

Productos nanotecnológicos innovadores como estrategia para agregar valor a la forestoindustria del NEA. Desafíos de los sectores público/privado

*Nanci EHMANN
Laura COVINICH
Nicolás CLAUSER
María VALLEJOS
María Cristina AREA*

Resumen

La creación de nanomateriales derivados de biomasa forestal abre nuevas perspectivas en cuanto a posibles productos y aplicaciones de la industria de celulosa y papel, por su mejora o por la creación de nuevos productos con funciones específicas. Para que esto se lleve a cabo existen numerosos escenarios implícitamente vinculados que participan de manera activa para asegurar la competitividad de los productos innovadores generados, desde su creación a escala laboratorio hasta su industrialización e incorporación al mercado. En este capítulo se pretende impartir al lector una breve descripción acerca de los nanomateriales producidos a partir de residuos forestoindustriales y los desafíos que actualmente enfrentan los sectores público y privado para llevar a cabo las innovaciones necesarias para su utilización dentro de productos existentes y/o la creación de nuevas líneas de trabajo dentro de la industria. Superadas esas barreras, esto permitirá incorporar nuevos eslabones a la cadena de valor forestoindustrial, mejorando la economía y sostenibilidad de la misma.

Palabras claves

aserrín de pino, biorrefinerías, grafeno, nanocelulosa, región NEA, vinculación tecnológica

Situación actual de los residuos forestoindustriales en el NEA

Argentina cuenta con un enorme potencial en el mercado de los productos forestales a nivel global, especialmente en celulosa y papel. Independientemente de la coyuntura económica, las principales ventajas competitivas del sector forestal son: la disponibilidad, los costos locales y la productividad de las plantaciones (AFRY Management Consulting, 2021). Sin embargo, la producción de celulosa no ha variado significativamente durante las últimas décadas. Mientras que la región (Brasil, Chile y Uruguay) pasó a ser la principal productora de celulosa de base forestal del mundo (Ministerio de Agricultura, G. y P., 2019).

El sector forestal en Argentina no ha generado inversiones nacionales e internacionales en los últimos tiempos. Tradicionalmente, ha sido un sector industrial conservador, con dificultad para adaptarse a la modificación en los mercados y características de la demanda (AFRY Management Consulting, 2021). Para superar estas limitaciones, necesita implementar innovaciones de productos, procesos, organización y modelos de desarrollo. Las **biorrefinerías** y la **nanotecnología** son dos áreas que podrían permitir una expansión del sector forestal nacional. Estas áreas se encuentran en desarrollo y cuentan con un gran potencial de innovación y de agregar valor (Ministerio de Agricultura, G. y P., 2019).

La región del NEA comprende la mayor concentración de actividad forestoindustrial en el país, alcanzando una participación relativa aproximada del 70%. Solamente en Misiones se concentra el 46,2% de la producción primaria de madera (aserraderos) y manufactura, y el mayor porcentaje de producción de celulosa (51,6%, incluyendo fábricas integradas) (Misirlian, 2019). La actividad forestal

genera una gran cantidad de subproductos provenientes de la poda, raleo y cosecha de las plantaciones forestales (fuentes de biomasa directa) y también de los establecimientos de industrialización de la madera (fuentes indirectas: costaneros, despuntes, aserrín, astillas, viruta y corteza) (Denaday *et al.*, 2020). La región del NEA es la región con mayor aporte de subproductos de industrias forestales del país (aproximadamente 5,5 millones de toneladas anuales) (Figura 1).

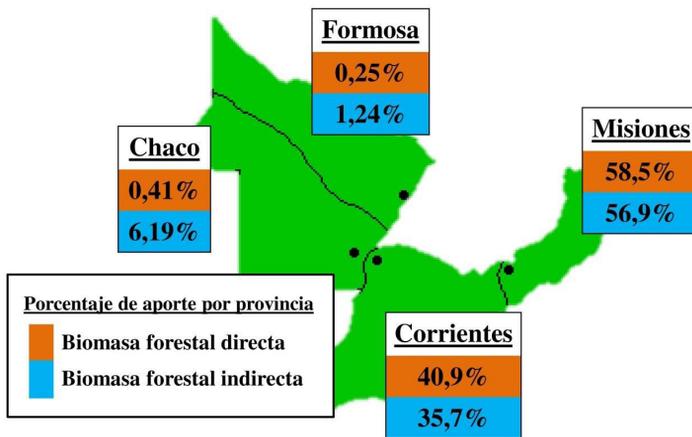


Figura 1. Porcentaje de aporte de los subproductos forestales de la región NEA.

Misiones es la provincia con mayor aporte de subproductos forestoindustriales dentro del NEA y a nivel país, con una generación de 1.186.060 toneladas anuales correspondiente a más del 50% del total. Corrientes es la segunda provincia en números, con un aporte de aproximadamente 743.178 toneladas anuales (Denaday *et al.*, 2020). Entre los subproductos más frecuentes se encuentran aserrines, costaneros, virutas y tacos de especies de pino y eucalipto (Misiones y Corrientes) (Sub. de Desarrollo Forestoindustrial y Sec. de Agricultura, G. y P, 2018a, Sub.

de Desarrollo Forestoindustrial y Sec. de Agricultura, G. y P, 2018b), o derivados de procesamiento de especies nativas como algarrobo, quebracho, lapacho, etc. (Chaco y Formosa) (Sub. de Desarrollo Forestoindustrial y Sec. de Agricultura, G. y P, 2018c, Sub. de Desarrollo Forestoindustrial y Sec. de Agricultura, G. y P, 2016).

Estos subproductos (antiguamente denominados residuos), son difíciles de recuperar y valorizar. Se utilizan actualmente por diversos sectores de industrialización como aserraderos, ingenios azucareros, industrias papeteras, entre otras, para la producción de tableros MDF, generación de bioenergía, aditivos en fábricas ladrillos cerámicos, entre otros. En los últimos años, su aprovechamiento ha ganado interés en la región debido al desarrollo de diversas plantas de generación energética a partir de biomasa (Denaday *et al.*, 2020). Aunque, en algunas ocasiones estos subproductos se acumulan, generando problemas logísticos, operacionales y ambientales. Estos sectores industriales se encuentran comercialmente establecidos y producen *commodities* (machimbres, tirantes, tablas, papeles, cartones, embalajes, azúcares, bebidas, entre otros tantos). A estos procesos consolidados podría sumarse la valorización de los subproductos mediante la creación de nuevas cadenas de valor a través de la obtención de productos químicos, combustibles, alimentos y fármacos, entre otros.

En este contexto, el uso de los subproductos de la industria forestal como materia prima de renovable y de bajo costo en una biorrefinería de multiproductos, que incluya la nanotecnología, podría ser una estrategia para innovar y mejorar la rentabilidad del cluster forestoindustrial regional.

La biorrefinería como estrategia de innovación en pequeñas y medianas empresas

Las investigaciones relacionadas con procesos de biorrefinerías se han incrementado considerablemente en la última década (Zondervan *et al.*, 2011). El esquema convencional de una biorrefinería consiste en la producción de biocombustibles en simultáneo con la generación de energía (vapor y/o electricidad) (Zhang, 2008). Si bien

esto sigue siendo viable y las metodologías y procesos se han optimizado considerablemente, en los últimos años surgieron nuevas estrategias, como la valorización de los subproductos forestoindustriales (Clauser *et al.*, 2021a).

