

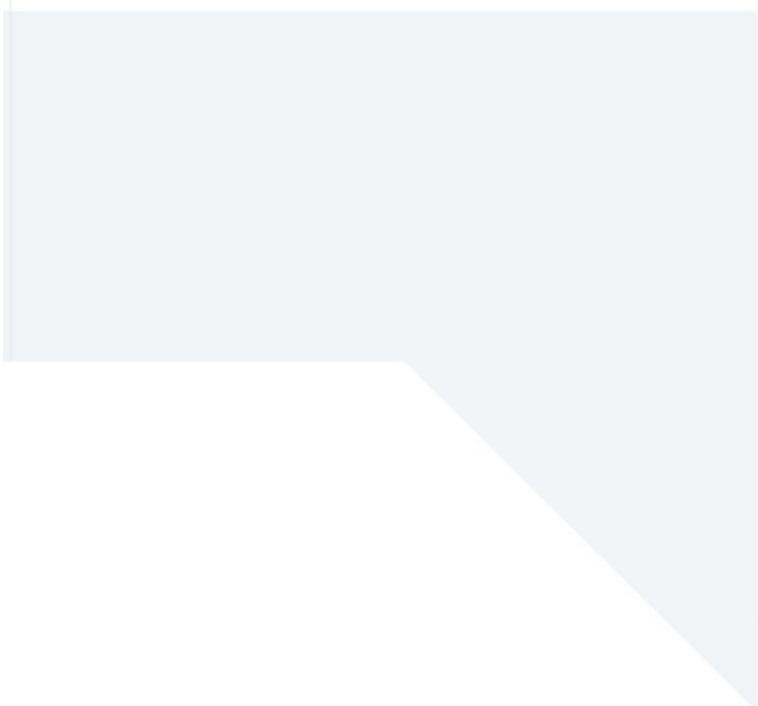
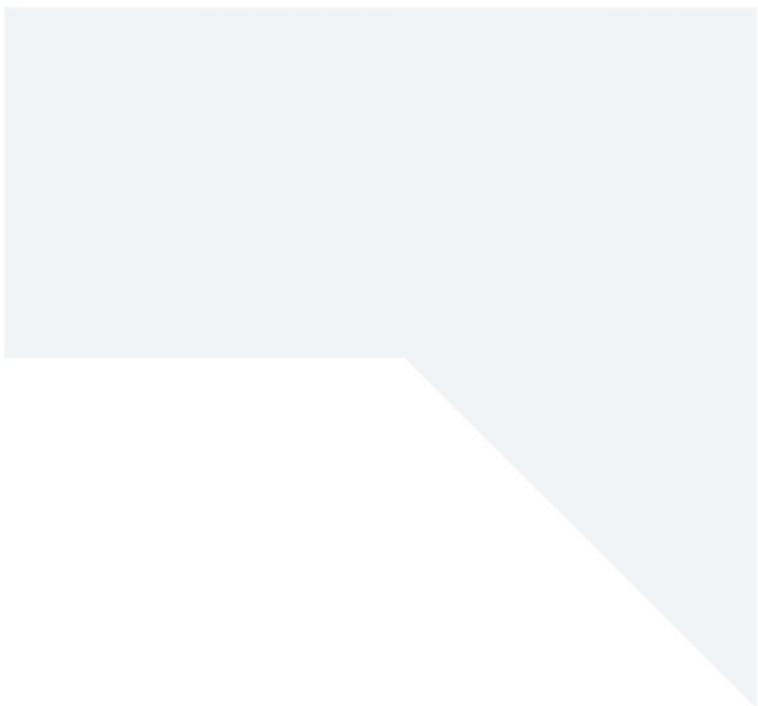


UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica

Andrés Dieste
María Noel Cabrera
Leonardo Clavijo
Norberto Cassella

Montevideo, Uruguay
Octubre de 2019





ISBN: 978-9974-0-1695-5

Este estudio fue financiado por la Oficina de Planeamiento y Presupuesto del Gobierno de Uruguay - OPP.

Los autores desean agradecer las ricas discusiones que tuvieron lugar durante la elaboración de este informe con el equipo de la Dirección de Planificación de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, que ayudaron a mejorar el resultado de este trabajo.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Tabla de contenidos

1	Introducción.....	2
2	FBA 2: Transformación mecánica de la madera	3
2.1	Identificación de productos	3
2.2	Enumeración de tareas en un marco temporal.....	6
2.2.1	Desarrollo del mercado interno de productos de madera estructurales	6
2.2.2	Promover la instalación de fábricas de productos de ingeniería de la madera.....	7
2.2.3	Inclusión específica de productos de madera en proyectos de obra pública.....	7
2.2.4	Promover la investigación en productos de madera para construcción	7
2.2.5	Promover la inclusión de carpinterías locales en la fabricación de productos de madera para la construcción	8
2.3	Restricción del uso de CCA para la impregnación de madera y estudio de alternativas	9
2.4	Identificación de alternativas tecnológicas para los subproductos: chip, aserrín y corteza.	10
2.5	Desarrollo de un modelo para la industrialización global de la madera de pino.....	13
3	FBA 3: Transformación química de madera.....	17
3.1	Descripción con los productos de mayor potencial de crecimiento	17
3.1.1	Pulpa de disolución:	17
3.1.2	Pulpa fluff	19
3.1.3	Pulpa NSSC (neutral sulphite semichemical pulp).....	20
3.1.4	Pulpa kraft de pino	20
3.1.5	Cartón corrugado	21
3.2	Análisis de las fortalezas y debilidades de Uruguay como productor de dichos productos	23
4	FBA 4: Biorrefinerías.....	24
4.1	Introducción	24
4.2	Análisis de la producción a escala piloto-comercial actual y del pasado reciente (últimos 10 años) a nivel internacional (productos, tecnología, empresas).....	29
4.3	Evaluación y descripción de los productos con mayor potencial de crecimiento en una biorrefinería de base forestal.....	37
5	Análisis de las fortalezas y debilidades de Uruguay para la transformación química de la madera (nuevos productos de fibras y biorrefinerías)	42
5.1	Fortalezas.....	42
5.2	Oportunidades.....	43
5.3	Desafíos.....	44
5.4	Amenazas.....	45
6	Conclusiones del presente trabajo	46
7	Referencias bibliográficas	48

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

1 Introducción

El proyecto de prospección “*Forest-based Bioeconomy Areas: Strategic openings by 2050*” tiene dos etapas. En lo que compete al equipo asesor de Facultad de Ingeniería, la primera concluyó con la presentación del informe “*Strategic products from a technological point of view*” en agosto de 2018.

La segunda etapa, incluyó varios informes, siendo éste que se corresponde con las actividades resaltadas en la siguiente tabla.

Actividad	Hoja de ruta	Descripción
1		Devolución informe final VTT
2	FBA 2 Transf. mecánica	Relevamiento de las limitantes normativas para el desarrollo de la construcción con madera en Uruguay: Ordenanzas nacionales, Ordenanzas municipales y Dirección Nacional de Bomberos.
3		Propuesta de un Pliego de Condiciones Técnicas de los productos de ingeniería de madera en Uruguay para uso estructural: madera aserrada, madera laminada encolada y paneles de madera contralaminada.
4.a.		Tareas para fomentar la producción de productos de mayor valor agregado en el país. Restricción del uso de CCA para la impregnación de madera, y estudio de alternativas. Alternativas tecnológicas para los subproductos: chip, aserrín y corteza. Desarrollo de un modelo para la industrialización global de la madera de pino.
4.b.	FBA 3 Transf. química	Descripción de productos con mayor potencial de crecimiento. Análisis de las fortalezas y debilidades de Uruguay como fabricante de dichos productos
4.c.	FBA 4 Biorrefinerías	Análisis de la producción a escala piloto-comercial actual y del pasado reciente (últimos 10 años) a nivel internacional (productos, tecnología, empresas) Evaluación y descripción de los productos con mayor potencial de crecimiento. Análisis de las fortalezas y debilidades de Uruguay como fabricante de dichos productos.

El desarrollo de hojas de ruta se focalizará en las actividades priorizadas por la gobernanza del grupo de trabajo:

1. Desarrollo de productos competitivos de madera de pino y eucalipto para a la construcción con destino al interno y mercado internacional, utilizando normativa de fabricación estandarizada (FBA2_OP3)
2. Promover las inversiones en productos de pasta distintos a BEKP: pasta de pino Kraft, pasta de disolución y pasta NSSC (FBA3_OP2)
3. Promover la creación de redes para la utilización de corrientes secundarias de la transformación mecánica de madera y otras agroindustrias para la producción de bioquímicos, materiales y biocombustibles (FBA4_OP2)

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

2 FBA 2: Transformación mecánica de la madera

2.1 Identificación de productos

En el informe anterior se desarrolló un análisis de los productos de madera para la construcción cuya fabricación en Uruguay tiene potencial en cuanto a valor agregado y retorno para el inversor; por otro lado, también se reportó que los productos presentan diferencias en sus indicadores económicos dependiendo de si la fabricación se hace con pino o eucalipto (Dieste et al. 2018a). En este informe, a modo de síntesis, se clasificaron los productos en un eje de valor y otro de complejidad, representados por el valor agregado y la inversión unitaria, respectivamente. Además, el EBIDTA por unidad de producto se representa como el diámetro del círculo que indica cada producto. De esta forma, los productos más atractivos tendrán mayor valor agregado, con alto EBIDTA y baja inversión. Asimismo, se presentan otros productos, tableros de densidad media (MDF), papel de embalaje de fibra larga, y pasta blanqueada de eucalipto (BEKP) a modo de comparación. Se observa que tanto papel de embalaje como BEKP presenta altos niveles de inversión por unidad de producto, a lo que podría agregarse que se trata de productos que requieren una escala mínima para poder absorber los costos fijos de las operaciones (Dieste et al. 2018a). El papel de embalaje sin blanquear de fibra larga se presenta como una alternativa muy interesante, ya que presenta un valor agregado comparable al LVL. Esto se debe al precio que actualmente presenta el producto (650 USD/ton en China), y al bajo valor de la materia prima (Costa et al. 2019) (Figura 1).

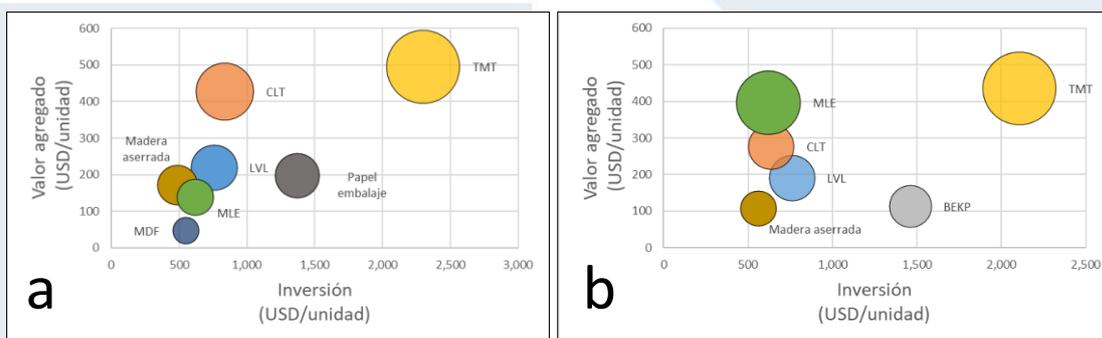


Figura 1. Clasificación de productos por especie, a) pino y b) eucalipto, en función del valor agregado por unidad y la inversión por unidad, y representado el EBIDTA unitario mediante el diámetro de los círculos.

Tanto para pino como para eucalipto, a excepción de la madera modificada térmicamente (TMT), que presenta valores de inversión por producto superiores a 2,000 USD, los restantes productos para la construcción presentan valores de inversión unitaria inferiores a 1,000 USD. Difieren en valor agregado y en EBIDTA, ambas por producto. En cuanto a valor agregado, en pino se destaca TMT, la madera contralaminada (CLT), y la madera microlaminada (LVL), mientras que en eucalipto el orden sería madera laminada encolada (MLE), CLT y LVL (Tabla 1).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Tabla 1. Identificación de productos comunes a pino y eucalipto en función del valor agregado por unidad

Producto	Pino	Eucalipto
Madera modificada térmicamente (TMT)	1	1
Madera contralaminada (CLT)	2	3
Madera microlaminada (LVL)	3	4
Madera laminada encolada (MLE)	5	2
Madera aserrada seca en cámara y clasificada	4	5

Se podría concluir que los productos para la construcción más interesantes, tanto para pino como para eucalipto, son TMT y CLT. Para eucalipto, MLE parece un producto sumamente atractivo. La madera aserrada requiere bajos niveles de inversión, lo que lo hace un producto interesante, pero tanto el valor agregado como el EBIDTA es bajo. La madera aserrada es el insumo principal para la fabricación de TMT, CLT o MLE, por lo tanto, en un sistema de asignación de producto ideal un aserradero clasificaría las tablas de forma de obtener madera de apariencia sin defectos para carpintería, de alto valor, y utilizar la restante para fabricar productos para la construcción. Tal es el criterio empleado en el desarrollo del modelo para la industrialización de pino presentado en este informe.

Evidentemente, existe otra dimensión que es necesario considerar: el tamaño potencial del mercado. Los productos para la construcción con madera presentan excelentes perspectivas de crecimiento a nivel global (Cordeiro 2018; Dangel 2016), pero actualmente los mercados se encuentran deprimidos, con demanda constante, pero precios históricamente bajos. De acuerdo con proyecciones recientes, esta situación se mantendrá por los próximos años (Talvi 2018). Por lo tanto, el desafío del desarrollo de esta industria es conseguirlo con precios internacionales deprimidos.

El desarrollo industrial debe planificarse en función de la demanda de los productos, aunque cuando se trata de productos que están en una etapa inicial de su desarrollo, con una demanda elástica, la incertidumbre es grande, especialmente en un escenario a 2050. Por lo tanto, se requiere un ejercicio de estimación de tamaño de los mercados para productos de construcción en madera, en particular los productos estructurales de ingeniería de la madera (EWP) y su principal insumo, la madera aserrada. Esta información es de difícil acceso, y, por lo tanto, este informe se sustentará en estimaciones razonables a partir de bibliografía de acceso público. Este abordaje presenta el riesgo de subestimar el desarrollo de los mercados de productos de madera para la construcción, ya que existen indicaciones de que estos productos pueden avanzar significativamente en la sustitución de materiales tradicionales como el concreto y el acero (Cordeiro 2018; Ramage et al. 2017; Dangel 2016; Hildebrandt, Hagemann, and Thrän 2017). A nivel global, el crecimiento disruptivo de la demanda puede deberse a las siguientes razones:

1. Impacto global de las políticas de la reducción de los gases de efecto invernadero, a partir de acciones para estimular el uso de materiales con alta demanda energética, tales como el concreto y el acero.
2. Impulso por aumentar la productividad de la industria de la construcción, aumentando la prefabricación.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

3. Incremento de la demanda habitacional en centros urbanos.
4. Actualización de estándares y normativa que regulan la construcción con madera, ya que actualmente el uso de la madera está restringido por normativa que no considera el total potencial de la madera como material constructivo.

De esta forma, en base a bibliografía disponible, se propone un escenario de producción global a 2020, 2030 y 2050 (Tabla 2).

