi:10.1016/j.biortech.2014.12.063
- [46]. S. Kumagai y J. Sasaki, "Carbon/silica composite fabricated from rice husk by means of binderless hot-pressing". *Bioresour. Technol.* vol. 100, no. 13, pp. 3308-3315, 2009. [Internet]. doi:10.1016/j.biortech.2009.02.001

- [47]. M. Ahmad, M. Ahmad, A. R. A. Usman, A. S. Al-Faraj, A. Abduljabbar, O. K. Y. Sik y M. I. Al-Wabe, "Date palm waste-derived biochar composites with silica and zeolite: synthesis, characterization and implication for carbon stability and recalcitrant potential". *Environ. Geochem. Health*. vol. 41, pp. 1687-1704, 2019. [Internet]. doi:10.1007/s10653-017-9947-0
- [48]. J. Chen, Y. Yu, J. Han, Y. Guo, Z. Yang, Q. Shang y C. Liu, "Mechanochemical esterification of waste mulberry wood by wet Ball-milling with tetrabutylammonium fluoride". *Bioresour. Technol.* vol. 285, 2019. [Internet]. doi:10.1016/j.biortech.2019.121354
- [49]. V. Baheti, R. Mishra, J. Militky y B. K. Behera, "Influence of noncellulosic contents on nano scale refinement of waste jute fibers for reinforcement in polylactic acid films". *Fibers Polym.* vol. 15, pp. 1500-1506, 2014. [Internet]. doi:10.1007/s12221-014-1500-5
- [50]. V. Flores-Velázquez, G. E. Córdova-Pérez, A. A. Silahua-Pavón, J. G. Torres-Torres, U. Sierra, S. Fernández, S. Godavarthi, F. Ortiz-Chi y C. G. Espinosa-González, "Cellulose obtained from banana plant waste for catalytic production of 5-HMF: Effect of grinding on the cellulose properties". *Fuel*. vol. 265, 2020. [Internet]. doi:10.1016/j.fuel.2019.116857
- [51]. H. Yang, K. Li, X. Liu, H. Yang, K. Li, X. Liu, Y. Wang, K. Liu, F. Chen, B. Deng y W. Xu, "Facile and effective preparation of the Lotus leaf-based adsorbent by exposing cellulose nanocrystal for wastewater treatment and air purification". *Fibers Polym.* vol. 21, pp. 350-358, 2020. [Internet]. doi:10.1007/s12221-020-9264-6
- [52]. A. G. Souza, D. F. Santos, R. R. Ferreira, V. Z. Pinto y D. S. Rosa, "Innovative process for obtaining modified nanocellulose from soybean straw". *Int. J. Biol. Macromol.* vol. 165 (Part B), pp. 1803-1812, 2020. [Internet]. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.10.036
- [53]. C. Yang, X. Yuan, X. Wang, K. Wu, Y. Liu, C. Liu, H. Lu y B. Liang, "Ball milling promoted direct liquefaction of lignocellulosic biomass in supercritical ethanol". *Front. Chem. Sci. Eng.* vol. 14, pp. 605-613, 2020. [Internet]. doi:10.1007/s11705-019-1841-0
- [54]. J. Huang, Y. Zhu, T. Liu, S. Sun, J. Ren, A. Wu y H. Li, "A novel wet-mechanochemical pretreatment for the efficient enzymatic saccharification of lignocelluloses: Small dosage dilute alkali assisted ball milling". *Energy Convers. Manag.* vol. 194, pp. 46-54, 2019. [Internet]. doi:10.1016/j.enconman.2019.04.078