Los subproductos forestoindustriales se componen químicamente por celulosa, hemicelulosas, lignina, extractivos y cenizas. Estos componentes varían dependiendo del tipo de materia prima en cuanto a su proporción y en algunos casos su estructura química. Algunos componentes se presentan en mayores cantidades como la celulosa, lignina y hemicelulosas, mientras que otros componentes orgánicos e inorgánicos se presentan en cantidades más pequeñas (extractivos y cenizas). En la Tabla 1, se observa la composición química de dos subproductos forestoindustriales típicos de la provincia de Misiones.

% sms*	Aserrín de pino (sin corteza) (Imlauer Vedoya <i>et al.</i> , 2022)	Aserrín de Eucalyptus (Vallejos <i>et al.</i> , 2016)
Celulosa	40,9	41,8
Lignina insoluble	29,2	32,3
Hemicelulosas	26,8	12,1
Extractivos	En agua: 0,73; En etanol: 1,54	En agua: 7,86
Cenizas	0,04	0,59

Tabla 1. Composición química de los residuos de aserraderos la provincia de Misiones. *sms: sobre material seco

En este contexto emerge el concepto de **biorrefinerías multiproductos**, en las cuales se busca valorizar cada uno de estos componentes químicos. Las distintas fracciones se pueden obtener a partir de numerosas combinaciones de operaciones y procesos con la finalidad de valorizar cada una de ellas (Figura 2) (Frankó, *et al.*, 2016; Giuliano, *et al.*, 2016; Moncada, *et al.*, 2016; Sadhukhan, *et al.*, 2016; Alonso, *et al.*, 2017; Farzad, *et al.*, 2017; Moncada, *et al.*, 2017; Schmidt, *et al.*, 2017).

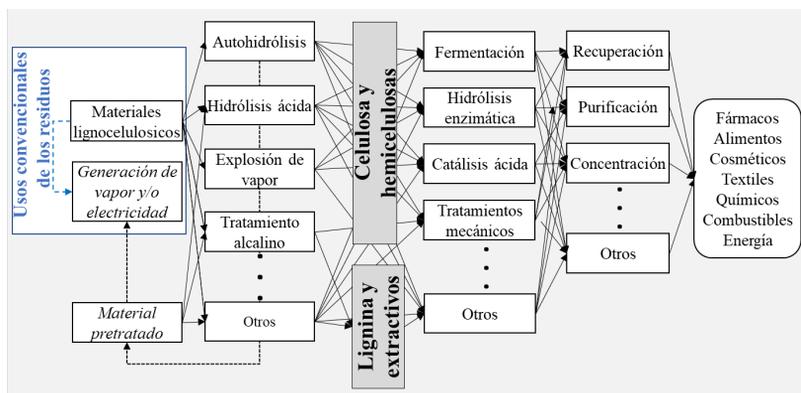


Figura 2. Esquema de valorización en una biorrefinería multiproductos. Adaptado de (Clauser, 2019).

Otro aspecto importante de los subproductos de la biomasa disponibles en la región (bagazo de caña de azúcar, aserrín de pino, aserrín de eucalipto, etc.) es el gran volumen disponible que puede valorizarse y la diversidad de productos que podrían obtenerse a partir de los diferentes componentes de biomasa (Tabla 2).

Fracción	Productos	~Precios (USD/Kg)	Referencia
Hemicelulosas	Hemicelulosas	0,5	(Moncada, <i>et al.</i> , 2018)
	Xilitol	4,5 – 20	(Albuquerque <i>et al.</i> , 2014)
	Furfural	1,0 - 1,7	(Win, 2005, E4tech, RECORD, WUR, 2015)
	Ácido levulínico	5 – 8	(Datta, 2017)
	Ácido fórmico	0,6 - 0,7	(Pérez-Fortes, <i>et al.</i> , 2016)
Celulosa	Celulosa	0,5	(Moncada, <i>et al.</i> , 2018)

Productos nanotecnológicos innovadores

	Etanol	0,6 - 0,8*	(Win, 2005, E4tech, RECORD, WUR, 2015)
	Ácido láctico	1,4 – 7	(Win, 2005, E4tech, RECORD, WUR, 2015)
	Sorbitol	0,65 – 1,8	(Win, 2005, E4tech, RECORD, WUR, 2015, Lichtenhaler, 2007)
	Nanocelulosa	5 – 200**	(Clauser <i>et al.</i> , 2021b)
Lignina	Lignina	0,8	(Moncada, <i>et al.</i> , 2018)
	Grafeno	200	(Big Think s.f.)
	Fibras de carbono	35	(Clauser <i>et al.</i> , 2021a)
	Vainillina	15	(Gulshan <i>et al.</i> , 2012)

Tabla 2. Productos de alto valor que pueden obtenerse en una plataforma de biorrefinería. * Valores promedio en Argentina. ** Valor estimado.

En la Figura 3 se presenta un esquema simplificado de la implementación de nuevas cadenas de valor a partir de los subproductos generados por las industrias. Diversos factores intervienen en la implementación de estos procesos en las cadenas de valor existentes de la región a escala comercial, como las materias primas, las operaciones, los productos y la escala, entre otros.

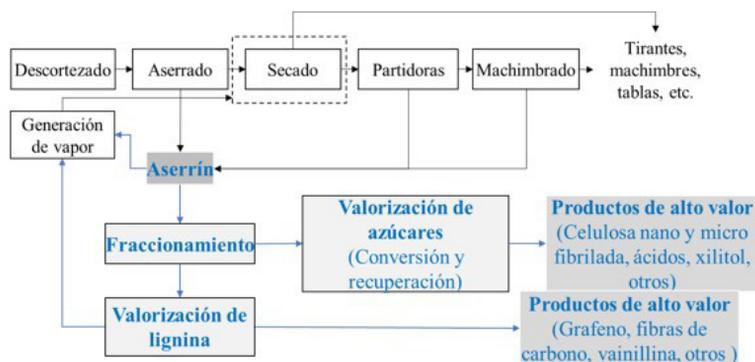


Figura 3. Esquema simplificado para la implementación de procesos de biorrefinerías en las cadenas de valor existentes en la región.

La implementación de procesos de biorrefinería a pequeña y mediana escala integrada a cadenas de valor establecidas actualmente emerge como una alternativa promisorio, debido a la posibilidad de valorizar los subproductos generados localmente a través de la producción de productos de alto valor y energía.

La nanotecnología en como alternativa para la obtención de nuevos materiales

Nanomateriales a partir de celulosa

La dimensión nanométrica de la biomasa ha recibido una atención considerable en los últimos años. La fabricación de nanomateriales es un campo interdisciplinario que abarca la física, la química, la biología, la ciencia de los materiales y la ingeniería. Además, la fabricación o extracción de estos materiales a nanoescala a partir de recursos sostenibles y renovables amplía los potenciales prometedores de la nanotecnología, debido a su carácter biodegradable y biocompatible. Si bien se han demostrado las numerosas aplicaciones de la nanocelulosa, su comercialización es incipiente.