Tabla 2. Producción de madera aserrada, TMT y EWP para tres situaciones, 2020, 2030 y 2050.

Producto	Producción global $1 \times 10^6 \text{ m}^3$		
	2020	2030	2050
Madera aserrada ¹	393	411	434
Madera modificada térmicamente (TMT) ²	0.4	1.1	3.0
Madera contralaminada (CLT) ³	1.8	6.5	17.3
Madera microlaminada (LVL) ⁴	3.0	7.2	19.3
Madera laminada encolada (MLE) ²	2.5	5.8	15.4

La interrogante por responder es cuál sería el volumen de estos productos que podría fabricar Uruguay. De los productos mencionados, en la actualidad Uruguay solamente produce madera aserrada, $0.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 2017 (Boscana and Boragno 2018). Sin embargo, existen todos los elementos para que ocurra una expansión de la fabricación de productos destinados a la construcción con madera, lo que probablemente suceda si hay una reactivación de la construcción en el hemisferio norte. Asimismo, a diferencia de otros productos, en los que debido al tamaño de la población de Uruguay el mercado interno es irrelevante, el mercado local de productos de madera para la construcción puede transformarse en un nicho interesante. A modo de ejemplo, la aparición de restricciones locales y regionales en el uso de madera impregnada con biocidas puede provocar un aumento de la demanda de madera con alternativas de protección para su uso en el exterior, tales como TMT.

Si bien TMT o CLT son productos muy atractivos desde el punto de vista del retorno al inversor y el valor agregado, son mercados en pleno crecimiento, pero que sería poco probable que absorbieran altos niveles de producción local. A modo de ejemplo, la oferta de TMT en Sudamérica es casi inexistente, y CLT se produce contra pedido en Brasil y Chile, con una planta en cada país, y presenta los desafíos de inserción en el mercado de un producto en desarrollo. Sin embargo, se trata de tecnologías disponibles que podrían adaptarse con relativa facilidad a las condiciones de Uruguay para agregar valor a la madera aserrada. Además, es probable que el

¹ Para 2020, 2030 y 2050 se considera la producción de madera aserrada estimada en el modelo más conservador presentado por Kallio et al. (2015).

² La situación a 2015 reportada por Gamache et al. (2017) y se expande hasta 2030 con una tasa de crecimiento anual de 9%, reportada por el proveedor de la tecnología más extendida, Thermowood (2018). Para 2050 se estima una expansión anual del volumen de producción de 5%.

³ Para CLT se considera el volumen de producción de Europa exclusivamente, $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$, y para MLE, el de Europa y Norteamérica, $2.45 \times 10^6 \text{ m}^3$ (FAO 2018). La producción de ambos productos se expande a 2030 por la tasa del escenario más conservador presentado por Hildebrandt et al. (2017) para CLT y MLE, 14% y 9%, respectivamente. Para 2050 se estima una expansión anual del volumen de producción de 5%.

⁴ Para LVL se reporta la producción estimada de Norteamérica en 2017, $2.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ (FAO 2018) y se expande a 2030 y 2050 con las tasas empleadas para MLE, ya que se trata de productos similares.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

mercado local uruguayo y regional puedan comenzar a demandar de forma creciente estos productos. CLT, MLE o TMT son productos que podría agregarse a la cartera de productos que actualmente tienen los aserraderos locales. En el caso de CLT o MLE la inversión por unidad de producto es baja, por lo que es factible que fabricantes locales tengan en cuenta esa alternativa como una forma de agregar a su producción. Sin bien LVL es también un producto atractivo desde el punto de vista del valor agregado y el EBIDTA, especialmente para pino, su fabricación requiere una escala mínima que supone mayor riesgo. Por lo tanto, los tres productos para la construcción con mayor potencial de desarrollo son CLT, MLE y TMT.

En cuanto a una escala temporal para el desarrollo de estos productos, probablemente primero ocurra una expansión de la producción de madera aserrada (2020-2030), y luego se incorporarán nuevas tecnologías para la fabricación de EWP y TMT (2025-2030).

2.2 Enumeración de tareas en un marco temporal

Se presentan una serie de tareas a realizar para promover el uso de madera como material constructivo. Esta hoja de ruta considera dos marcos temporales: inmediato, (1 a 2 años) y mediano plazo (5 años) (Tabla 3).

Tabla 3. Tareas para fomentar la fabricación de los productos para la construcción de mayor valor agregado

Nº	Tareas	Marco temporal	Agencias responsables
1	Desarrollo del mercado interno de productos de madera estructurales	Inmediato	Oficina de Planeamiento y Presupuesto Transforma Uruguay
2	Promover la instalación de fábricas de productos de ingeniería de la madera	Inmediato	Uruguay XXI Ministerio de Industria, Energía y Minería
3	Inclusión específica de productos de madera en proyectos de obra pública	Inmediato	Agencia Nacional de Vivienda Ministerio de Transporte y Obras Públicas
4	Promover la investigación en productos de madera para construcción	Inmediato	Agencia Nacional de Investigación e Innovación UTU
5	Promover la inclusión de carpinterías locales en la fabricación de productos de madera para la construcción	Mediano plazo	Oficina de Planeamiento y Presupuesto Transforma Uruguay

2.2.1 Desarrollo del mercado interno de productos de madera estructurales

El mercado interno para productos de madera para la construcción, estructurales o de carpintería, tiene el potencial de convertirse en una plaza interesante para la colocación de producto, a diferencia de lo que ocurre con otros productos de fabricación local, como la celulosa o el arroz, para los que el mercado local nunca podrá ser significativo. En Uruguay existe una

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

demanda insatisfecha de vivienda, y la productividad de la construcción es baja. Por lo tanto, la prefabricación con madera puede ser una alternativa para que permita paliar esta situación. Dado que el consumo de madera por habitante es marginal en Uruguay (aproximadamente 0.1 m³/año), el aumento de la construcción con madera podría expandir este consumo, generando una nueva área de desarrollo industrial.

- Actualizar normativas nacionales de construcción que limitan la utilización de madera como material estructural (ver Documento de Relevamiento Normativo)
- Promover el desarrollo de normativa local:
 - 1) fabricación de productos de ingeniería de la madera (ver Documento de Condiciones Técnicas de Construcción de Madera)
 - 2) para el cálculo estructural
- Creación de una oficina de promoción del uso de madera en la construcción
 - Contratar un equipo de marketing especializado
 - Trabajar en conjunto con Uruguay XXI
 - Vincular empresas locales con distribuidores.
- Promover la investigación aplicada en la fabricación y utilización de productos de ingeniería de la madera, creando un fondo sectorial especializado

2.2.2 Promover la instalación de fábricas de productos de ingeniería de la madera

A través de Uruguay XXI, generar vínculos con fabricantes de productos de ingeniería de la madera, presentando las características locales del sector: especies, disponibilidad de materia prima, comunicaciones, etc.

2.2.3 Inclusión específica de productos de madera en proyectos de obra pública

Promover el uso de madera en proyectos de obra pública, evaluando la posibilidad de incorporar criterios tipo “madera primero” o “compra verde”. De esta forma, la evaluación del proyecto mejoraría si éste incluye la utilización de madera. También se puede considerar en la evaluación la incorporación del impacto ambiental de los materiales, lo que implicaría la difusión del análisis del ciclo de vida.

2.2.4 Promover la investigación en productos de madera para construcción

Se recomienda crear un fondo de financiamiento competitivo con dos destinos:

1. Investigación académica en el uso de madera para la fabricación de productos para la construcción.
 - a. Diseño y cálculo de estructuras

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

- b. Fabricación de productos de madera para la construcción
- c. Análisis de ciclo de vida
2. Transferencia de tecnología para que constructores locales puedan capacitarse en la utilización de madera como material constructivo.

Ambas líneas estarán sujetas a la presentación de proyectos, y se propone valorar especialmente los abordajes innovadores que expandan el uso de la madera.

2.2.5 Promover la inclusión de carpinterías locales en la fabricación de productos de madera para la construcción

En Uruguay las carpinterías están orientadas a la fabricación de mueble a medida utilizando tableros de MDF como materia prima principal. Estas empresas cuentan con el conocimiento técnico como para fabricar productos de madera de segunda transformación para la construcción: paneles macizos, molduras, suelos, aberturas, escaleras, MLE, entre otros (Figura 2).

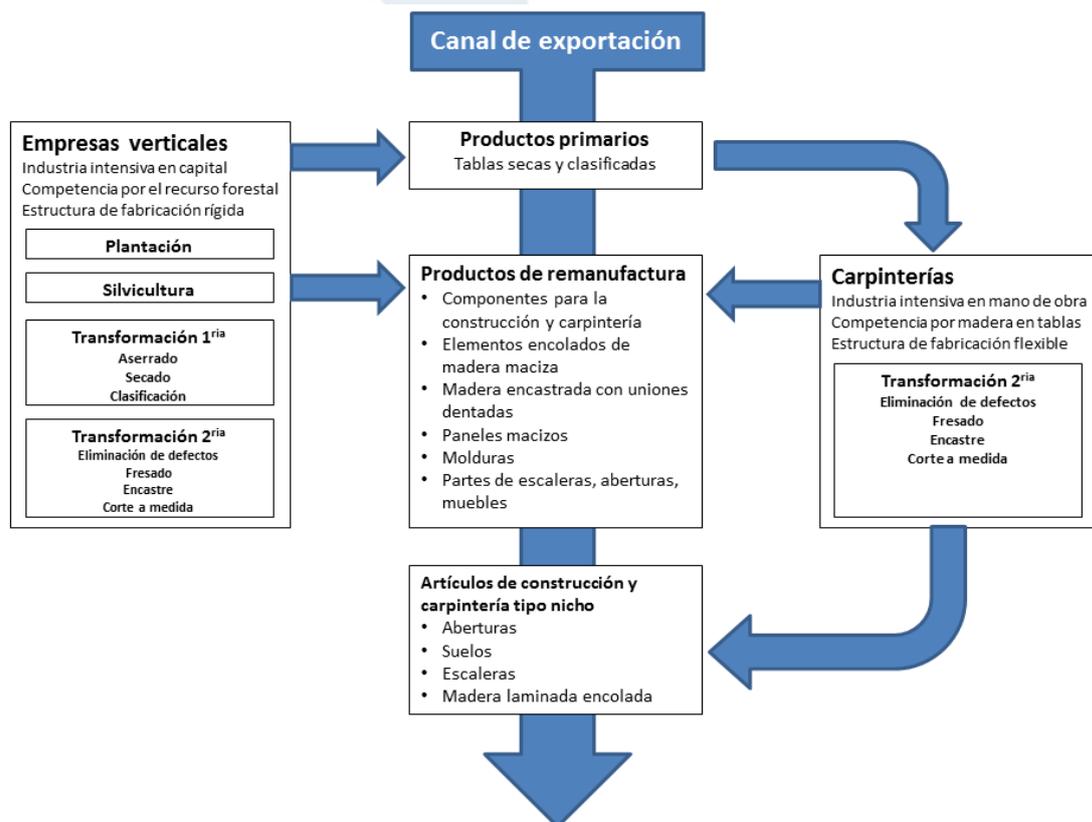


Figura 2. Inserción de las carpinterías como fabricantes de productos de 2da transformación de madera (Dieste 2015)

Se propone realizar tareas de acercamiento entre los fabricantes de productos de madera primarios (tablas, contrachapados) con carpinterías, buscando que éstas puedan incorporar

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

procesos que actualmente corresponden a plantas de remanufactura. En la medida que se desarrolle un mercado interno para la construcción con madera, las carpinterías locales verán una oportunidad de expandir su mercado.

2.3 Restricción del uso de CCA para la impregnación de madera y estudio de alternativas

En Uruguay la impregnación de la madera con una solución acuosa de sales de cobre, cromo y arsénico (CCA) es una tecnología extendida para la protección de madera, lo que no ocurre en la mayoría de los países que son grandes consumidores de madera; de hecho, se estima que una prohibición total es una cuestión de tiempo (Hill 2006). Se trata de un producto químico económico y altamente eficaz, que sin embargo presenta serios problemas ambientales para la disposición final de la madera impregnada. El reciclado de esta madera en otros productos no es una solución concluyente, ya que solamente posterga en el tiempo la incorporación de metales tóxicos al ambiente. La alternativa de inmovilización de residuos en piezas de concreto o mediante una dilución en tableros de partículas obliga a diseños complejos que hacen estas alternativas poco atractivas. Dado la alta concentración de metales tóxicos, la disposición final de madera impregnada con CCA debe hacerse en planificarse y ejecutarse, utilizando dos alternativas:

- 1) Disposición final en vertederos de seguridad, que cuenten con una membrana para impedir la liberación al ambiente de metales tóxicos
- 2) combustión controlada que incluya la definición de la mezcla admisible de madera tratada, nivel admisible de metales tóxicos en la ceniza y filtros para gases.

En Uruguay el uso de la tecnología de impregnación con CCA está ampliamente difundido y no tiene restricciones. Además, en Uruguay se somete a la madera de *Eucalyptus spp.* al tratamiento de impregnación con CCA, cuando está ampliamente reportado que solamente la albura es impregnable, y que el CCA es particularmente ineficiente cuando la madera a tratar es rica en taninos, como es el caso de la madera de *E. grandis* (Pizzi, Conradie, and Jansen 1986). En particular, el tratamiento con CCA de madera de frondosas, entre las que se encuentran los eucaliptos, está reportado desde el siglo pasado como poco efectivo contra la pudrición blanda (Pizzi 1983). En Uruguay, los postes impregnados se utilizan en contacto directo con el suelo, lo que permite el acceso de microorganismo al duramen no tratado, y, por consiguiente, se producen fallas estructurales que debilitan el poste y hacen necesaria su sustitución periódica.

Por lo tanto, es necesario restringir la utilización de CCA como alternativa para impregnar madera de pino, ya que, dada las características anatómicas de la madera de eucalipto, esta especie no debe ser considerada para impregnación. La utilización de CCA debería restringirse a aquellos usos donde las alternativas tecnológicas de protección de madera no cumplan con las especificaciones necesarias, y la madera tratada esté o no esté en contacto con personas o animales. Algunos ejemplos son estructuras en contacto permanente con agua y durmientes para trenes.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

En Uruguay existe un manual de buenas prácticas de utilización de CCA (Schreiber et al. 2007a, 2007b), aunque dado el bajo coste del CCA y su eficiencia como biocida, su correcta utilización no impide que ocurra el mayor problema con esta tecnología, que es la disposición final de la madera tratada con arsénico y cromo (Hill 2006). Las alternativas tecnológicas a la impregnación con CCA son abundantes y disponibles (Morrell 2017) (Tabla 4).

Tabla 4. Productos químicos alternativos al CCA para la impregnación en profundidad

Producto
Sistemas de cobre micronizado
Azoles de cobre
Óxido de cobre y amonio cuaternario (ACQ)
Cobre micronizado y tebuconazol

Los productos químicos disponibles para impregnación en profundidad que sean soluciones o suspensiones acuosas utilizan los mismos equipos (autoclave, bombas, tanques, etc.) que se emplean en la impregnación con CCA, por lo que las operaciones que estén funcionando en el país podrían sustituir el producto sin necesidad de grandes inversiones (Dieste 2014; Cabrera 2018).

Tabla 5. Tareas pendientes para restringir el impacto ambiental de la madera tratada con CCA.

Nº	Tareas	Marco temporal	Instituciones responsables
1	Promover la sustitución del CCA por otros productos químicos de menor impacto ambiental	Inmediato	Ministerio de Industria, Energía y Minería
2	Divulgar instrucciones de uso de madera tratada con CCA y los restos de obra dirigido a constructores y carpinteros	Inmediato	Ministerio de Industria, Energía y Minería Dirección Nacional de Medio Ambiente UTU
3	Diseñar y poner en práctica planes para la disposición final de madera tratada con CCA de acuerdo con la normativa ambiental vigente	Inmediato	Dirección Nacional de Medio Ambiente
4	Restringir el uso de madera tratada con CCA a usos que no estén en contacto con personas	Mediano plazo	Dirección Nacional de Medio Ambiente

2.4 Identificación de alternativas tecnológicas para los subproductos: chip, aserrín y corteza.

La alternativa tecnológica para los subproductos del aserrío de madera de eucalipto está definida, ya que las plantas de celulosa ya instaladas podrían potencialmente abastecerse de las corrientes residuales de fibra. El aserrín puede emplearse como combustible para que los aserraderos sean autosuficientes desde el punto de vista energético. La tecnología empleada para la cosecha forestal de eucalipto permite el descortezado en la plantación, por lo que la corteza se reincorpora al suelo, contribuyendo al balance de nutrientes. Existen alternativas tecnológicas

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

para la utilización de corteza de eucalipto como materia prima de paneles (Muñoz, Ballerini, and Gacitúa 2013; Feng et al. 2013), pero se requiere un precio del producto justifique retirar la corteza de las plantaciones.

En cuanto al pino, en Uruguay en la actualidad existe solamente la posibilidad de utilizar los subproductos como combustible para la producción de energía. Dado el precio que UTE ofrece por la electricidad generada a partir de biomasa, este mercado es poco atractivo. En un informe prospectivo a 2046 presentado por UTE en 2017, no figura la generación de energía eléctrica a partir de biomasa (Di Chiara et al. 2017). Además, el precio de este tipo de energía continuará descendiendo, producto de la oferta creciente de energía más barata, eólica o solar. Por lo tanto, es necesario desarrollar una industria local que consuma las corrientes secundarias de la transformación mecánica de pino, en particular el chip.

Dado el crecimiento sostenido de la demanda de papel de embalaje, la fibra larga tiene el potencial de transformarse en una materia prima apetecida tanto localmente como en los mercados regionales e internacionales. Asimismo, existe una tendencia global hacia políticas que disminuyan o racionalicen en el uso de plástico de origen petroquímico, especialmente mediante el aumento del reciclaje, debido al impacto que su liberalización al ambiente provoca en ecosistemas marinos, de agua dulce, suelo y la cadena alimentaria (Leal Filho et al. 2019; Su et al. 2018). Se advierte que esta situación puede provocar una expansión en la demanda de papel de embalaje (Cordeiro 2018). Sin embargo, esta situación depende de decisiones políticas, como la instauración de medidas para paliar la contaminación ambiental con plástico, que no son fácilmente predecibles. La oferta de pino en Uruguay permitiría una planta de tamaño medio, con una producción de 285×10^3 ton papel de embalaje, que consumiría toda la oferta de chip de pino; la producción podría incrementarse hasta 345×10^3 ton con la incorporación de 20% de madera de eucalipto (Costa et al. 2019).

La instalación de una planta de papel de embalaje en Uruguay permitiría dar destino al subproducto de la transformación mecánica de pino (chip), y también consumir la madera no aserrable, ya sea por bajo diámetro o por defectos (geometría no fusiforme, madera de compresión, árboles bifurcados, entre otros). La pregunta crítica que debe ser respondida es cuál es la oferta de madera de fibra larga en Uruguay. Utilizando la tecnología de imágenes digitales (Landsat), la Dirección General Forestal informa que en 2011 el área ocupada por pinos (*P. elliotti* y *P. taeda*) era 167,776 ha (DGF-MGAP 2012), mientras que en 2018 el área era 180,019 ha (DGF-MGAP 2019). Por lo tanto, en ese período hubo un crecimiento del área de aproximadamente 8%. Asimismo, la mayor parte de las plantaciones presentan más de 19 años, por lo que son árboles que se acercan a la madurez para su cosecha. Considerando estos puntos, es probable que el volumen disponible a 2030 supere los 3×10^6 m³, lo que haría más interesante la instalación en el país de una planta de papel de fibra larga. El tamaño de la planta hipotética, de aproximadamente 300×10^3 ton de papel de embalaje (Kraft *liner*), superaría el tamaño de las plantas regionales y, considerando datos de 2017, estaría entre más grandes productoras de pasta de fibra larga del mundo (Correa 2017).

En Uruguay el aserrín de pino podría ser utilizado como biomasa para satisfacer las necesidades energética de las plantas. Asimismo, se puede establecer una competencia si surge una planta de pellet, capaz de pagar más valor por la materia prima que su equivalente en energía. Finalmente,

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

la corteza de pino es un subproducto que se genera en las plantas de transformación primaria de madera, ya que allí se descortezan los rollizos. Este material se puede emplear como combustible, pero presenta problema de descenso del punto de fusión de las cenizas. Por lo tanto, la alternativa tecnológica que aparentemente generaría mayor valor agregado sería su uso como materia prima para la obtención de taninos para la fabricación de adhesivos (Gorrini 2018). Otro uso posible sería su compostaje para su utilización como sustrato hortícola.

Las tareas pendientes para esta hoja de ruta se concentran en la madera de pino, ya que, una expansión de la industria de aserrado de eucalipto y, por consiguiente, de la corriente principal, el chip sería potencialmente consumida por la industria de pasta de celulosa (BEKP) instalada en el país. De hecho, la existencia de esta industria se presenta como un antecedente favorable para la instalación de industrias de transformación mecánica que utilicen la madera de eucalipto como materia prima.

Tabla 6. Tareas para promover la instalación de industrias que utilicen subproductos de la industria de transformación mecánica de pino

Nº	Tareas	Marco temporal	Instituciones responsables
1	Investigar las propiedades pasteras y papeleras de la madera de pino local.	Inmediato	Agencia Nacional de Investigación e Innovación Ministerio de Industria, Energía y Minería
2	Realizar un estudio técnico-económico sobre la instalación en Uruguay de una planta de fabricación de papel de embalaje de fibra larga	Inmediato	Ministerio de Industria, Energía y Minería
3	Estudiar la oferta de materia de fibra larga disponible para la instalación de una industria de papel de embalaje. De ser necesario, estimar el déficit de madera disponible, y las posibles fuentes del material	Inmediato	Dirección General Forestal – Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
4	Investigar la extracción de compuestos fenólicos a partir de corteza de pino	Mediano plazo	Agencia Nacional de Investigación e Innovación
5	Realizar un estudio técnico-económico sobre fabricación de adhesivos para la industria de la madera a partir de la extracción de la corteza de pino local	Mediano plazo	Ministerio de Industria, Energía y Minería
6	Realizar un estudio técnico-económico sobre la obtención de compuestos fenólicos para la industria bioquímica a partir de la extracción de la corteza de pino local	Mediano plazo	Ministerio de Industria, Energía y Minería

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

2.5 Desarrollo de un modelo para la industrialización global de la madera de pino.

Se puede considerar que la situación de la industrialización de pino, con una oferta de trozas anual de 3×10^6 m³, genera un valor por ventas de productos de 334×10^6 USD (Tablas 7 y Figuras 3 y 4).

Tabla 7. Modelo de industrialización actual (2019) de madera de pino: volumen (m³) y valor de ventas (USD)

Producto	Producción anual (m ³ x10 ³)	Ventas producto (USDx10 ⁶)
Tablas	580	180
Tablero contrachapado	240	72
Trozas	1,600	64
Biomasa	456	9
		334

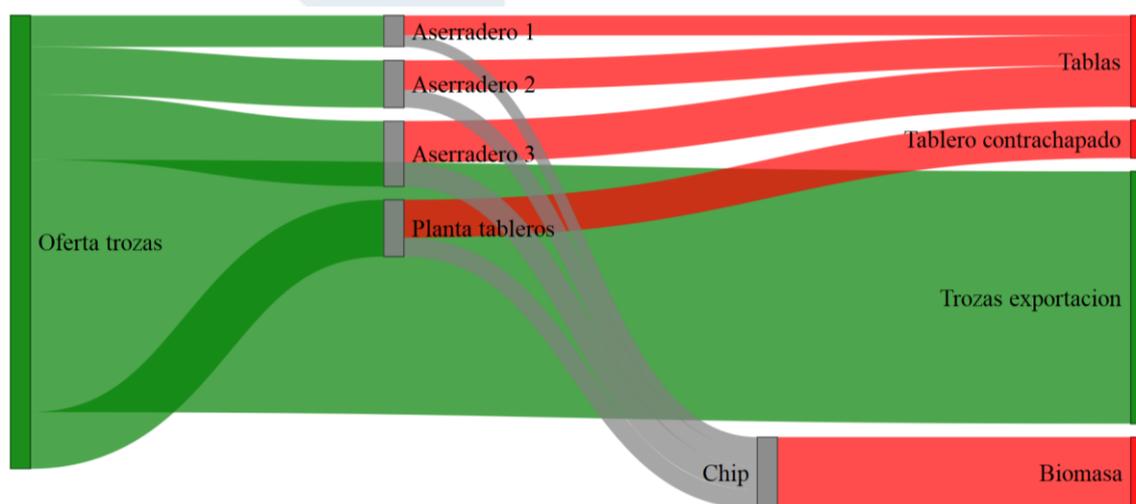


Figura 3. Modelo de industrialización actual (2019) de madera de pino: volumen (m³).

Un modelo de industrialización de madera de pino más sofisticado, manteniendo la oferta de trozas anual de 3×10^6 m³, podría generar un valor por ventas de productos de 700×10^6 USD. Los productos CLT y TMT se incorporarían a los aserraderos ya instalados, como forma de agregar valor a la producción y no como plantas independientes. El criterio de selección de productos fue maximizar el valor agregado. La planta de papel de fibra larga es la única opción estudiada capaz de consumir el chip generado por este modelo de industrialización, ya que otra alternativa, como una planta de tableros de MDF, representaría un volumen de producción difícil de colocar en el mercado (Tabla 8).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

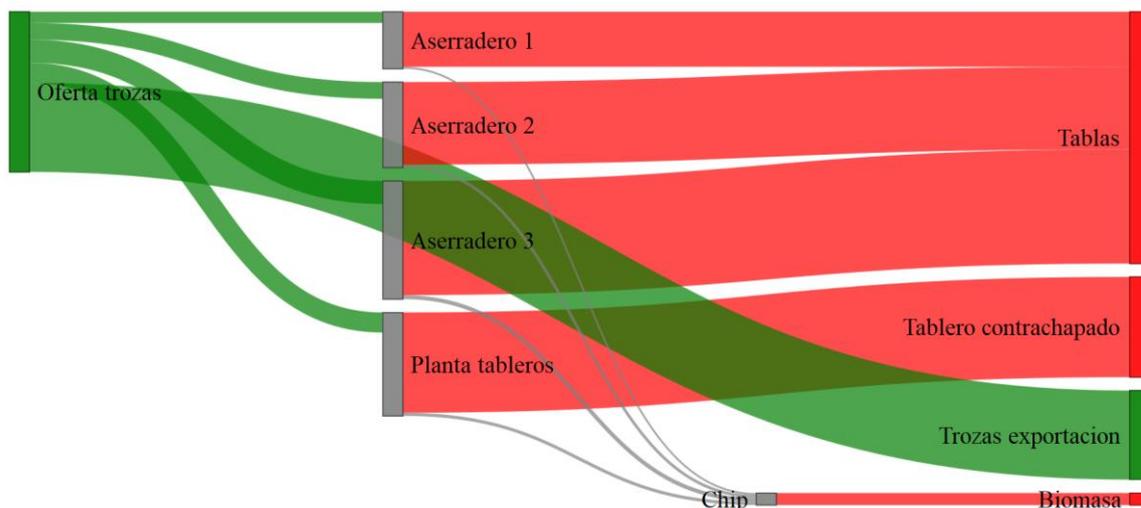


Figura 4. Modelo de industrialización actual de madera de pino: valor (USD).

Tabla 8. Modelo de industrialización 2019 de madera de pino: volumen (m³), excepto papel (t), y valor de ventas (USD)

Producto	Producción anual (m ³ x10 ³)	Ventas producto (USDx10 ⁶)
Tablas	930	290
LVL	80	34
Tablero contrachapado	240	80
CLT	60	57
TMT	60	48
Papel embalaje ¹	280	187
Trozas	1,600	4
		700

¹ Papel de embalaje en ton

A modo de ejercicio, se propone un modelo de integración de la industria de madera de pino en Uruguay. La materia prima para abastecer esta cadena sería 3x10⁶ m³. Las plantas consideradas son algunas ya existentes, a saber, dos aserraderos de producción mayor a 100x10³ m³ anuales, un tercero que es la suma de todos los demás en operación (2018), y una planta de fabricación de tableros contrachapados, y otro conjunto de industrias que no existen en el país, y para la que habría suficiente materia prima (Tabla 9).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Tabla 9. Abastecimiento de madera de pino a una hipotética cadena industrial

Producto de madera de pino	Volumen (m ³)
Oferta madera	2,785
Trozas pasta (descarte aserrío y raleos)	500
Trozas aserrío exportación	100
Aserradero 1	200
Aserradero 2	300
Aserradero 3	415
Aserradero 4	250
Aserradero 5	250
Aserradero 6	250
Planta LVL	160
Planta tablero contrachapado	360

Esta cadena abastecería con subproductos (chip y rollizos no aserrables) a una planta de papel *liner kraft* (fibra larga), que consumiría 1.3×10^6 ton de materia prima (Figura 5 y 6).



Figura 5. Modelo de industrialización 2030 de madera de pino: volumen (m³)

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

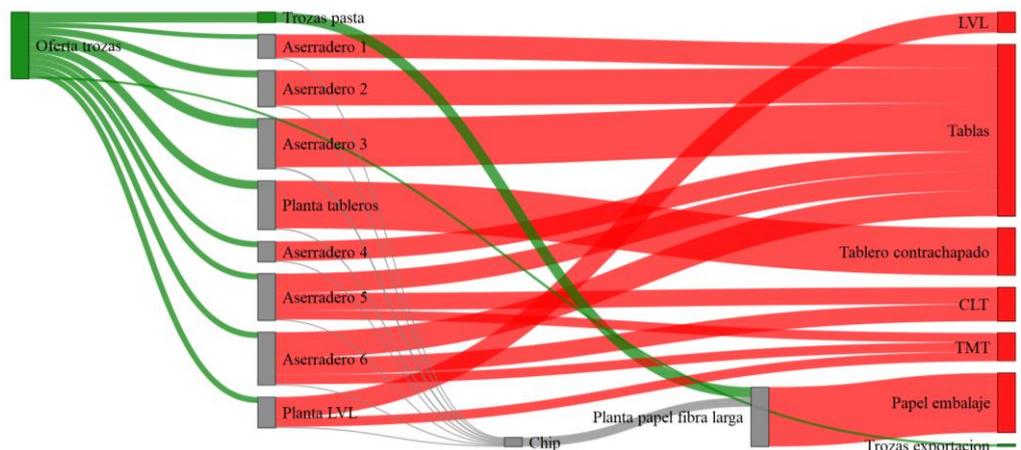


Figura 6. Modelo de industrialización 2030 de madera de pino: valor de ventas (USD)

Se presentan los resultados económicos de cada una de las nuevas plantas a instalar, sin considerar exoneraciones impositivas (Tabla 10).