La composición heterogénea de los subproductos forestoindustriales permite la fabricación de productos nanotecnológicos mediante esquemas incluidos en biorrefinerías multiproductos. Entre los productos en desarrollo

podemos mencionar aquellos que derivan de la lignina y la celulosa. Estos involucran nanoestructuras de carbono como fibras o partículas, nanotubos de carbono, nanofibras de celulosa (CNF) y celulosa microfibrilada (CMF).

La celulosa microfibrilada (CMF) es producida a partir de la pulpa de madera, que a su vez se produce de los subproductos forestoindustriales. La CMF consiste en una combinación de micro/nanofibrillas que se obtienen mediante una fuerte acción mecánica sobre la materia prima. De manera similar, pero con la inclusión de una etapa química, es posible alcanzar un material incluso a menor escala: las nanofibras de celulosa (CNF), las cuales alcanzan diámetros menores a 30 nanómetros (Vallejos y Area, 2019). La CMF y CNF presentan características únicas (Figura 4) y eso permite que tengan numerosos usos. Desde aplicaciones simples, como por ejemplo su utilización como aditivo en refuerzo de papeles (Vallejos *et al.*, 2016), hasta usos complejos como la liberación controlada de fármacos (Gopi *et al.*, 2018).

Actualmente, la CNF y CMF se han aplicado en las áreas ambiental y electrónica, en la industria alimentaria como aditivo emulsificante y estabilizante, en filmes y recubrimientos en contacto con alimentos (Prasad *et al.*, 2017), en construcción como aditivo de refuerzo en cementos y modificador de viscosidad, en pinturas como aditivo en la fabricación de resinas y pegamentos, en agricultura, higiene y cosmética como estabilizante (Borregaard, 2016), en medicina para ingeniería de tejidos, liberación controlada de fármacos y apósitos para curar heridas (Gopi *et al.*, 2018), en la fabricación de papeles y cartones como agente de refuerzo (Vallejos *et al.*, 2016), (Borregaard, 2016), entre otros.

En algunos casos se requerirá una modificación química para adaptar la CNF o CMF a la aplicación final, esto es muy frecuente en la fabricación de filmes nanocompuestos con bioplásticos y otros materiales (Figura 4).



Figura 4. Obtención, propiedades y aplicaciones de CNF y CMF.

Específicamente, hablando de las aplicaciones evaluadas con CNF/CMF obtenidas a partir de subproductos forestoindustriales del NEA, en el Programa de Celulosa y Papel del Instituto de Materiales de Misiones se ha estado trabajando en la incorporación de estos materiales como aditivos de refuerzo en la fabricación de papeles y cartones (Vallejos *et al.*, 2016, Ehman *et al.*, 2016); creación de estructuras médicas (Chinga- Carrasco *et al.*, 2018; Kangas *et al.*, 2019) y sensores (Syrový *et al.*, 2019) utilizando impresión 3D por inyección, y más recientemente, la producción de filmes para embalaje alimentario de un solo uso (Ehman *et al.*, 2022).

Sin embargo, a pesar de que se han logrado numerosas aplicaciones, el proceso de obtención aún presenta el desafío importante de su contenido de agua, inevitablemente elevado para mantener sus propiedades. Esto se traduce en un inconveniente durante la fase de secado de productos en algunas aplicaciones, como así también en un costo extra, si se busca transportar el producto a grandes distancias.

Nanomateriales a partir de lignina

En el caso de la lignina, su conversión química en nanomateriales representa un gran desafío, ya que su estruc-

tura puede cambiar, degradarse, presentar cambios estructurales, y sufrir cambios químicos como resultado de los tratamientos utilizados para individualizar los componentes de los residuos forestoindustriales (Cao *et al.*, 2019; Balakshina *et al.*, 2020). En la Figura 5 se muestran las variables que afectan las características finales de la lignina. Estas características finales son el punto de partida para el desarrollo de las estrategias de valorización.

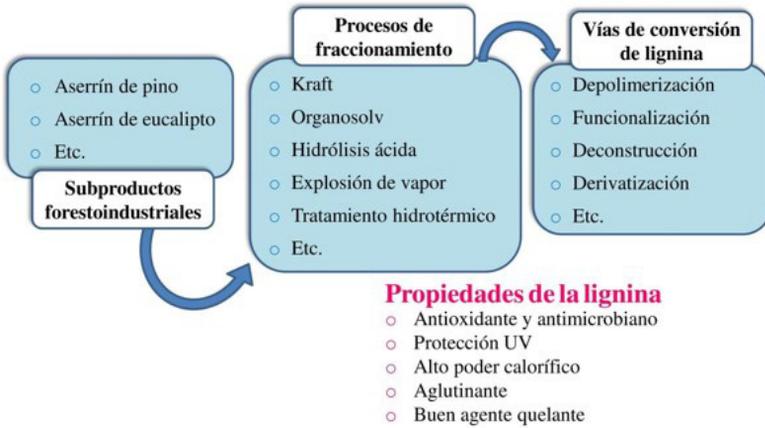


Figura 5. Principales variables en la ingeniería de la lignina. Adaptado de Balakshina *et al.* (2020) y Figueiredo *et al.* (2018).

Para el desarrollo de los productos a mediana y gran escala, los cuellos de botella en la ingeniería de la lignina son las técnicas de caracterización y cada uno de los procesos de conversión a los cuales se somete la lignina. Los enfoques actuales requieren mucho tiempo de procesamiento, consumos energéticos elevados, elevadas inversiones y grandes cantidades disponibles de lignina (Balakshina *et al.*, 2020). Tradicionalmente, la lignina se ha utilizado principalmente como combustible, debido a su poder calorífico, pero actualmente ha ganado interés su aplicación en el desarrollo de diversos productos de alto valor, entre ellos los materiales a nano-escala. La comercialización de los nanomateriales derivados de lignina es relativamente reciente, lo que permite una transición entre su combustión para la generación de energía

y su aprovechamiento por vías químicas no energéticas (Balakshina *et al.*, 2020).

A partir de la ingeniería de la lignina pueden obtenerse diversos nanomateriales de base carbonosa (Inagaki *et al.*, 2013), entre ellos el grafeno, según se muestra en la Figura 6.

El grafeno es considerado un nanomaterial muy importante en la actualidad, ya que es extremadamente noble con una inmensa potencialidad (Ferrari *et al.*, 2006, Lee *et al.*, 2008). Fue descubierto en el año 2004 y se otorgaron más de 10.000 patentes a las tecnologías relacionadas con el mismo en solo una década (Ciriminna *et al.*, 2015). Desde el punto de vista de la ingeniería, su potencialidad radica en sus interesantes características estructurales, físicas y químicas, lo que se traduce en prometedoras aplicaciones en diversos campos tecnológicos (44).

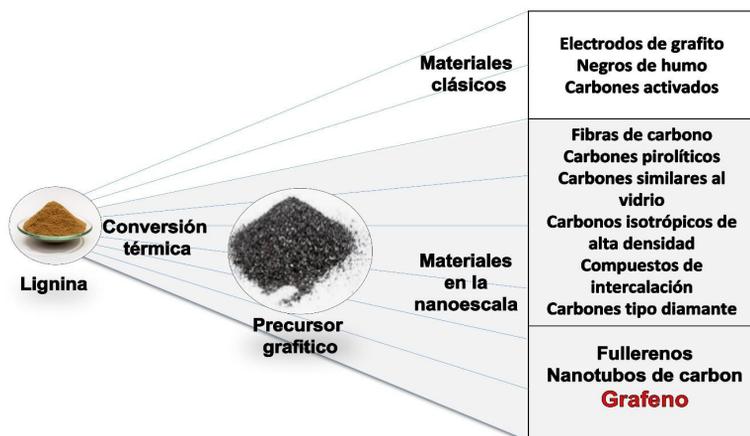


Figura 6. Nanomateriales a partir de lignina. Adaptado de Inagaki *et al.* (2013).

Dentro la amplia gama de usos del grafeno, a modo de ejemplo se puede hacer referencia a tres grandes campos de aplicación como son el almacenamiento energético, los nanocompuestos poliméricos y la remediación ambiental (Ciriminna *et al.*, 2015):

- El grafeno, con su extraordinaria fuerza, mejorada conductividad de electrones, ligereza, flexibilidad y

facilidad de procesamiento químico, es el material ideal que se utiliza para funcionalizar y mejorar un electrodo convencional.

- Los nanocompuestos poliméricos con muy bajas concentraciones de láminas de grafeno presentan una mejora notable en las propiedades térmicas y mecánicas de los polímeros básicos, mejorando la flexibilidad y resistencia térmica de la membrana de los nanocompuestos, debido a su mayor temperatura de transición vítrea. Las mayores concentraciones de láminas de grafeno proporcionan conductividad eléctrica y térmica, protección infrarroja y electromagnética, y propiedades reológicas y de barrera de gases mejoradas (anticorrosivas y retardantes de llama).
- Al ser hidrofóbico, fuertemente lipofílico y con un área de superficie excepcionalmente alta, el grafeno tiene una capacidad extraordinaria para adsorber moléculas orgánicas, lo que puede aprovecharse para purificar el aire, el suelo y el agua contaminada. Es decir que actúa como una esponja química capaz de adsorber y concentrar rápidamente moléculas orgánicas en su superficie y eliminarlas de la matriz ambiental.

El proceso para la obtención de grafeno se realiza tradicionalmente a partir del grafito. Sin embargo, este proceso se caracteriza por las fluctuaciones de calidad del producto final obtenido, lo que condiciona su producción a gran escala (Zurutuza y Marinelli, 2014). Los principales factores que condicionan el progreso del grafeno son los limitados desarrollos tecnológicos para su obtención, el volumen de producción y la logística (almacenamiento y transporte), entre otros. A medida que transcurren los años desde su descubrimiento, el desarrollo del grafeno y sus tecnologías de producción avanzan significativamente, por lo que surge la necesidad de su estandarización e industrialización. Lo anterior se traduce en el aumento de la demanda de un producto de calidad elevada y constante, con alto volumen de producción, confiabilidad y precio (Zurutuza y Marinelli, 2014).

Se han desarrollado procesos en los cuales se utilizan diversos tipos de catalizadores que permiten la produc-

ción de materiales como el grafeno a partir de residuos forestoindustriales en condiciones de operación menos intensivas que los procesos tradicionales. En este tipo de sistemas, el catalizador añadido tiene la finalidad de trabajar a menores temperaturas y aumentar los rendimientos de producto, entre otros (Marsh y Warburton, 1976; Shao *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2006; Sevilla *et al.*, 2007; Lei *et al.*, 2015).

La vinculación tecnológica como herramienta de incorporación de los nanomateriales en la industria celulósico papelera del país

Los mecanismos desarrollados para promover la asociación entre universidades y empresas han sido posibles mediante acciones de vinculación tecnológica. Estas acciones permiten a las instituciones de ciencia y tecnología ser agentes generadores de conocimiento que participen de manera activa en el desarrollo productivo de las industrias del país. Esto se realiza a través de la inclusión de nuevos procesos y productos, como es el caso de la incorporación de nanomateriales derivados de madera como aditivos en líneas de proceso actuales.

La introducción de nanoprodutos en la industria celulósico-papelera se ejemplificará a continuación mediante un estudio de caso. Con el fin de implementar nuevos procesos tecnológicos que conduzcan a la aplicación de celulosa nanofibrilar a empastes papeleros, para aumentar la resistencia del papel a escala industrial, la Asociación de Fabricantes de Celulosa y Papel y la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales (FCEQYN) de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM) firmaron un convenio de colaboración para la ejecución del proyecto: «Aplicación de nanocelulosa en la fabricación de papeles industriales». La AFCP actuó como intermediario de cinco fábricas celulósico-papeleras del país. El objetivo del proyecto consistió en la producción de CNF y CMF a partir de las materias primas utilizadas en cada fábrica. Estos nanomateriales posteriormente se aplicaron como aditivos para incrementar propiedades mecánicas en los papeles y cartones que éstas fabrican. El proyecto fue además presentado en la Convocatoria de Proyectos de

Vinculación Tecnológica 2017 «Universidades Agregando Valor» de la Secretaría de Políticas Universitarias de Ministerio de Educación de la Nación, obteniendo el financiamiento solicitado.

El proyecto se dividió en 2 etapas principales: 1) la producción y caracterización de nanofibras de celulosa y la implementación de metodologías y procesos a nivel laboratorio y 2) la implementación de metodologías y procesos a nivel industrial. La etapa 1 se desarrolló en el PROCYP, y dependió del tipo papel que la empresa propuso mejorar mediante la adición de las nanofibras (Area, 2019). Con esta base de conocimiento se realizarán las experiencias a nivel industrial (etapa 2).

El modelo de vinculación cooperativa se desarrolló de acuerdo a un enfoque descentralizado con 3 elementos involucrados: la universidad, las empresas y el estado (González Ariza, 2004). El estado, además de actuar como intermediario, financiando la infraestructura universitaria y el salario de los investigadores, aportó becas para estudiantes avanzados de Ingeniería Química, mediante el proyecto «Agregando Valor». En la Figura 7 se observan las actividades realizadas dentro de la primera etapa del proyecto de vinculación.

La primera etapa puede dividirse en 3 fases. Inicialmente (fase 1) las empresas plantearon un problema a través de un intermediario (la AFCP) lo que permitió generar la propuesta de vinculación y la asociación inicial entre las partes. A partir de ese momento, las comunicaciones se realizaron directamente entre el director del grupo de investigación y los responsables técnicos de cada empresa.

Como la aplicación de nanofibras requiere el conocimiento de aspectos relacionados con la química del extremo húmedo de la máquina de papel y dado que resulta imprescindible conocer los detalles referidos a este aspecto de la fabricación, en la fase 2 los responsables de la ejecución del proyecto realizaron una serie de visitas a las fábricas involucradas, con el fin de reproducir condiciones similares a escala laboratorio. En esta fase fue crucial la identificación de puntos críticos del proceso, como así también el reconocimiento de los puntos posibles para la incorporación de la CNF o CMF dentro de cada línea de fabricación. Una vez realizada la evaluación

inicial el grupo de investigación solicitó informes de proceso y productos con el fin de tener un conocimiento más amplio. Finalmente, una vez evaluados estos informes se solicitan las muestras correspondientes.