Tabla 10. Análisis económico de las nuevas industrias a instalar

Producto	Troza aserrío (x10 ⁶ m ³)	Troza pulpa (x10 ⁶ m ³)	Chip (x10 ⁶ t)	Producción (x1000)	Precio (USD/un)	Ventas (x10 ⁶ USD)	Inversión (x10 ⁶ USD)	VA USD/un	TIR %
LVL	0.16			81.6	430	35	61	219	19
Mad. aserrada	0.25			59	312	62	109	394	18
CLT				30	953				
TMT				20	796				
Mad. aserrada	0.25			68	312	53	74	281	23
CLT				30	953				
Mad. aserrada	0.25			103	312	44	85	282	19
TMT				20	796				
Papel embalaje	0.20	0.3	0.78	280	670	187	383	197	9

Producción de todos los productos en volumen (m³), excepto papel de embalaje en masa (ton)

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

3 FBA 3: Transformación química de madera

3.1 Descripción con los productos de mayor potencial de crecimiento

3.1.1 Pulpa de disolución:

La pulpa de disolución, también llamada celulosa de disolución o pulpa soluble, es una pulpa química, blanqueada, que tiene un alto contenido de celulosa (> 90%). Tiene propiedades especiales como un alto grado de blanco, bajo amarillamiento y una distribución uniforme de peso molecular. Esta pulpa se fabrica para usos que requieren una alta pureza química y, en particular, un bajo contenido de hemicelulosas, ya que éstas pueden interferir con los procesos posteriores. La pulpa de disolución se llama así porque su destino final no es la producción de papel, sino que será disuelta en un solvente o en una solución homogénea, lo que la hace completamente accesible químicamente y elimina cualquier estructura fibrosa restante. Una vez disuelta, se puede hilar en fibras textiles (viscosa (rayon) o Lyocell), o puede reaccionar químicamente para producir otros productos químicos de alta pureza, como el triacetato de celulosa, un material similar al plástico que se usa para crear films (pantallas) o fibras, o éteres de celulosa como la metilcelulosa, que se usa como espesante. (Sixta 2006) Dada la mayor disolución de las hemicelulosas y lignina, el rendimiento del proceso de producción de pulpa de disolución está entre 35-40%, contra el 50-55% para la pulpa kraft de Eucalipto blanqueada (BKEP).



b) Dissolving pulp end use segments

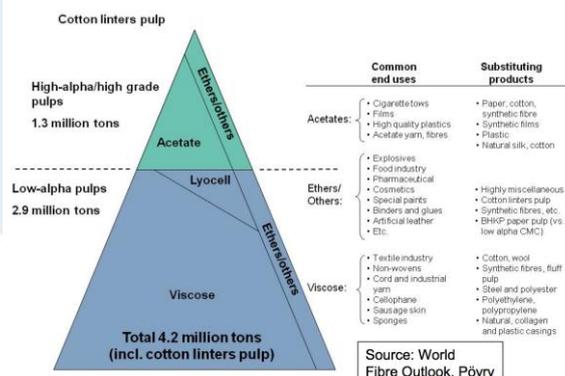


Figura 7: a) Izquierda: Pulpa de disolución Derecha: Producción de rayon en laboratorio
b) Usos de la pulpa de disolución (Flickinger, Lammi, and Ernerfeldt 2011)

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

La producción de pulpa de disolución se realiza mayoritariamente incorporando una etapa de pre-hidrólisis al proceso kraft, de manera de eliminar un alto porcentaje de las hemicelulosas presentes en la madera o mediante un proceso al sulfito ácido.(Flickinger, Lammi, and Ernerfeldt 2011; Chen et al. 2018)

Una alternativa recientemente propuesta para la producción de pulpa de disolución es, a partir de pulpa kraft de mercado, realizar un tratamiento final de extracción selectiva de las hemicelulosas mediante el uso de tratamientos caústicos. Aun no existen instalaciones comerciales que realicen este último procedimiento.(Arnoult_Jarriault et al. 2014)

Principales empresas de disolución de pulpa en todo el mundo:(ReportsnReports 2018)

- Bahia Specialty Cellulose (Bracell)
- Sappi
- Aditya Birla Group
- Lenzing
- Rayonier AM

Fabricantes de pulpa de disolución en América Latina:

- Bahia Specialty Cellulose – Brasil (485.000 ton/año)
- Jari Celulose – Brasil (200.000 ton/año)

Emprendimientos anunciados en América Latina

- Arauco – Celulosa Valdivia, Chile (550.000 ton/año).
- Lenzing – Brasil (450.000 ton/año)

La producción de pulpa de disolución constituye una alternativa a la producción de BEKP, con un mercado creciente asociado especialmente a la industria textil y también a los derivados químicos de la celulosa. El 79% de la producción mundial está destinada a la producción de Rayon y el resto a derivados químicos.

En este momento, el mercado es de 9.000.000 ton anuales, habiendo crecido casi 50 % en los últimos 15 años, tasa de crecimiento que entendemos se mantendrá en el futuro.(Sateri 2017; Suhonen and Oksanen 2016)

La diferencia de precios entre la pulpa de disolución y la pulpa de eucalipto blanqueada, oscila entre 100 y 200 USD/ton, que apenas cubre la diferencia de costo por menor rendimiento de producto final. Debido a esto, en general el aumento de producción se ha logrado mediante reformas de líneas de producción convencionales de BEKP que han quedado obsoletas dada su menor escala (Arauco Chile) o asociadas a biorrefinerías, para la producción conjunta de xilosa, lignina y derivados (Lenzing Brasil) Estos dos serían los proyectos en consideración actualmente en América Latina.

Como un importante consumidor global de la pulpa de disolución, el consumo aparente en China ha aumentado constantemente en los últimos años, y alcanzó 4.420.000 Ton en 2017, con un crecimiento de 4,2% interanual. Sin embargo, la tasa de utilización de la capacidad de la pulpa de disolución de China no es alta, con la producción real de 1.800.000 Ton/año, con lo que la tasa de dependencia de las importaciones es del 59,3%. En la actualidad hay alrededor de una docena

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

de fabricantes de pulpa de disolución en China, entre los que Sun Paper, Hunan Juntai y Asia Symbol poseen la mayor productividad alcanzando 500.000, 300.000 y 200.000 Ton/año respectivamente, ocupando juntos el 56,7% de la capacidad total.

Una de las materias primas competitivas ha experimentado una disminución significativa, la producción de linter de algodón bajo en China en los últimos 10 años de 1.000.000 ton anuales a 400.000.

3.1.2 Pulpa fluff

La pulpa fluff es un tipo de pulpa química generalmente de coníferas, similar a la pulpa kraft o al sulfito, donde se varía la última etapa de secado para generar un mayor volumen específico y capacidad de absorción de agua. Es más costosa de producir que la pulpa para papel de escritura debido a que requiere controles más estrictos de humedad e impurezas, y posee mayores gastos de embalaje, manipulación y transporte. (Sixta 2006)



Figura 8: Pulpa fluff

Las pulpas fluff se utilizan como materia prima en la producción de productos absorbentes para el cuidado personal, como pañales para bebés, productos de higiene femenina y productos para la incontinencia para adultos. Su demanda continúa con una tendencia de crecimiento constante, con precios ubicados en máximos históricos en el último año. El uso de estos productos ha crecido de manera constante impulsado por el aumento de los ingresos en el mundo en desarrollo. La demanda de pulpa fluff en los mercados emergentes se ha más que triplicado desde 2000, alcanzando los 3,7 millones de toneladas en 2017. (RISI 2018a)

La producción de pulpa fluff tradicionalmente ha estado dominada por EE.UU. principalmente debido a los bosques sureños de Pinos Ellioti, que es la fibra ideal para fabricar pulpa fluff debido a sus paredes inusualmente gruesas que dan mayor volumen, presenta mayores valores de absorción de agua, y una excelente integridad del producto final. ("Pulping Not for Paper" 2012)

El crecimiento de la demanda proviene de los grandes mercados emergentes, como Brasil y China. El estudio "Perspectiva para el Mercado Mundial de Pulpa Fluff 2018" pronostica que el crecimiento de la demanda de casi el 6% anual en el período 2018-2022, en comparación con el crecimiento del mercado de pulpa kraft del 1%. Aun así, los Estados Unidos representan el 84% de la capacidad de producción global total ya que los productores de este país todavía tienen ventajas importantes, en particular en cuanto al acceso a la madera y también mantienen relaciones sólidas con los grupos de productos de consumo global (CPG) que son los mayores compradores de pulpa fluff. (RISI 2018b) Sin embargo, los principales productores latinoamericanos de celulosa están trabajando para contrarrestar estas ventajas con inversiones en nuevas fábricas y tecnología, como la primera instalación brasileña que fabrica pulpa de fluff a partir de Eucalipto (Eucafluff de Suzano).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Si bien las pulpas fluff han sido normalmente fabricadas a partir de pulpa de conífera, cuando se fabrican con mezclas de pulpas de fibra larga (pino eliote) y de fibra corta (eucalipto), se aumenta la resistencia del producto.

En 2017, la capacidad de producción total mundial de pulpa fluff creció más rápidamente que la demanda, saltando un 8,4% respecto al año anterior. Sin embargo, los precios todavía se dispararon, destacando la gran cantidad de fuerzas que dan forma a este gran y creciente mercado de pulpas especiales.

En el caso de Uruguay, al no plantearse la producción de pulpa kraft blanqueada a partir de pino (BSKP), la producción de pulpa fluff convencional no se cree que sea posible. Una alternativa que puede ser posible es la producción de pulpa fluff a partir de pulpas de alto rendimiento de pino. Existen referencias bibliográficas de sustitución de BSKP con pulpa de alto rendimiento de pino en más del 80% con buenos resultados, pero no hay conocimiento de operaciones industriales.

3.1.3 Pulpa NSSC (neutral sulphite semichemical pulp)

Entre los procesos de fabricación de pulpa tradicionales, el proceso semiquímico de sulfito neutro (NSSC) sobrevive, manteniendo su importancia relativa. Este proceso produce pulpas no blanqueadas con un rendimiento de alrededor del 80% utilizando como materia prima maderas de fibra corta. Si bien el proceso NSSC generalmente se considera solo para la producción de papel onda (fluting) para la producción de cartones corrugados, la tendencia actual es usarlo también como un reemplazo parcial de pulpa kraft en paneles de revestimiento y bolsas. (Area et al. 2001) Los chips se impregnan con sulfito y carbonato de sodio a pH neutro, se cocinan durante 30 minutos a alrededor de 170-180 °C, son desfibrilados en un refinador, lavados y finalmente refinados para obtener una combinación óptima de resistencia y rigidez.

El proceso NSSC suele ser más flexible que el proceso Kraft. Presenta mayores rendimientos para una resistencia del papel similar. Para un mismo rendimiento, las pulpas NSSC se blanquean más fácilmente y requieren menos energía para ser refinadas. Sin embargo, en el proceso NSSC es necesario resolver un gran inconveniente: la recuperación de los productos químicos de los licores negros. En el pasado, los residuos gastados de NSSC se enviaban directamente a los efluentes, dada la mayor dificultad de recuperar químicos respecto al proceso kraf por la alta proporción de inorgánicos respecto a la materia orgánica. Una alternativa utilizada en la actualidad, es la producción de pulpa kraft y pulpa NSSC en un mismo ingenio, compartiendo el ciclo de recuperación (recuperación cruzada). Sin embargo, la incorporación de una nueva planta de pulpa NSSC a una planta kraft existente, puede limitar la producción de pulpa kraft para poder compartir el ciclo de recuperación.

3.1.4 Pulpa kraft de pino

Como se demostrara en un trabajo previo, la producción de pulpa kraft no blanqueada de pino, en una escala de 300.000 ton/año es una posibilidad para Uruguay, dada la disponibilidad de materia prima, lográndose una integración eficiente con las industrias de transformación mecánica. (Dieste et al. 2018b) El destino final de esta pulpa es la producción de papeles de embalaje (bolsas de papel) y la producción de kraftliners para la manufactura de cartón.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

3.1.5 Cartón corrugado

El cartón corrugado está constituido por dos tipos de papeles: las caras están formadas por papel liner, el que generalmente está producido a partir de una pulpa kraft de coníferas y entre ellas se ubica el papel onda o fluting, el que generalmente está fabricado a partir de pulpa NSSC. También se utiliza en la fabricación un importante porcentaje de fibras recicladas. La mayor parte de la producción de papel onda a partir de pasta NSSC se realiza en la misma operación de fabricar el cartón, que usualmente está ubicada cerca del mercado.



Figura 9: Cartón corrugado.

La configuración del papel fluting entre los dos papeles liners, confiere una gran resistencia al cartón, lo que lo hace el producto preferido a la hora de fabricar distintos tipos de embalajes.

Demanda:

El sector de los cartones corrugados es el más grande de todos los productos papeleros y de mayor crecimiento después del tissue. La demanda de cartón corrugado constituye más del 35% del total de producción de papel a nivel mundial y experimenta un crecimiento de 2 % anual, solo superado por tissue con 3 %.(Suhonen and Oksanen 2016)

Analizando a nivel mundial, existe equilibrio en la producción de celulosa kraft sin blanquear usada para fabricar el papel liner y otros productos de packing. Sin embargo, en el caso de América Latina, existe un déficit significativo en la producción de papel liner (1.7 millones de ton anuales), de acuerdo a datos de Poyry.

Se han proyectado dos instalaciones en América Latina para la producción de liner, uno en la provincia de Corrientes Argentina, con una capacidad proyectada de 600.000 ton anuales y otro realizado por la empresa Klabin en Ortigueira (estado de Paraná, Brasil) con una capacidad proyectada de 1.000.000 ton anuales. Ambos, de acuerdo a nuestro conocimiento sin decisión tomada.

De concretarse estos proyectos, el panorama en la región sería de equilibrio o ligero déficit. Sin embargo, estos números no tienen en cuenta la creciente demanda que se creará por la

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

prohibición de uso de bolsas de plástico, ya que hasta ahora el papel constituye uno de los pocos sustitutos posibles.

Oferta

Las plantas existentes en América Latina, tienen una edad promedio de 20 años, con un promedio de producción de 190.000 ton anuales por línea. Como se mencionó, existen en consideración dos proyectos más por un total de 1.600.000 ton/año. A nivel mundial, la edad promedio de las instalaciones es de 24 años y con un promedio de producción de 410.000 ton/año.

Estos datos indican que ha no habido construcción de nuevas plantas de NBSKP en los últimos años, sino que solo se han dado reformas para aumentar la producción, situación que debería cambiar dado el dinamismo previsto del sector.

En un trabajo reciente realizado en Facultad de Ingeniería, se llegó a la conclusión de que es factible una planta de 370000 ton por año de papel liner de acuerdo a la disponibilidad de madera actual.⁵

El costo previsto para la para la operación de 360 USD por ton, lo ubica en una posición muy competitiva, basada en el costo de la materia prima así como en la previsión de gastos de logística comparada con otras operaciones. Esto último mencionado, dando por hecho la construcción de la nueva línea de UPM, en la misma zona y los trabajos previstos en la vía férrea a Montevideo así como en la red de carreteras.