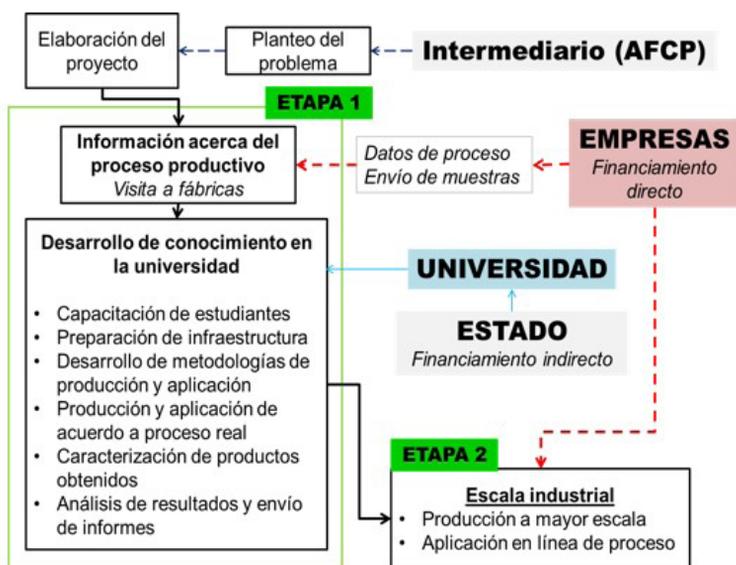


Figura 7. Etapas del proyecto de vinculación tecnológica.

Las fase 3 incluyó los trabajos de laboratorio, que involucraron la capacitación de estudiantes que participaron en experiencias, la preparación de la infraestructura basada en los procesos estudiados de fábrica, la producción y aplicación de CNF y CMF en los diferentes empastes de las cinco empresas y la caracterización de los papeles y cartones y el análisis de resultados, donde pudo observarse importantes mejoras en las propiedades físicas y mecánicas que las empresas buscaban maximizar. Durante toda la duración del proyecto el grupo de trabajo mantuvo una comunicación activa con los responsables técnicos de las empresas.

La etapa 2, consistente en la aplicación industrial, estará a cargo de la empresa. La participación del grupo de investigación en esta etapa estará basada solamente en recomendaciones y un seguimiento de la producción y

aplicación en la línea de proceso.

El resultado de la vinculación tecnológica basada en la incorporación de CNF y CMF como aditivo en industrias celulósico papeleras del país se midió a través de indicadores o canales (Britto, 2017) para varias competencias (Tabla 3).

Competencias	Indicadores
Intercambio de conocimiento	Incorporación de infraestructura de planta piloto. Incorporación de metodologías de fabricación de papel. Publicaciones en colaboración. Formación conjunta de profesionales. Experiencia adquirida por el grupo de investigación. Conocimiento de proceso para la producción y aplicación de un nuevo producto en la empresa Participación en comisiones asesoras de los sectores público y privado.
Gestión de proyectos	Nuevas solicitudes de servicios y proyectos con base en la misma investigación. Investigaciones adicionales para una de las empresas involucradas.
Desarrollo de patentes y licencias	Solicitud de patentes. Incorporación de procesos al Sello Bioproducto Argentino (Ministerio de Agricultura s.f.).
Movilización de recursos humanos	Capacitación de estudiantes en trabajos de investigación relacionados con empresas. Participación en red temática CYTED-NANO-CELIA (CYTED s.f.). Extensión de metodologías a grupos de investigación y empresas del extranjero. Participación en eventos del sector.

Tabla 3. Indicadores de la vinculación tecnológica entre UNaM-AFCP.

El desarrollo de indicadores es de vital importancia para evaluar la cooperación entre los entes involucrados. Esta primera vinculación tecnológica para la incorporación de nanomateriales nos permite visualizar los aspectos relevantes requeridos para una vinculación exitosa. Por otro lado, nos permiten visualizar aquellos aspectos a mejorar.

Otra posibilidad de vinculación surge a partir de la for-

mación de redes temáticas con participación de la industria. En este sentido, el PROCYP ha coordinado la Red Iberoamericana NANOCELIA del Programa CYTED (2017-2022) en la cual también ha participado la AFCP. La Red NANOCELIA promueve el desarrollo de las capacidades de PYMES industriales de Iberoamérica para la definición de procesos de producción de celulosa nanofibrilada y el desarrollo de sistemas para aplicación en productos papeleros y de materiales compuestos. Participan grupos de investigación de universidades y empresas de 10 países con 164 profesionales de diferentes áreas temáticas relacionadas con del aprovechamiento de la biomasa agrícola y forestal, el desarrollo de productos de elevado valor añadido, el conocimiento y la experiencia en nanotecnología y las aplicaciones de dichos productos en sectores industriales. Argentina es miembro de CYTED, el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, que fue creado por los gobiernos de los países iberoamericanos para promover la cooperación en temas de ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo armónico de Iberoamérica. La financiación recibida por NANOCELIA ha permitido la realización de estadias de investigación de estudiantes de posgrado, jóvenes investigadores y la realización de eventos de CyT sobre la nanocelulosa y nanomateriales (CYTED 2017-2022).

La Capacitación es otra herramienta de vinculación. Desde 2014, mediante convenios de colaboración entre la Asociación Argentina de Fabricantes de Celulosa y Papel (AFCP) y la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la Universidad Nacional de Misiones el PROCYP presenta anualmente ofertas de capacitación para miembros de empresas (Capacitación e-learning en Celulosa y Papel). La AFCP se encarga de las inscripciones (4 a 7 cursos anuales con 20-30 alumnos por curso cada año) y el PROCYP del dictado. Las características distintivas de la propuesta son el dictado totalmente a distancia, la cantidad y calidad de los materiales que se ofrecen a los alumnos y la experiencia y disponibilidad de los docentes. Uno de los cursos ofrecidos es «Biorrefinerías e Innovación». El curso tiene como objetivo proporcionar a los participantes una introducción a los conceptos de

bioeconomía, biorrefinería y procesos innovadores en la industria de pulpa y papel. Está destinado a empresas de fabricación de pulpas celulósicas y de papeles que quieran conocer acerca de los últimos avances aplicables a la industria. Se presentan las formas de obtener nuevos productos a partir de las mismas materias primas, agregando valor a la producción de commodities. Finalmente, se presentan los nuevos procesos y productos innovadores que surgen en el mundo, para aplicar o para producir en el sector, por ejemplo, la posibilidad de mejorar las propiedades de los productos tradicionales a partir de la aplicación del agregado de nanocelulosa.

Desafíos actuales para la incorporación de nanomateriales en la forestoindustria

El procesamiento de materias primas de bajo costo y gran disponibilidad en la región NEA como el aserrín y otros residuos para la producción de materiales a escala nanométrica podría incorporarse a los ya establecidos comercialmente. Para ello es necesario incentivar la inversión en investigación y desarrollo y mejorar la articulación entre los organismos públicos, privados y los centros de investigación, entre otros.

La potenciación de las actividades de vinculación en la forestoindustria está íntegramente relacionada con sus alcances y desafíos, por lo que los equipos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) y las empresas se verán obligados a cooperar para incrementar el desarrollo productivo (Lottersberger y Garrido Noguera, 2021).