Con referencia a la escala de operación, si bien en el caso de BSKP, se considera que las líneas nuevas deberían ser de 1.000.000 ton anuales para ser viable, para las plantas que no blanquean, la capacidad mínima es mucho menor. De hecho, la línea propuesta de 370.000 ton/año estaría entre las 20 más grandes del mundo.

Con referencia al impacto ambiental de las plantas NBSKP, dada la no existencia de procesos de blanqueo, el consumo de agua y los efluentes generados por la instalación son mucho más bajos que en el caso de plantas de pulpa blanqueada. Esto permitiría una concesión de permisos más sencilla que en el caso de plantas de celulosa blanqueada.

Como se mencionó, el papel onda es fabricado con madera de fibra corta, compitiendo entonces con las operaciones de BEKP en Uruguay. En el caso de instalarse una tercera planta de celulosa, existirá equilibrio o ligero déficit de madera (Faroppa 2017) lo que aumentaría los costos de la materia prima. En el caso de instalarse una línea de producción de pulpa NSSC, debería estar integrada a una de las plantas de producción kraft, permitiendo el "cross recovery" mencionado anteriormente de modo de bajar significativamente el costo de inversión.

Otra alternativa para la madera de pino, sería un proceso de alto rendimiento. La economía de estos procesos permite operaciones de menor escala e inversión unitaria. En el caso de pastas de

⁵ Universidad de la República, Facultad de Ingeniería. Proyecto Industrial. Material no publicado aún.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

alto rendimiento de fibra larga, su uso es predominante en cartón, aportando mayor volumen específico, mejorando las características de un producto fabricado con papel reciclado.

3.2 Análisis de las fortalezas y debilidades de Uruguay como productor de dichos productos

Se presentará luego en el punto 5, ya que el análisis FODA para nuevos productos de fibras o para productos de biorefinerías es muy similar y se analizará en conjunto.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

4 FBA 4: Biorrefinerías

4.1 Introducción

Existen varias definiciones del término biorrefinería y clasificaciones de éstas de acuerdo a los materiales de partida o tecnologías asociadas, por lo que comenzaremos esta sección con una somera descripción de estas. Una biorrefinería es una instalación (o red de instalaciones) que integra procesos y equipos de conversión de biomasa y que abarca una amplia gama de tecnologías capaces de separar los recursos de biomasa (madera, pastos, residuos agrícolas, etc.) en sus componentes principales (carbohidratos, proteínas, lignina, etc.) para convertirlos en energía, productos de valor agregado, biocombustibles y productos químicos. Este concepto es análogo a la refinería de petróleo, las cuales hoy producen múltiples combustibles y productos a partir del petróleo con la utilización de diversas tecnologías (Cherubini, 2010). El gran número de materias primas de biomasa que se pueden utilizar combinadas con las numerosas vías posibles conduce a un gran espectro de productos a obtener, como se muestra en la Figura 10.

De acuerdo a IEA Bioenergy (IEA Bioenergy, 2014) se pueden distinguir las biorrefinerías orientadas a la producción de energía (o por biocombustible) y las orientadas a producto. En las primeras, el objetivo principal es a partir de la biomasa, producir grandes cantidades de energía (o biocombustibles) de valor agregado relativamente bajo. En las biorrefinerías orientadas a productos, la biomasa se fracciona en una cartera de productos de base biológica con un valor agregado mayor y beneficios ambientales generales, después de lo cual, los residuos del proceso se utilizan para la producción de energía y / o calor, utilizándose internamente y / o se venden a los sistemas eléctricos nacionales (Ferreira, 2017).

Otra clasificación muy utilizada es la realizada por Kamm et al. (Kamm and Kamm, 2004; Kamm, Gruber and Kamm, 2010) donde se definen las biorrefinerías por el tipo de biomasa utilizada: biorrefinería de cultivos completos (toda la planta cosechada con fines alimentarios y no alimentarios, ejemplo: maíz, trigo), biorrefinería verde (p. ej., Pastos y otras biomásas verdes como materia prima), biorrefinería lignocelulósica (basada en la silvicultura). Otra clasificación que usan los autores es por los principales tipos de tecnología involucrados (por ejemplo, la plataforma de azúcar y la plataforma termoquímica) (Figura 11). Estas clasificaciones tiene varias limitaciones, por ejemplo, no considera el concepto de biorrefinerías multiplataforma ni la existencia de biorrefinerías actuales basadas en algas (Gírio *et al.*, 2017).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

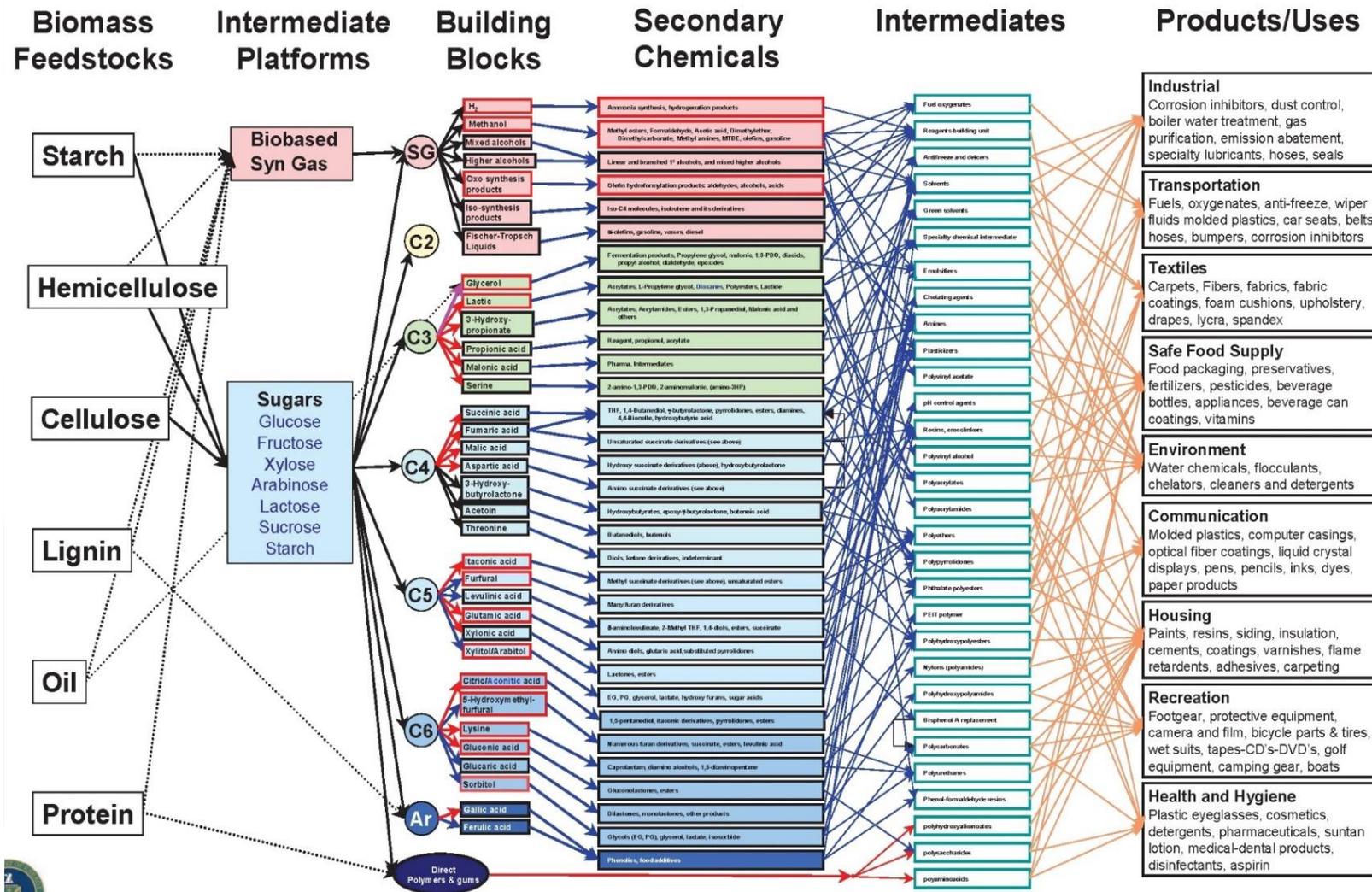


Figura 10. Ejemplo de diagrama de flujo de productos a partir de biomasa. Tomado de (McMillan, 2004).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

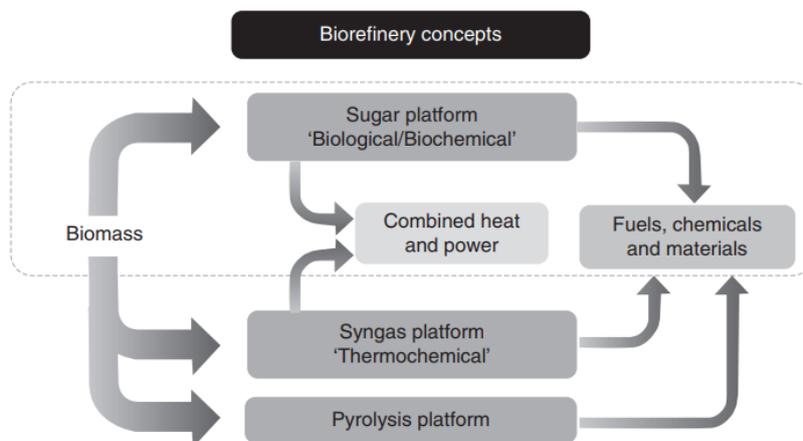


Figura 11. Descripción general del concepto de biorrefinerías de acuerdo con el NREL (National Renewable Energy Laboratory) de los Estados Unidos. Tomado de (Mcmillan, 2004).

Asimismo, se pueden clasificar las biorrefinerías en primera (también llamadas biorrefinerías convencionales), segunda y tercera generación.

Las biorrefinerías de primera generación se basan en la utilización directa de formas clásicas de biomasa agrícola, pero que también tienen usos como alimentos o para alimentación animal. Por ejemplo, en la tabla se muestran algunos ejemplos de producción de biocombustibles a partir de cultivos agrícolas que utilizan procesos de biorrefinería de primera generación. Este tipo de biorrefinería existe en muchos países, incluido Uruguay. Se caracterizan por utilizar una fracción de la materia prima como insumo y utilizan tecnologías maduras (Ragauskas *et al.*, 2006; Kamm, Gruber and Kamm, 2010; Gírio *et al.*, 2017; Legros *et al.*, no date).

Tabla 11. Ejemplos de tipos de biorrefinerías de primera generación

Materia prima	Tipo de proceso	Producto	Sub-productos
Azúcares (caña de azúcar, remolacha azucarera, maíz, sorgo dulce, etc.)	Fermentación	Bioetanol (1G)	Otros
Aceites vegetales (colza, girasol, soja, etc.)	Transesterificación	Biodiesel (1G)	Glicerol
Madera	Químico	Pulpa y/o papel	Licor negro, tall oil, trementina, energía

Las biorrefinerías de segunda generación utilizan biomasa lignocelulósicas (maderas, pastos, residuos agrícolas) como materias primas. Este tipo de biomasa está más disponible y distribuida globalmente que las de primera generación y no se usan directamente como alimento, aunque algunas se pueden utilizar para alimentación animal (Kamm, Gruber and Kamm, 2010; Hughes *et al.*, 2013). Este tipo de biorrefinerías es el que nos centraremos en más detalle en el resto del documento.

Las biorrefinerías de tercera generación son biorrefinerías más avanzadas, de las cuales aún no existen ejemplos a escala comercial, que pueden utilizar biomasa agrícola, forestal o residuos urbanos, para producir múltiples productos en procesos diversos (Legros *et al.*, no date; Kamm, Gruber and Kamm, 2010). La Figura 12 muestra un ejemplo de biorrefinería de 3^{era} generación.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

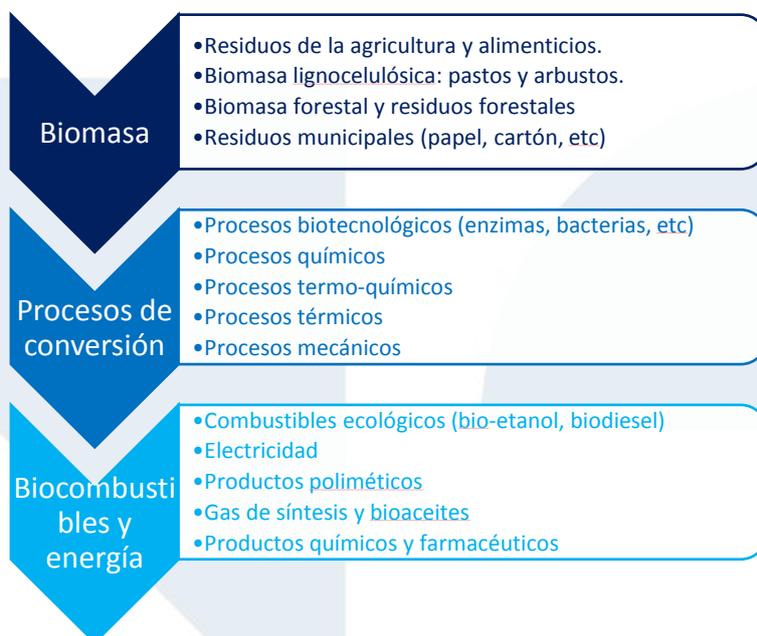


Figura 12. Principio de una biorrefinería de tercera generación. Tomado de (Kamm, Gruber and Kamm, 2010).

IEA Bioenergy Task 42 (IEA Bioenergy, 2014) ha desarrollado un esquema de clasificación para describir diferentes biorrefinerías. La clasificación consta de las siguientes características: plataformas, productos, materias primas y procesos. Con la combinación de estas características, diferentes configuraciones de biorrefinería se pueden describir y nombrar en una de manera consistente. En la Figura 13 se muestra la clasificación.

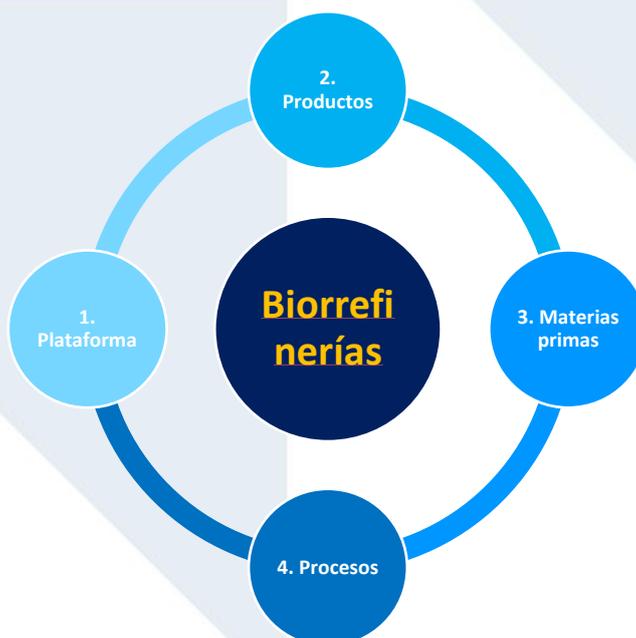


Figura 13. Esquema de clasificación de biorrefinerías según IEA Bioenergy (Tomado de (IEA Bioenergy, 2014))

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

El desarrollo de las biorrefinerías de segunda y tercera generación tienen dos objetivos estratégicos: el desplazamiento del petróleo importado en lugar de materias primas nacionales renovables (un objetivo energético) y el establecimiento de una industria robusta de base biológica (un objetivo económico) (Bozell and Petersen, 2010). El objetivo energético se aborda por el esfuerzo en la producción de etanol, biodiesel y biocombustibles avanzados (butanol, biodiesel de algas, etc.). Pero a pesar de su alto volumen, el combustible es un producto de bajo valor. Como resultado, el retorno de la inversión en operaciones de biocombustible sólo representa una barrera importante para alcanzar la meta económica de la biorrefinería. Internacionalmente, la infraestructura de la cadena de valor completa existe, sin embargo, su rentabilidad sigue siendo cuestionable, lo que requiere un importante apoyo financiero del gobierno o un mercado regulado para garantizar el despliegue del mercado a gran escala. (Bozell and Petersen, 2010; IEA Bioenergy, 2014). Los productos químicos de alto valor y menor volumen proporcionan este incentivo.

Otros objetivos asociados, no menos importantes son la menor dependencia de la cadena de suministro de productos petroquímicos; la creación de puestos de trabajo, incluidas áreas rurales que ofrecen logística adecuada; la valorización de residuos, principalmente los residuos agrícolas y forestales y la disminución del calentamiento global por la realización de operaciones ambientalmente sostenibles (Vertès, 2014).

En la actualidad, hay pocos ejemplos comerciales de biorrefinerías basadas en productos y los ejemplos de biorrefinerías basadas en biocombustibles de segunda generación trata de emprendimientos no consolidados. Las principales razones para esto son (IEA Bioenergy, 2014; IEA Bioenergy Task42, 2018):

- algunas de las tecnologías clave (fraccionamiento y separación de productos) que forman parte de las plantas de biorrefinería integradas aún no están lo suficientemente maduras para la implementación a escala comercial
- todavía no existen reglas claras para el uso sostenible de la biomasa para aplicaciones alimentarias y no alimentarias
- los sectores del mercado que deberían cooperar (alimentos, insumos para alimentación animal, agroindustria, química, energía, combustibles, logística) para el desarrollo y comercialización de cadenas de valor de biomasa totalmente sostenibles, incluidos los procesos de biorrefinería de alta eficiencia, a menudo todavía no funcionan juntos
- hay falta de conocimiento / experiencia sobre las ventajas de los procesos de biorrefinería para el uso óptimo de biomasa sostenible a nivel industrial, de PYME y gubernamental. Mejorar la comunicación / colaboración entre diferentes actores de diferentes sectores industriales es primordial para atravesar la instancia actual.

Globalmente, de acuerdo a la IEA Bioenergy (IEA Bioenergy Task42, 2018), los principales desafíos aún por enfrentar son:

- desarrollar la legitimidad de esta industria y el uso sostenible de la biomasa
- participación multisectorial de partes interesadas en el desarrollo de cadenas de valor sostenibles
- desarrollo de tecnología y escalado de la biorrefinería utilizando las mejores prácticas

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

- desarrollo del capital humano necesario capacitando a estudiantes y otros interesados para que se conviertan en los expertos en biorrefinería.

De acuerdo al “World Economical Forum” (King, Inderwildi and Williams, 2010), otro desafío importante es establecer la infraestructura necesaria (cadena de suministro y logística de distribución) y alcanzar los altos costos de capital requeridos. Estos últimos suelen estar fuera del alcance financiero de las empresas privadas individuales y, por lo tanto, pueden requerir financiamiento público. El desarrollo de la bioeconomía se encuentra en una etapa temprana y de alto riesgo, y ninguna industria o empresa es capaz de gestionar esta fase de su desarrollo de forma independiente. Por lo tanto, los gobiernos tienen un papel clave que desempeñar en el suministro de apoyo “semilla” a las biorrefinerías, especialmente en la etapa precompetitiva, y la creación de mercados para garantizar que las mismas se establezcan y tenga éxito. Los gobiernos interesados en respaldar las biorrefinerías por razones de protección del medio ambiente, seguridad energética y liderazgo de innovación deben respaldar inversiones significativas en tecnología de I + D creando mercados y regulando cuidadosamente el proceso de industrialización para atraer inversiones del sector privado y, al mismo tiempo, minimizar los efectos adversos sobre el medio ambiente (King, Inderwildi and Williams, 2010).

4.2 Análisis de la producción a escala piloto-comercial actual y del pasado reciente (últimos 10 años) a nivel internacional (productos, tecnología, empresas)

En este ítem se presenta un listado de empresas y emprendimientos que han desarrollado biorrefinerías de segunda generación (orientadas a biocombustibles y/o productos) en la última década a escalas cuasi comerciales o comerciales. La Tabla 13 muestra los principales productores de lignina a escala comercial y piloto. El listado de proyectos demostrativos de baja escala es muy grande, por lo que no se incluye.

En muchos casos, si los productos de base biológica son económicamente competitivos podrían superar fácilmente sus alternativas basadas en petróleo y expandirse a nuevos mercados. Sin embargo, la barrera más significativa actualmente está dada por los costos de producción con las tecnologías actuales, en competencia con los productos consolidados y en una coyuntura de precios de petróleo relativamente bajos.

La Tabla 14 muestra el mercado actual de varios de los productos mencionados y el porcentaje de participación en el mercado de los producidos a través de biomasa y en caso de existir, de sus contrapartes a partir de petróleo. Los datos son tomados de Bioways (BIOWAYS, 2017).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Tabla 12. Instalaciones de producción de biocombustibles y productos a partir de biomasa lignocelulósica más relevantes existentes en el mundo.

Producto(s)	Empresa	Materia prima	Start-up y situación actual	Tamaño	Partnership	Ubicación	web
Etanol celulósico, azúcares (a partir de materiales celulósicos (melazas), nanocelulosa)	American Process Inc.	residuos de madera o agrícolas	2013-2015 y reabierta en 2017	2013-2015 Planta demostrativa pre-comercial (945.000 gal/año de bioetanol standard y 700.000 gpa de acetato de potasio (50 th%)). 2017. Actualmente produciendo melazas para aglutinante de alimentos animales y comenzando la producción de xilosa	Joint Venture: GranBio y TRLLC	Alpena MI, USA	https://alpenabiorefinery.com/
Etanol y metanol celulósico	Enerkem Alberta Biofuels LP.	Postes de teléfono retirados y residuos sólidos municipales clasificados.	Comenzando producción	100.000 toneladas de materia prima. 38 millones de litros /año		Edmonton, Canadá	https://enerkem.com/facilities/enerkem-alberta-biofuels/
Etanol celulósico	ICM Biofuels	Rastrojos de maíz	2007	Planta piloto		St. Joseph, MO, USA	www.icmbiofuels.com
Etanol celulósico	ICM Element	Residuos de madera	1er semestre 2019	5 millones galones/año		Colwich KS, USA	http://www.icminc.com/icm-media/whats-new-at-icm.html?start=8
Etanol celulósico,y energía	POET Proyecto "LIBERTY"	residuos de maíz (mazorcas, hojas, cáscara y algunos tallos)	set-14	20 millones de galones de etanol/año- Capacidad de 25 millones de galones de etanol/año	POET-DSM Advanced Biofuels	Emmetsburg,IA, USA	http://poet-dsm.com/resources/docs/POET-DSM-Brochure.pdf
Etanol celulósico	PRAJ MATRIX	residuos de maíz (mazorcas y restos de maíz, bagazo de caña paja de arroz tallos de algodón.		Planta demostrativa. 12 toneladas de biomasa (seca)/día	Praj y Gevo, Inc. En setiembre 2016, Indian Oil Corporation Ltd. eligió Praj como socio tecnológico para escalar el proyecto	Molino azucarero cerca de Pune, India	https://www.b2match.eu/system/sahyog/files/T2_Pramod..pdf?1383144284
Etanol celulósico y lignina	Blue Sugars	Bagazo de caña	Enero 2008. 2013 se declara en quiebra.	4500 t/año	Inicia KL Process Design Group. En 2010 Grupo Petrobras de Brasil ingresa al proyecto.		
Etanol celulósico y energía	Grandbio	Bagazo de caña	Construida a partir de 2013.	Capacidad construida: 65.000 ton/año de etanol y 50 MW de energía. Sin alcanzar producción nominal.		Alagoas, Brasil	http://www.granbio.com.br/contenidos/biocombustiveis/
Etanol celulósico y electricidad	Raízen Energia Participações S.A.	Bagazo de caña y paja	2015	Capacidad construida: 32.000ton/año etanol (a	Cosan y Shell,	Piracicaba, S. Paulo, Brasil	https://www.raizen.com.br/pt/energia-do-futuro-tecnologia-em-

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

				2018 produjo 12.000ton/año)			energia-renovavel/etanol-de-segunda-geracao
Etanol, melazas C5 (13,900 t/año), y pellets de lignina (11,400 t/año)	Inbicon (DONG Energy)	Paja, rastrojos de maíz y bagazo	2009	Demostrativa. (4300 t/año etanol, 13900 ton/año melazas de C5, 11400ton/año pellets lignina		Kalundborg, Dinamarca	http://www.inbicon.com/
Etanol celulósico, lignina, turpentina, biogas	Cellunolix®	Aserrín de pino	2017	Capacidad (aún no alcanzada): 10 ML bioetanol/año, 15 000 ton lignina (post hidrolisis enzimática)/año,	St1	Kajaani, Finlandia	https://www.st1.eu/about-st1/company-information/areas-operations/advanced-fuels-waste
Gas natural renovable (RNG) para transporte, etanol celulósico	DuPont Cellulosic Ethanol	rastrojos de maíz	Oct 2015- En Oct 2017 se puso en venta. Actualmente se está traspasando a Verbio Vereinigte BioEnergie AG (Alemania) para producir RNG	Capacidad: 30MGal etanol por año (mayor capacidad al momento)	Dupont	Nevada, Iowa, USA	http://ib-promo.dupont.com/reformenergy/ http://biomassmagazine.com/articles/15743/verbio-to-buy-dupont-cellulosic-ethanol-plant-convert-it-to-rng
Etanol celulósico	Clariant Sunliquid	Paja de trigo y de otros cereales	2009 planta piloto en Munich, julio 2012 planta piloto en Straubing. Planta comercial en construcción en Rumania	Planta piloto en Straubing de 1000 ton/año. Planta en construcción: 50 000 ton/año	Clariant (antes Süd-Chemie)	Craiova, Rumania	http://www.sunliquid.com/
Etanol celulósico, lignina (para energía), biogás	Crescentino	Cultivos lignocelulósicos (paja de arroz, paja de trigo y de Arundo Donax)	2013 No operativa actualmente	40,000 t/año etanol	Beta Renewables (joint venture con Mossi Ghisolfi Group), concordato en 2017. Comprada por Versalis (Grupo Eni).		
Aceite de pirólisis, gas de síntesis, electricidad y calor	Bioliq	Paja seca, madera	2008	500 kg/h de alimentación	Karlsruhe Institute of Technology (KIT)	Karlsruhe, Baden-Württemberg. Suecia	http://www.bioliq.de/english/24.php
Etanol celulósico y energía	INEOS New Planet BioEnergy	Residuos forestales y vegetales	2012	24kton/año etanol		Florida, USA	www.ineosbio.com
Aceite de pirólisis, electricidad y calor	BTG bioliquids	Residuos de madera	2015	5 t/h de alimentación	Empyro BV (BTG Bioliquids BV y Tree Power)	Hengelo, Holanda, (planta de Akzo Nobel)	www.btgworld.com ; www.btg-btl.com
Aceite de pirólisis, biochar	BDI bioCRACK	chips de madera, residuos forestales	2014	Planta piloto integrada a refinería de petróleo de OMV- 500 tons de biocombustible/año	Cooperación con la compañía linera austriaca OMV	Viena, Austria	https://www.bdi-bioenergy.com/en/technologies-solutions/bdi-biocrack

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Azúcares celulósicos, lignina	RENMATIX Integrated Plantrose Complex(IPC)	Chips de madera, residuos agrícolas, cultivos energéticos, residuos sólidos municipales clasificados.	Abril 2015			Kennesaw GA, USA	http://renmatix.com/products/products-list/industrial
(Bioverno) biodiesel y nafta	UPM Biofuels	Tall Oil de pulpeo Kraft de pino	Enero 2015	120 million litros/y	UPM	Lappeenranta, Finland	www.upmbiofuels.com
Benceno, tolueno y xileno (BTX)	Anellotech	madera, rastrojos de maíz, bagazo de caña y otros residuos agrícolas	2018	Escala piloto		Pearl River, NY, USA	https://www.anellotech.com/
Pulpa de celulosa especial, vainillina, bioetanol y fibras de celulosa	Borregard	madera (Picea)	Pulpa 1900, etanol desde 1938. Lignina, vainillina desde 2009 (demo)	Etanol 110 ton/año o melasas de C5/C6 (220 ton/año). Lignina 200ton/año		Sarpsborg, Noruega	https://www.borregaard.com/
Proteína para alimentación animal	Arbiom	residuos de madera	2017	Piloto	OptaFuel US, Inc. y Biométhodes, SA	Evry, France - Durham, NC, USA	https://arbiom.com/
Furanos, para la producción de poliéster renovable YXY, similar al PET	Avantium's Renewable Chemistries	Azúcares C6 y C5 de biomasa no alimentaria	Diciembre 2011	Piloto- Capacidad de 20-40 ton/y	Avantium, NatureWorks	Geleen, Holanda	https://www.avantium.com/renewable-chemistries/
1,4-Butanediol	Novamont/ Genomatica	Azúcares de dextrosa y azúcares de biomasa celulósica	2016	30000 ton/año. Licencia a BASF para producir 75,000 tons/año	BASF and Genomatica	Adria, Italia	https://www.genomatica.com/products/
Ácido levulínico	GF Biochemicals	biomasa celulósica	2015	1400 ton/año, 10000 ton/año desde 2017		Caserta, Italia.	http://www.gfbiochemicals.com/company/
n-butanol, acetona, isopropanol	Green Biologics, Ltd.	maíz		30,000 ton/año	Sofinnova Partners, Swire Pacific Limited, Capricorn Venture Partners, Tennenbaum Capital Partners (TCP), Oxford Capital Partners, ConVergInce Holdings, Carbon Trust y Morningside Group. En 2014, GBL recibió una subvención de \$ 500,000 del Departamento de Agricultura de Minnesota para apoyar la ingeniería para reconvertir una planta de etanol en Little Falls, MN	Little Falls, MN, USA	https://greenbiologics.com/