En forma general, los principales desafíos identificados como prioritarios en la investigación y desarrollo (I+D) para avanzar en la fabricación y en el uso de los nanomateriales derivados de la biomasa lignocelulósica se indican en la Figura 8.



Figura 8. Principales desafíos para avanzar en la fabricación y en el uso de los nanomateriales derivados de la biomasa lignocelulósica.

Los desafíos actuales para la incorporación de nanomateriales desarrollados a partir de aserrines de pino y eucaliptus en el contexto del NEA comprenden:

- **Desafíos económicos:** Aumento de la inversión en proyectos de I+D+i por parte del estado, incrementando la participación por parte de las empresas del país. El número de industrias en el país que actualmente invierte en I+D+i es reducida. Los factores que influyen involucran acciones económicas que están fuera del alcance de la universidad. Afortunadamente, en los últimos años el estado nacional ha tomado la iniciativa en la generación de convocatorias que involucran proyectos de vinculación entre grupos de investigación y empresas.
- **Desafíos de propiedad intelectual:** Identificación de procesos de transferencia de productos y tecnologías de tipo «ciega» (Codner *et al.*, 2012). En este caso se

deben generar herramientas que permitan al investigador capitalizar sus investigaciones, es decir, resguardarlas mediante la generación de algún tipo de protección en forma previa a su publicación y, por otra parte, facilitar el acceso de las empresas nacionales a la información generada. La identificación de patentes citando las publicaciones sería un indicador del potencial tecnológico del conocimiento producido.

- **Desafíos tecnológicos:** En el caso particular de la CNF y CMF, uno de los principales desafíos durante en la cadena de producción y comercialización es el transporte. Esto se debe a que ambos son materiales que presentan gran contenido de agua. Sin embargo, se ha planteado como estrategia que las empresas las produzcan in situ. Como alternativa para la producción de CMF se ha planteado la utilización de refinadores de discos, equipos conocidos en la industria celulósico-papelera. Esto sería más complejo en el caso de las CNF, debido a que su producción involucra equipos menos tradicionales en el área de celulosa y papel, además de la generación de un efluente líquido con químicos que deben tratarse. Para el caso de nanoestructuras de carbono, los principales desafíos tecnológicos se relacionan con la capacidad de controlar y analizar las propiedades físicas, morfologías, calidad del producto final y sus rendimientos (Ouyang *et al.*, 2021). En este sentido, se ha avanzado en nuevos procesos y el desarrollo de catalizadores que permiten mejorar los rendimientos, entre otros. Sin embargo, deberán desarrollarse nuevos procesos de producción para su implementación a escala comercial.
- **Desafíos energéticos:** Los procesos de producción de nanomateriales, tanto a partir de celulosa como de lignina, tienen consumos energéticos elevados. En el caso de CNF y CMF, debido principalmente a los tratamientos mecánicos, y para la conversión de lignina a productos de nano escala se requieren elevadas temperaturas (Abbati de Assis *et al.*, 2018; Ouyang *et al.*, 2021; Clauser *et al.*, 2022; Kumar Saha y Dutta, 2022), lo que implica elevados costos de pro-

ducción. En este sentido, se ha avanzado en procesos de producción empleando bacterias, enzimas y catalizadores, entre otros.

- **Desafíos ambientales:** Debido al vertiginoso avance en el desarrollo de estos procesos en los últimos años, no se han reportado estudios sobre la evaluación ambiental integral de estos procesos y productos. Estudios recientes a nivel internacional (Clouser *et al.*, 2022) mencionaron la falta de datos de inventario para desarrollar evaluaciones ambientales integrales para estos procesos.
- Además de las inversiones en investigación y desarrollo, la implementación de estos nuevos procesos requiere de la intervención de organismos gubernamentales, sociales y privados, entre otros.

Los organismos públicos son clave para facilitar la vinculación de los organismos de I+D+i con organismos privados (principalmente empresas y grupos inversores), ya que tienen la potestad de flexibilizar el acceso a la información y a los recursos de financiamiento necesarios que permitirían implementar mejores estrategias de cooperación para el desarrollo de nuevas cadenas de alto valor en la región (Figura 9)



Figura 9. Diferentes estadios requeridos para la creación de

nuevos productos para el mercado.

En los últimos años se ha avanzado con la implementación a escala comercial de los productos a escala nanométrica a partir de biomasa. En el caso de CNF y CMF existen industrias que desarrollaron procesos a escala comercial (Clauser *et al.*, 2022). Aún no existen procesos a escala comercial implementados en el caso de las nanoestructuras de carbono, aunque si hay proyectos para su desarrollo (Stora Enso s.f., Process Nordic s.f.).

Conclusiones

La aplicación de la nanotecnología en la industria de los productos forestales es una oportunidad única para producir nanoprodutos basados en materias primas de bajo costo y renovables, aplicando procesos industriales sustentables. Estos nanomateriales muestran un gran potencial de aplicación en diversos sectores industriales y mercados debido a sus propiedades únicas, además de sus ventajas de ser biocompatibles y biodegradables y su potencial para mejorar la reciclabilidad y las propiedades de diversos productos.

La producción de nanocelulosa y de nanomateriales a partir de la lignina puede ser una estrategia para agregar valor a la forestoindustria del NEA y beneficiar a los objetivos de la Bioeconomía de Argentina. Aunque se encuentran en una etapa inicial, las tecnologías desarrolladas hasta el momento y sus aplicaciones permitirían acciones a corto plazo entre instituciones de I+D+i, la industria forestal y la celulósico papelera. Estas acciones permitirán potenciar la valoración de la biomasa disponible en un sector estratégicamente posicionado en cuanto a disponibilidad de materias primas, logrando una mayor competitividad en todos los eslabones del sector. Sin embargo, aún es de vital importancia encontrar las estrategias para solventar todas las acciones y lograr el máximo aprovechamiento de los nanomateriales para el desarrollo productivo del país.

EHMAN, Nanci

Ing. Química., Dra. en Ciencias Aplicadas, Inv. Asistente del CONICET y Prof. de la Univ. Nac. Misiones. Email: nanciehman@gmail.com

COVINICH, Laura

Ing. Química, Dra. Ciencia de Materiales, Inv. Asistente del CONICET, Instituto de Materiales de Misiones (IMAM, CONICET-UNaM) y Prof. en la Universidad Nacional de Misiones. Email: lgcovinich@gmail.com

CLAUSER, Nicolás

Ing. Industrial, Dr. en Ciencias Aplicadas, Inv. Asistente del CONICET, Instituto de Materiales de Misiones (IMAM, CONICET-UNaM) y Prof. en la Universidad Nacional de Misiones. Email: nicolas.clouser@gmail.com

VALLEJOS, María

Ing. Química, Dra. Ciencia y Tecnología de Mat. Celulósicos en la Ing. de Prod. Papeleros, Inv. Independiente del CONICET, Instituto de Materiales de Misiones (IMAM, CONICET-UNaM)). Prof. en la Universidad Nacional de Misiones. Directora Maestría en CYT de los Materiales Fibrosos (MAMFI, UNaM). Email: mariaxvallejos@gmail.com

AREA, María Cristina

Ing. Química, Dra. Ing. Papelera, Inv. Principal del CONICET y Prof. Prof. en la Universidad Nacional de Misiones. Directora del Instituto de Materiales de Misiones (IMAM, CONICET-UNaM). Email: cristinaarea@gmail.com

Referencias

- Abbati de Assis, Camilla, Greca Luiz G... Rojas, Orlando J. (2018). Techno-economic assessment, scalability and applications of aerosol lignin micro- and nano-particles. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 6(9), 11853-11868. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02151>
Albuquerque, Tiago Lima de, da Silva Jr, Ivanildo José...