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

etanol, 2,3-butanediol, 1,3-butadieno, ácido acético, isopropanol y isobutileno.	LanzaTech	Gas de síntesis de biomasa (incluidos los RSU), gases residuales industriales, biogás	2008	Blue Scope - Planta Piloto de Nueva Zelanda (15,000 gal / año). 2012-BaoSteel China Pre-comercial (100,000 gal / año). 2013 Shougang China Pre-comercial (100,000 gal / año). 2018-20 Comercial 4X (10 - 30M gal / año), en construcción	Liderada por Mitsui & Co., en 2014 incluyó nuevos inversores: Fondo de jubilación de Nueva Zelanda, Siemens Venture Capital, CICC Growth Capital Fund I, L.P. y Khosla Ventures, Qiming Venture Partners, K1W1 y el Fondo de Capital de Ciencias de la Vida de Malasia		http://www.lanzatech.com
Xilitol, propilenglicol y etilenglicol	S2G BioChem	Madera y residuos agrícolas y forestales	sin arrancar, cambio de dueños	2,000 MT/año xilitol	Subsidiaria de Fortress Global Enterprises Inc.	Sarnia, Ontario Canadá	https://www.newswire.ca/news-releases/fortress-global-enterprises-provides-update-to-acquisition-of-s2g-biochemicals-inc-and-new-xylitol-project-677345033.html
Jarabe de Xilosa	Stora Enso-Raceland B2X	bagazo de caña	2016 obras	Planta demostrativa 5000 ton/año	2014 Stora Enso adquirió la planta de Virdia	Raceland , LA, USA	https://www.storaenso.com/en/about-stora-enso/stora-enso-locations/raceland
Metanol/ dimetileter	Chemrec	licor negro de pulpeo al sulfito	Nov 2011. Cerró en Abril 2016	4ton/día	Smurfit Kappa- Chemrec	Piteå, Sweden	http://www.etipbioenergy.eu/images/160621_Landalv.pdf
Pulpa de celulosa especial, etanol, lignina	Domsjo	Maderas de fibra larga, pulpeo al sulfito	1903 celulosa (papel), 1995 etanol, 2005 lignina	230.000 tons/año celulosa, 120.000 tons/año lignina y 20.000ton/año etanol	Lignina: MoRe Research y Domsjö Fabriker. Domsjo es parte de Aditya Birla Group, quien es el mayor productor mundial de viscosa.	Örnsköldsvik, Suecia	http://www.domsjo.adityabirla.com/en/Sidor/Startpage.aspx
Furfural	Central Romana Corporation	bagazo de caña	1955, ampliación en 1973	30.000 ton/año.		La Romana, República Dominicana	http://centralromana.com.do/estructura-corporativa/manufactura/
Furfural	China, varias plantas	rastrojos de maiz		200.000 ton/año (entre todas)			
Furfural / Alcohol furfurílico	Illovo Sugar Company	bagazo de caña		20,000 tpa /12,000 tpa		Sezela, Sudafrica	https://www.bioenergy-lamnet.org/publications/source/algleish_Durban.pdf
Pulpa de celulosa de disolución, ácido acético, furfural, xilosa,	Lenzing	madera	1892-1938: pulpa de celulosa y papel. 1945-1970: 60.000ton/año:	300.000 ton/año pulpa de celulosa de disolución; aprox 75.000 ton/año de ácido	Lenzing Group	Lenzing, Austria	https://www.lenzing.com/sustainability/production/biorefinery/

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

cenizas de soda y lignosulfonatos celulosa de disolución: viscosa acetico, furfural, xilosa y lignosulfonatos

Tabla 13. Productores principales de lignina.

Tipo de lignina	Escala de operación	Volumen (kta)	Empresa	Ubicación	Sitio web
Lignosulfonatos	Comercial	500	Borregaard	Sarpsborg, Noruega	www.borregaard.com
	Comercial	570	Borregaard LignoTech	Rothschild, WI, USA	https://www.lignotech.com/
	Comercial	120	Domsjö Fabriker AB	Örnsköldsvik, Suecia	http://www.domsjo.adityabirla.com/en/sidor/Lignin.aspx
	Comercial		Tembec (ARBO™ lignosulfonates)	Quebec, Canadá y Tartas, Francia	http://kemtekindustries.com/Tembec-Lignosulfonates-Brochure.pdf
	Comercial	39	Burgo Group lignin sulphonates (Bretax and Sartax)	Tolmezzo (UD) Italia	www.burgo.com/en/group/figures/ls
	Comercial	100	Nippon Paper (SAN X®, VANILLEX®, PEARLLEX®)		https://www.nipponpapergroup.com/english/products/chemical/lignin_products/index.html
	Comercial	60	Huanghua LiteXin Technology	Huanghu City, Hebei, China	http://www.news.npjiete.cn/product/27/
Kraft (de coníferas)	Comercial	35 - 60	Meadwestvaco		www.mwv.com
	Demo		Lignoboost/Metso		https://www.valmet.com/more-industries/bio/lignin-separation/

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

	Comercial	25	Domtar (licencia Lignoboost)	Plymouth, North Carolina, USA	https://www.domtar.com/en/what-we-make/biomaterials/biochoice-lignin
	Comercial	50	Stora Enso (licencia Lignoboost)	Kotka, Finlandia	https://www.storaenso.com/en/products/lignin
	Demo-Comercial	10	West Fraser	Canadá	https://www.westfraser.com/products/lignin-0
Kraft (Eucalyptus)	Piloto	20	Suzano Papel e Celulose	San Pablo, Brasil	www.suzano.com.br/suzano/negocios-e-produtos/lignina/
Soda (de madera)	Comercial	6	Green value SA	India	www.greenvalue-sa.com

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Tabla 14. Precios y volúmenes estimados de los mercados de productos de biomasa (BIOWAYS, 2017)

Producto	Mercado del bioproducto				Mercado total (bio + fósil)		
	Precio (USD/T)	Volumen (kTPA)	Ventas (mUSD/año)	% del mercado total	Precio (USD/T)	Volumen (kTPA)	Ventas (mUSD/año)
Ácido acético	617	1357	837	10%	617	13570	8373
Etileno	1300-2000	200	260-400	0.2%	1100-1600	127000	140000-203000
Etilenglicol	1300-1500	425	553-638	1.5%	900-1100	28000	25200-30800
Etanol	815	71310	58141	93%	823	76677	63141
3-HPA	1100	0.04	0.04	Se asume 100%	1100	0.04	0.04
Acetona	1400	174	244	3.2%	1400	5500	7700
Ácido acrílico	2688	0.3	0.9	0.01%	2469	5210	12863
Ácido láctico	1450	472	684	100%	1450	472	684
PDO	1760	128	225	100%	1760	128	225
BDO	>3000	3	9	0.1%	1800-3200	2500	4500-8000
Isobutanol	1721	105	181	21%	1721	500	860
n-butanol	1890	590	1115	20%	1250-1550	3000	3750-4650
Isobuteno	>>1850	0.01	0.02	0.00006%	1850	15000	27750
Ácido succínico	2940	38	1111	49%	2500	76	191
Furfural	1000-1450	300-700	300-1015	Se asume 100%	1000-1450	300-700	300-1015
Isopreno	>2000	0.02	0.04	0.002%	2000	850	1700
Ácido itacónico	1900	41	79	Se asume 100%	1900	41.4	79
Ácido levunílico	6500	3	20	Se asume 100%	6500	3	20
Xilitol	3900	160	624	Se asume 100%	3900	160	624
FDCA	Alto	0.045	10	Se asume 100%	Alto	0.045	10
5-HMF	>2655	0.02	0.05	20%	2655	0.1	0.27
Ácido adípico	2150	0.001	0.002	0.00003%	1850-2300	3019	5600-6900
Sorbitol	650	164	107	Se asume 100%	650	164	107
p-xileno	1415	1.5	2.1	0.004%	1350-1450	35925	48500-52100
Farneseno	5581	12	68	Se asume 100%	5581	12.2	68
Lípidos de algas	>>1000	122	>122	Se asume 100%	>>1000	122	>122
PHAs	6500	17	111	Se asume 100%	6500	17	111

Respecto a la nanocelulosa, cabe comenzar el análisis señalando que la misma no es un material sino una familia de materiales. El término nanocelulosa y el nanomaterial de celulosa se han utilizado de forma general, pero pueden referirse a nanocristales de celulosa (CNC), nanofibrillas de celulosa (CNF), celulosa microfibrilada (MFC), filamentos de celulosa (CF) y celulosa bacteriana (BC).

Las nanocelulosas ofrecen un gran potencial para mejorar la resistencia de un material y reducir peso. Los nanomateriales de celulosa tienen muchas propiedades inherentes únicas, tales como alta superficie específica, capacidad de formación de película, resistencia, buenas propiedades de barrera, tixotropía, son abundantes, de base biológica, sostenibles, renovables, permite reducir la huella de carbono, reciclables, compostables, no tóxicos, con transparencia óptica, etc., lo que permite ser utilizados en numerosas aplicaciones. Dentro de estas se pueden destacar productos convencionales de alto volumen, como es el caso de papeles de empaque, pinturas, concreto y biocompuestos, los que están en investigación activa actualmente. Además, los requisitos de alta calidad en áreas de aplicación novedosas, prometedoras y en aumento incluyen alimentos, cosméticos, medicina, electrónica, diagnósticos químicos y médicos, almacenamiento de energía y membranas para la purificación de agua y gases (Miller, 2017; Harlin *et al.*, 2018)

La Tabla 15 muestra la capacidad instalada de producción de celulosa nanofibrilada y de celulosa microfibrilada en 2018.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Tabla 15. Producción de celulosa nanofibrilada y celulosa microfibrilada en 2018 a escala comercial y piloto.

Empresa	Proceso	Capacidad (Ton/año)
<i>Nanofibras de celulosa</i>		
Nippon Paper, Japón	TEMPO, carboxilado	560
Universidad de Maine, USA	Mecánico	260
American Process, USA	SO ₂ fraccionamiento	130
CelluComp, UK	Pretratamiento químico	100
Chuetsu Pulp and Paper, Japón	Contra colisión acuosa	100
Oji Paper, Japón	Esterificación con fosfato	40
Sugino Machine, Japón	Colisión oblicua	26
Seiko PMC, Japón	Modificación de hidrofobicidad	24
Sappi, Holanda	Químico	5
VTT, Finlandia	Químico y enzimático	5
Tianjin Haojia Cellulose Co. Ltd., China	TEMPO, carboxilado	3
Dai-ichi Kyogo (DKS), Japón	TEMPO	1
US Forest Products Lab, USA	TEMPO, mecánico	< 1
<i>Celulosa micro fibrilada</i>		
FiberLean Technologies, UK	Mecánico	8800
Borregaard, Noruega	Propietario	1100
Norske Skog, Noruega	Pretratamiento mecánico	260
RISE, transportable container factory	Pretratamiento enzimático	200
Daicel, Japón	Homogeinización a alta presión	200
CTP/FCBA, Francia	Pretratamiento enzimático	25
RISE, Suecia	Pretratamiento enzimático	25
Suzano, Brasil	Mecánico	25
UPM, Finlandia	No disponible	Piloto
Empa, Suiza	Pretratamiento enzimático	Piloto
InoFib, Francia	Pretratamiento químico	Piloto
Stora Enso, Finlandia	Pretratamiento enzimático	Piloto
Tianjin Haojia Cellulose, China	TEMPO modificado	Piloto
Weidmann Fiber Technology, Suiza	Mecánico	Piloto

Fuente: Nanocellulose: Producers, Products and Applications – A Guide for End Users, TAPPI, 2017. Actualizado: Biobased Markets, Setiembre 2018.

4.3 Evaluación y descripción de los productos con mayor potencial de crecimiento en una biorrefinería de base forestal.

La biomasa lignocelulósica, de la cual la madera es un ejemplo, está mayoritariamente compuesta por celulosa, hemicelulosas, lignina, extractivos y cenizas.

La biomasa para emplear en una biorrefinería forestal se origina principalmente a partir de subproductos y residuos de la industria de procesamiento de madera (chips de madera, aserrín, pinchips, polvo de molienda, corteza, etc.), madera descartada, residuos de raleo y poda y cultivos

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

dedicados. También se utilizan subproductos y residuos de la industria de la pulpa y el papel: corteza, licor negro, lodos, etc.

La Figura 14 muestra las posibilidades de desarrollo de productos a partir de la celulosa y su escala temporal estimada, sugerida en estudios recientes realizados por VTT (Harlin *et al.*, 2018).

En cuanto a la lignina sus posibilidades de utilización son muy amplias como se muestra en la Figura 15. Usos posibles de la lignina. La industria de pulpa de celulosa actualmente es quien produce más cantidad de lignina como sub-producto (principal componente orgánico del licor negro), pero en el desarrollo de las biorrefinerías se generan corrientes de lignina de diversas características, de acuerdo al tratamiento realizado.

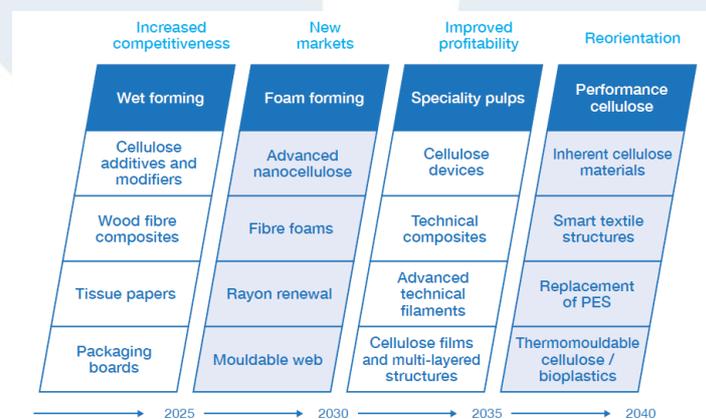


Figura 14. Posibilidades de productos a obtener a partir de celulosa. (PES= poliéster). Tomado de (Harlin *et al.*, 2018).

Se espera que la lignina desempeñe un papel importante como nueva materia prima química, especialmente en la formación de materiales supramoleculares y sustancias químicas aromáticas. Existen dos rutas de proceso principales: el termoquímico que utiliza calor para convertir el material de alimentación lignocelulósico en gas de síntesis que luego se usa para producir biocombustibles y productos químicos, y el enfoque bioquímico que fracciona la materia prima lignocelulósica en celulosa, hemicelulosa y lignina para luego convertirla en valor agregado bio-productos. Hasta ahora, la mayoría clara de las aplicaciones industriales se han desarrollado para lignosulfonatos, que se utilizan en una amplia gama de aplicaciones de menor valor en las que la forma, pero no la calidad, es importante (aplicaciones de dispersantes, aglomerantes y adhesivos). El uso de lignina para la producción química es hasta ahora limitado, excepto por la producción limitada de vainillina a partir de lignosulfonatos. La producción de más químicos de valor agregado a partir de la lignina (resinas, compuestos y polímeros, compuestos aromáticos, etc.) se considera una oportunidad de medio a largo plazo. macromoléculas (rellenos de fibra de carbono, extensores de polímero, ligninas sustituidas, adhesivos, aglutinantes, etc.) (BIOWAYS, 2017; Harlin *et al.*, 2018).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.



Figura 15. Usos posibles de la lignina.

Las hemicelulosas son potencialmente muy útiles. Los estudios sobre la utilización de hemicelulosas a partir de paja de cereales han demostrado ser una materia prima potencial de fermentación en la producción de etanol, acetona, butanol y xilitol. Los usos actuales de los xilanos (hemicelulosas principales en las maderas de fibra corta, como el eucalipto) a escala industrial implican su conversión a jarabe xiloso, xilitol y furfural (Sun, Sun and Tomkinson, 2004) Las hemicelulosas y sus monómeros constituyentes se han identificado varios productos actualmente producidos y potenciales. La Figura 16 muestra un ejemplo de los tipos de productos factibles de obtener a partir de ellas.