Ponte Rocha, Maria Valderez (2014). Biotechnological production of xylitol from lignocellulosic wastes: A review. *Process Biochemistry*, 49(11), 1779–1789. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.07.010>

Alonso, David Martin, Hakim, Sikander H... Dumesic, James A. (2017). Increasing the revenue from lignocellulosic biomass: Maximizing feedstock utilization. *Science advances*, 3(5), e1603301. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1603301>

Area, María Cristina (2019). *Ventajas y dificultades de la aplicación de celulosa nano y microfibrilada en empastes industriales*. Jornadas Celulósico Papeleras.

Balakshin, Mikhail Yu., Capanema, Ewellyn A. ... Rose-nau, Thomas (2020). New opportunities in the valorization of technical lignins. *ChemSusChem*, 14(4), 1016-1036. <https://doi.org/10.1002/cssc.202002553>

Britto, Fabián Andrés (2017). *Análisis de indicadores de transferencia tecnológica por parte de grupos de investigación: Una propuesta basada en la adaptación de los canales utilizados en la relación universidad-empresa*. CIECTI.

Cao, Yang, Chen, Season S... Tsang, Daniel C.W. (2019). Advances in lignin valorization towards bio-based chemicals and fuels: Lignin biorefinery. *Bioresource technology*, 291, 121878. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121878>

Chinga-Carrasco, Gary, Ehman, Nanci V... Area, María Cristina (2018). Pulp and Pretreatment Affect the Characteristics of Bagasse Inks for Three-dimensional Printing. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(3), 4068-4075. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04440>

Ciriminna, Rosaria, Zhang, Nan... Pagliaro, Mario (2015). Commercialization of graphene-based technologies: a critical insight. *Chemical Communications*, 51(33), 7090-7095. <https://doi.org/10.1039/C5CC01411E>

Clauser, Nicolás Martín (2019). Estudio técnico-económico de la biorrefinería de los residuos de industrialización primaria de la madera y agroindustriales. Tesis de Doctorado presentada para obtener el título de Doctor en Ciencias Aplicadas. Posadas, Misiones.

Clauser, Nicolás Martín, Felissia, Fernando E... Vallejos, María E. (2021a). A framework for the design and analysis of integrated multi-product biorefineries from agricultural and forestry wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110687.

Clauser, Nicolás Martín, Felissia, Fernando E... Vallejos, María E. (2021b). Design of nano and micro fibrillated cellulose production processes from forest industrial wastes in a multiproduct biorefinery. *Chemical Engineering Research and Design*, 167, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.12.003>

Clauser, Nicolás Martín, Felissia, Fernando E... Vallejos, María E. (2022). Technological and economic barriers of industrial-scale production of nanocellulose. En Shanker, U., Hussain, C., and Rani, M. (eds.). *Green Nanomaterials for Industrial Applications* (pp. 21–39). Elsevier.

Codner, Darío, Becerra, Paulina y Díaz, Alberto (2012). La transferencia tecnológica ciega: desafíos para la apropiación del conocimiento desde la universidad. *Redes: revista de estudios sociales de la ciencia*, 18(35), 161-171.

Datta, Dipaloy, Marti, Mustafa E... Kumar, Sushil (2017). Equilibrium study on the extraction of levulinic acid from aqueous solution with aliquat 336 dissolved in different diluents: Solvent's polarity effect and column design. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 62(1), 3-10. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00164>

Denaday, Francisco, Escartín, Celina... Spinazzola, Emilio (2020). *Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina*. Colección Documentos Técnicos (FAO) n° 19.

Ehman, Nanci V., Ponce de León, Agustina... Area, María Cristina (2022). Towards Biodegradable Barrier Packaging: Production of Films for Single-Use Primary Food Liquid Packaging. *BioResources*, 17(3), 5215-5233.

Ehman, Nanci V., Tarrés, Quim... Mutjé, Pere (2016). From pine sawdust to cellulose nanofibers. *Cellulose Chemistry and Technology*, 50(3-4), 361-367.

Farzad, Somayeh, Mandegari, Mohsen Ali... Görgens, Johann F. (2017). Multi-product biorefineries from lignocelluloses: a pathway to revitalisation of the sugar industry? *Biotechnology for biofuels*, 10, 1-24. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0761-9>

Ferrari, A. C., Meyer, J. C... Geim, A. K. (2006). Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Physical review letters*, 97(18), 187401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.187401>

Figueiredo, Patrícia, Lintinen, Kalle... Santos, Hélder

A. (2018). Properties and chemical modifications of lignin: Towards lignin-based nanomaterials for biomedical applications. *Progress in Materials Science*, 93, 233-269. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.001>

Frankó, Balázs, Galbe, Mats y Wallberg, Ola (2016). Bioethanol production from forestry residues: A comparative techno-economic analysis. *Applied energy*, 184, 727-736.. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.011>

Giuliano, Aristide, Poletto, Massimo y Barletta, Diego (2016). Process optimization of a multi-product biorefinery: The effect of biomass seasonality. *Chemical engineering research and design*, 107, 236-252. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.12.011>

González Ariza, Ángel León (2004). Un modelo de vinculación universidad-PYME- administración pública para la creación de centros de desarrollo productivo en la Costa Caribe de Colombia. *Ingeniería y Desarrollo*, (15), 84-115.

Gopi, Sreerag, Balakrishnan, Preetha... Thomas, Sabu (2018). Applications of cellulose nanofibrils in drug delivery. En *Applications of Nanocomposite Materials in Drug Delivery* (pp. 75–95). Elsevier.

Gulshan, Sindhwani, Ilyas, U. K. y Vidhu, Aeri (2012). Microbial transformation of eugenol to vanillin. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research*, 2(2), 313-318.

Imlauer Vedoya, Camila M., Area, María Cristina... Felissia, Fernando E. (2022). Study on Soda–Ethanol Delignification of Pine Sawdust for a Biorefinery. *Sustainability*, 14(11), 6660. <https://doi.org/10.3390/su14116660>

Inagaki, Michio, Kang, Feiyu... Konno, Hidetaka (2013). *Advanced Materials Science and Engineering of Carbon*. Springer.

Kangas, Heli, Felissia, Fernando E... Chinga-Carrasco, Gary (2019). 3D Printing High-Consistency Enzymatic Nanocellulose Obtained from a Soda-Ethanol-O₂ Pine Sawdust Pulp. *Bioengineering*, 6(3), 60.

Kumar Saha, Jhantu y Dutta, Animesh (2022). A Review of Graphene: Material Synthesis from Biomass Sources. *Waste and Biomass Valorization*. 13, 1385–1429. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01577-w>

Lee, Changgu, Wei, Xiaoding... Hone, James (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength

of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385-388. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>

Lei, Hong, Yan, Tingting... Zhang, Dengsong (2015). Graphene-like carbon nanosheets prepared by a Fe-catalyzed glucose-blowing method for capacitive deionization. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(11), 5934-5941. <https://doi.org/10.1039/c4ta05713a>

Lichtenthaler, Frieder (2007). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry - Carbohydrates. En *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (pp. 3970-4012). Wiley.

Lottersberger, Javier y Garrido Noguera, Celso (2021). *Alcances y desafíos de la vinculación tecnológica para la transformación social*. REDUE, UNL y UDUAL.

Lu, An-Hui, Li, Wen-Cui... Schüth, Ferdi (2006). Low temperature catalytic pyrolysis for the synthesis of high surface area, nanostructured graphitic carbon. *Chemistry of materials*, 18(8), 2086-2094. <https://doi.org/10.1021/cm060135p>

Marsh, H., Warburton, A. P. (1976). Catalytic graphitization of carbon using titanium and zirconium. *Carbon*, 14(1), 47-52. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(76\)90082-8](https://doi.org/10.1016/0008-6223(76)90082-8)

Misirlian, Eduardo (2019). Análisis del complejo foresto industrial maderero en Argentina. *Documentos de Economía Regional y Sectorial*, (66), 1-40.

Moncada, Jonathan, Posada, John A. y Ramírez, Andrea (2017). Comparative early stage assessment of multiproduct biorefinery systems: An application to the isobutanol platform. *Bioresource technology*, 241, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.074>

Moncada, Jonathan, Vural, Iris... Ramírez, Andrea (2018). Techno-economic and ex-ante environmental assessment of C6 sugars production from spruce and corn. Comparison of organosolv and wet milling technologies. *Journal of Cleaner Production*, 170, 610-624. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.195>

Ouyang, Dan-dan, Hu, Li-bing... Zhang, Li-li. (2021). A review of biomass-derived graphene and graphene-like carbons for electrochemical energy storage and conversion. *New Carbon Materials*, 36(2), 350-372. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(21\)60024-0](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(21)60024-0)

Pérez-Fortes, Mar, Schöneberger, Jan C... Tzimas, Evangelos (2016). Formic acid synthesis using CO₂ as raw ma-

terial: Techno-economic and environmental evaluation and market potential. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(37), 16444-16462. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.199>

Prasad, Ram, Kumar, Vivek y Kumar, Manoj (2017). Nanotechnology: Food and environmental paradigm. En *Nanotechnology: Food and Environmental Paradigm* (pp. 1-344). Springer.

Sadhukhan, Jhuma, Ng, Kok Siew y Martinez-Hernandez, Elias (2016). Novel integrated mechanical biological chemical treatment (MBCT) systems for the production of levulinic acid from fraction of municipal solid waste: A comprehensive techno-economic analysis. *Bioresource technology*, 215, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.030>

Schmidt, Lisa M., Mthembu, Lethiwe D... Smirnova, Irina (2017). Levulinic acid production integrated into a sugarcane bagasse based biorefinery using thermal-enzymatic pretreatment. *Industrial crops and products*, 99, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.010>

Sevilla, M., Sanchís, C... Fuertes, A. B. (2007). Synthesis of graphitic carbon nanostructures from sawdust and their application as electrocatalyst supports. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(27), 9749-9756. <https://doi.org/10.1021/jp072246x>

Shao, W. Z., Ivanov, V. V... Wang, Y. (2004). A study on graphitization of diamond in copper-diamond composite materials. *Materials letters*, 58(1-2), 146-149. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00433-6](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00433-6)

Syrový, Tomáš, Maronová, Stanislava... Chinga-Carrasco, Gary (2019). Wide range humidity sensors printed on biocomposite films of cellulose nanofibril and poly (ethylene glycol). *Journal of Applied Polymer Science*, 136(36), 47920.

Vallejos, María E., Area, María Cristina (2019). *Producción y usos de la celulosa nanofibrilada y microfibrilada*. Nanocelia y CYTED.

Vallejos, María E., Felissia, Fernando E... Mutjé, Pere (2016). Nanofibrillated cellulose (CNF) from eucalyptus sawdust as a dry strength agent of unrefined eucalyptus handsheets. *Carbohydrate polymers*, 139, 99-105.

Win, David Tin (2005). Furfural – Gold from Garbage.

Au J. Technol, 8(4), 185-190.

Zhang, Y-H Percival (2008). Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries. *Journal of industrial microbiology and biotechnology*, 35(5), 367-375. <https://doi.org/10.1007/s10295-007-0293-6>

Zondervan, Edwin, Nawaz, Mehboob... Gani, Rafiqul (2011). Optimal design of a multi-product biorefinery system. *Computers & Chemical Engineering*, 35(9), 1752-1766. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.01.042>

Zurutuza, Amaia y Marinelli, Claudio (2014). Challenges and opportunities in graphene commercialization. *Nature nanotechnology*, 9(10), 730-734. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.225>

Documentos

AFRY Management Consulting (2021). Elaboración de una Propuesta de Desarrollo Foresto-industrial Sostenible en Argentina.

Big Think (s.f.). Graphene typically costs \$200,000 per ton. Now, scientists can make it from trash.

Borregaard (2016). Microfibrillated cellulose at a glance - Characteristics and potential applications.

CYTED (s.f.). Red de transferencia tecnológica sobre aplicaciones de nanocelulosa en iberoamérica, <https://www.cyted.org/content/317rt0525-integrantes>

E4tech, RE-CORD, WUR. (2015). From the Sugar Platform to biofuels and biochemicals. Final report for the European Commission, contract No. ENER/C2/423-2012/SI2.673791.

Ministerio de Agricultura, G. y P. (2019). Plan estratégico forestal y foresto industrial Argentina 2030.

Ministerio de Agricultura, G. y P. de la N. (s.f.). Sello Bioproducto Argentino, <https://www.argentina.gob.ar/agricultura/sello-bioproducto-argentino>

Process Nordic (s.f.). Samarbete ska ge träbatterier, https://www.processnet.se/article/view/859845/samarbete_ska_ge_trabatterier

Stora Enso (s.f.): NeoFiber® by Stora Enso - Bio-based materials, <https://www.storaenso.com/en/products/bio-based-materials#:~:text=A renewable carbon fiber,without compromising on mechanical performance.>

Sub. de Desarrollo Forestoindustrial y Sec. de Agricultura, G. y P. (2018a). Censo Nacional de aserraderos: Informe del relevamiento censal en la provincia de Misiones.

Sub. de Desarrollo Forestoindustrial y Sec. de Agricultura, G. y P. (2018b). Censo Nacional de aserraderos: Informe del relevamiento censal en la provincia de Corrientes.

Sub. de Desarrollo Forestoindustrial y Sec. de Agricultura, G. y P. (2018c). Censo Nacional de aserraderos: Informe del relevamiento censal en la provincia de Chaco.

Sub. de Desarrollo Forestoindustrial y Sec. de Agricultura, G. y P. (2016). Censo Nacional de aserraderos: Informe del relevamiento censal en la provincia de Formosa.