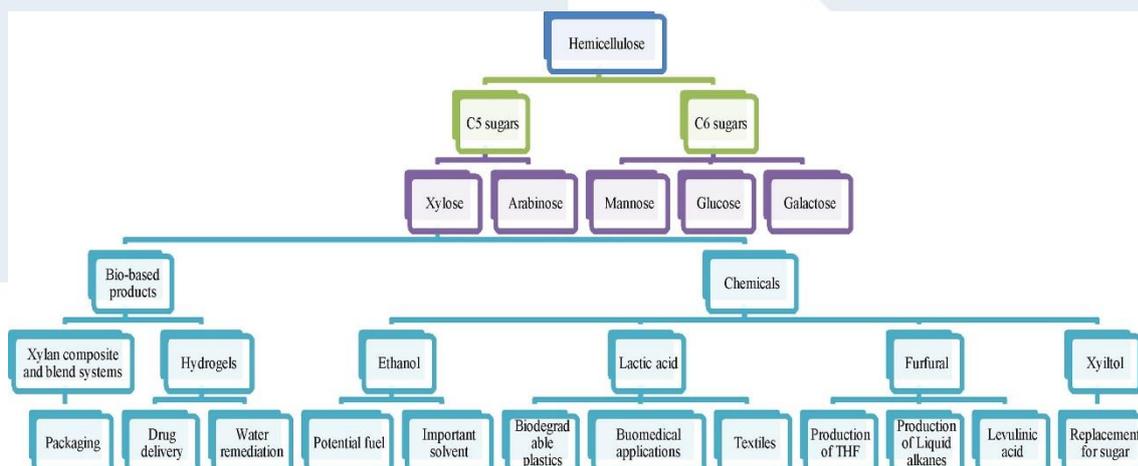


Figura 16. Productos posibles de obtener a partir de hemicelulosas.

El nivel de desarrollo de los productos posibles mencionados en las tres figuras precedentes es desigual. El reporte de E4tech , RE-CORD and WUR (E4TECH, Record and Wageningen University, 2015)

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

financiado por la Comunidad Europea, se orienta a posibles productos a partir de los azúcares constituyentes de la biomasa. En el mismo se identifican 94 productos factibles de ser producidos actualmente, con algunos ya comerciales y la mayoría en fase de investigación / piloto o en escala de planta de demostración. De esos selecciona 25 productos para un análisis más detallado, dado el nivel de actividad de la industria, y por encontrarse dentro de los productos destacados en otros informes similares. Estos 25 son en su mayoría precursores químicos de otros productos. En la Figura 17, se muestra la distribución de los niveles de maduración tecnológica (Technology Readiness Level, TRL) alcanzados para cada producto, lo que permite una comparación visible de qué productos son de comercialización más cercana. Los procesos químicos se muestran en amarillo, los procesos termoquímicos en rojo y los procesos biológicos en verde. TRL 1 corresponde a la investigación básica sobre un nuevo invento o concepto, TRL 5 a pruebas de escala piloto, mientras que TRL 9 corresponde a un despliegue masivo de una tecnología completamente comercializada (E4TECH, Record and Wageningen University, 2015).

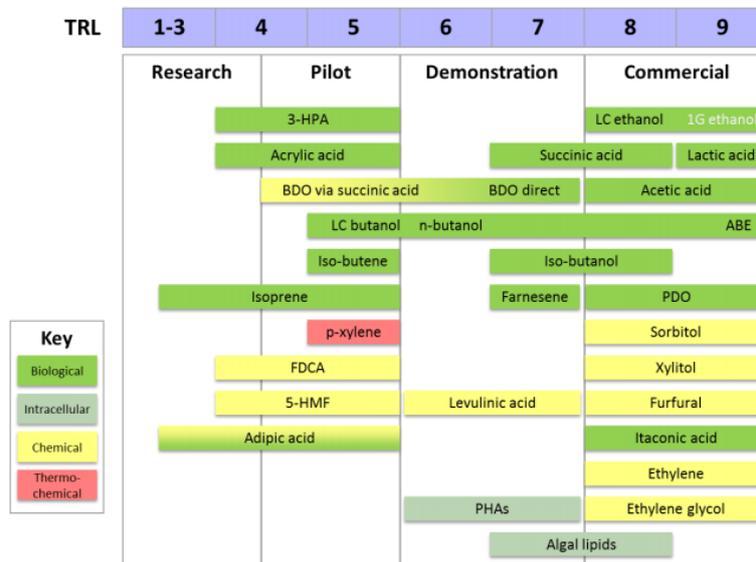


Figura 17. Niveles de maduración tecnológica de 25 productos seleccionados a producir a partir de azúcares de la biomasa.

Para el USDA el desarrollo integrado de la biorrefinería aún está en su infancia, y como tal aún tiene que identificar un grupo central de productos químicos primarios e intermedios secundarios análogos a los utilizados por la industria petroquímica. El rango de objetivos potenciales incluye estructuras ya creadas por la industria química (y, por lo tanto, demostradas como productos comerciales), así como nuevas estructuras formadas a partir de bloques de construcción de biorrefinería (Bozell and Petersen, 2010; Bidy, Scarlata and Kinchin, 2016).

La Tabla 16 muestra los productos propuestos por el DOE (Bidy, Scarlata and Kinchin, 2016) que sean factibles de ser producidos con materiales lignocelulósicos.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Tabla 16. Potenciales productos de base de biomasa lignocelulósica a producir según el DOE de Estados Unidos. (Werpy and Petersen, 2004; Bozell and Petersen, 2010; Biddy, Scarlata and Kinchin, 2016)

Producto	Utilidad	Producción actual con petróleo	Aparecía en listado 2004 de DOE	Aparecía en revisión de Bozell de 2010
1,3-butadieno	Precursor para la producción de caucho, que se utiliza principalmente en la producción de neumáticos para automóviles de pasajeros y vehículos livianos.	SI	NO	NO
1,4-butanediol (BDO)	Producción de polímeros, solventes y productos químicos especializados.	SI	SI (derivado de ac. Succínico)	SI (derivado de ac. Succínico)
Lactato de etilo	El uso principal del lactato de etilo es como solvente industrial, ya que se ha encontrado que sus propiedades y rendimiento cumplen o superan a los solventes tradicionales como el tolueno, la metiletilcetona y la N-metilpirrolidona en muchas aplicaciones. El etil lactato se usa principalmente como un reemplazo funcional de los solventes en la limpieza de metales y como un dispersante en productos farmacéuticos. Los dos materiales de partida utilizados para hacer etil lactato, ácido láctico y etanol, tienen el potencial de ser hechos de azúcares lignocelulósicos	NO	NO	NO
Furfural	La mayor parte del furfural se convierte en alcohol furfurílico (FA) que es un precursor de productos de alto valor agregado.	NO (SI el alcohol furfurílico)	SI	SI
Isopreno	Es el componente básico para el caucho de poli-isopreno, copolímeros de estireno y caucho de butilo.	SI	NO	NO
Ácido láctico	Acidulante, agente saborizante, tampón de pH e inhibidor de deterioro en alimentos. El ácido D-láctico se usa junto con el ácido L-láctico para producir ácido poliláctico (PLA). Se espera que la producción de PLA sea el principal motor del crecimiento en el consumo de ácido láctico.	Poco	SI (TOP 30)	SI
1,3-Propanediol	Precursor químico.	Poco y nuevo	SI (derivado de glicerol)	SI (derivado de glicerol)
Ácido succínico	El mercado proyectado para el ácido succínico derivado de la biomasa es grande. Es un posible precursor para la síntesis de productos de alto valor que incluyen productos químicos básicos, polímeros, surfactantes y solventes. Debido al gran potencial de mercado para el ácido succínico a escala comercial, las instalaciones de producción comenzaron a operar en los últimos tres años utilizando biomasa como materias primas.	SI, mercado pequeño	SI	SI (TOP12)
Xyleno (para)	Se utiliza para producir tanto ácido tereftálico como tereftalato de dimetilo, y estos dos productos químicos son materias primas para la producción de fibra y botellas de tereftalato de polietileno (PET).	SI	SI (su derivado FDCA)	SI (su derivado FDCA)

La producción de estos productos en Uruguay podría ser factible en una óptica de biorrefinería integrada, donde se aprovecha la biomasa para la producción de varios productos. Sin embargo, es necesario realizar un estudio tecno-económico, de forma de tener respuestas acerca del real potencial de estos productos en Uruguay.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

5 Análisis de las fortalezas y debilidades de Uruguay para la transformación química de la madera (nuevos productos de fibras y biorrefinerías)

5.1 Fortalezas

Uruguay es un país líder en América Latina en cuanto a los principales indicadores de estabilidad política y solidez democrática y no presenta conflictos territoriales. Debido al buen desempeño macroeconómico del país en los últimos años, Uruguay se ha posicionado como un destino confiable y atractivo para los inversores extranjeros, siendo uno de los países de América Latina que ha recibido mayor inversión extranjera directa. Asimismo, Uruguay es un país con Grado Inversor. Esto ha sido ratificado por las principales calificadoras: Moody's, Standard & Poor's y Fitch Ratings que han mejorado sucesivamente la nota de la deuda uruguaya hasta el momento. El país ocupa la primera posición en América Latina en cuanto a la transparencia (baja percepción de corrupción), y una alta institucionalidad debido a la democracia consolidada y una fuerte seguridad jurídica. (Uruguay XXI, 2018)

El país posee una buena red de servicios, a modo de ejemplo, tiene la mayor cobertura de telecomunicaciones de América Latina, y el mejor índice de desarrollo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). El transporte fluvial y marítimo se concentra en el puerto de Montevideo, que es la única terminal en la costa atlántica de América del Sur que opera bajo el sistema de puerto libre. Por otra parte, el puerto de Nueva Palmira se encuentra en un punto clave de la hidrovía Paraguay – Paraná. En cuanto al transporte carretero la red vial principal es de las más densas de América Latina, donde el transporte internacional de carga se realiza sin restricciones, donde la flota que puede circular no tiene limitaciones. Las toneladas-kilómetro transportadas por la red de carreteras en el País se ha cuadruplicado entre 2000 y 2015, sin realizar el mantenimiento necesario, lo que ha causado un deterioro importante en la infraestructura vial, que lo que se ha tratado de corregir parcialmente en el último tiempo. En cuanto al transporte ferroviario, la capacidad para transportar carga actualmente se ve limitada por el estado de la infraestructura ferroviaria, del material rodante y la falta de modernos sistemas, técnicas y metodologías de organización y funcionamiento del ferrocarril. (Uruguay XXI, 2018, Inalog, 2019)

La principal fortaleza para el desarrollo de la industria forestal en el país es la disponibilidad de la materia prima y el acceso a la misma durante largos períodos de tiempo (ausencia de lugares congelados e inundaciones esporádicas y localizadas). La ley Forestal 15.939 de fines de los 80 y sus decretos reglamentarios, impulsa el manejo forestal sostenible a partir de la defensa, el mejoramiento, la ampliación y la creación de recursos forestales, mediante diversos mecanismos de promoción. Se definen áreas de prioridad forestal aquellas que son inadecuadas para cualquier otra explotación o destino de carácter permanente y provechoso. Hoy por hoy, la superficie de prioridad forestal es de 4.300.000 há, mientras que el bosque plantado es de 1.034.712 há (DGF 2019, OPYPA Anuario 2016).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Por otra parte, la mayor parte de las plantaciones está certificada, asegurando plantaciones sostenibles en el tiempo en aspectos ambientales, sociales y económicos.

En el país se encuentran ya instaladas empresas de primera línea del sector (UPM, Stora Enso, Andritz, Kemira y Arauco) que han realizados importantes emprendimientos, por lo que conocen las potencialidades de Uruguay. A la hora de considerar actores para llevar a cabo la producción de fibras para otros destinos, el diálogo con estos actores es fundamental.

Muchas operaciones asociadas a las biorrefinerías, pueden ser realizadas por PYMES y Uruguay tiene una vasta experiencia de trabajo con este tipo de empresas.

5.2 Oportunidades

La demanda de productos de transformación química de la madera considerados en este estudio es creciente. Para aquellos que son commodities, como la pulpa de disolución, representa una oportunidad de desarrollo. El éxito en la instalación de grandes plantas de producción de celulosa kraft en Uruguay es un hecho conocido por todos los actores del sector, lo que puede ser potenciado para incluir la producción de otros tipos de pulpa, por estos actores u otros.

La producción de otros tipos de pulpa diferentes a la kraft, puede integrarse con la producción actual. La fabricación de pulpa de disolución a partir de pulpa kraft de mercado, si bien aún no se encuentra operativa a escala industrial, puede catalizar la diversificación, dado que requeriría mucho menor inversión. La producción de papel liner a partir de Pino, puede beneficiarse de los servicios ya instalados en el país para la producción de celulosa kraft.

Así mismo la producción de otros tipos de pulpa, como la pulpa kraft de pino, daría acceso a nuevos sub-productos, hoy inexistentes en el país, como lignina, tall oil y trementina, que son utilizados en otros sectores nacionales, sustituyendo su importación, y que pueden representar el 5-10% de la facturación de la planta.

La concientización de la importancia de la sustitución de plásticos por otras soluciones de menor impacto ambiental es una oportunidad para el desarrollo de nuevos productos de base lignocelulósica. Si bien las posibilidades de sustitución son muy amplias, el principal obstáculo es lograr que los materiales sustitutos tengan un costo bajo. El uso de cartón en materiales de embalaje y eventualmente las bolsas de papel, podrían constituir una alternativa en este sentido.

El desarrollo de las biorrefinerías de segunda (y tercera generación) tienen dos objetivos estratégicos: el desplazamiento del petróleo importado en lugar de materias primas nacionales renovables (un objetivo energético) y el establecimiento de una industria robusta de base biológica (un objetivo económico). El desarrollo de estas refinerías está en sus fases iniciales y el país rápidamente puede ponerse en la primera línea de la aplicación de pilotos por su escala.

Las biorrefinerías basadas en materiales lignocelulósicos pueden utilizar recursos forestales como materia prima; pero las investigaciones realizadas en esta biomasa, pueden ser rápidamente transferibles a otras fuentes de biomasa disponibles en el país (cáscara de arroz, etc.).

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

5.3 Desafíos

Mejorar la infraestructura de servicios, particularmente de transporte es una necesidad para los emprendimientos considerados, debiéndose tener un plan proactivo de mantenimiento, considerando la expansión del negocio.

Si bien están presentes actores de primera línea en el mercado de madera, celulosa y papel, sería óptimo incorporar y/o aumentar su participación o cartera de productos en el país, de empresas productoras de productos/precursores químicos, que puedan desarrollar rápidamente la expertiz en la generación de productos y materiales de base renovable. En este sentido también empresas como ANCAP que tienen un “know-how” adquirido en el área de petróleo podría comenzar con el desarrollo demo/piloto de una refinería a partir de biomasa. Esto implicaría aumentar el portfolio de productos y know-how de ANCAP, hoy concretado en la producción de combustibles y derivados.

La formación terciaria técnica en Uruguay ha sido tradicionalmente generalista, debido al tamaño del mercado local. La formación terciaria específica en la modificación química de la madera, seguramente sature la demanda rápidamente, por lo que en vez del desarrollo de nuevas carreras específicas del sector, debería incluirse como opción (o especialización) en las carreras actuales de grado dictadas en el país.

Por otra parte, la formación de RRHH con estudio de posgrado en la temática, particularmente a nivel de doctorado, es clave para afianzar capacidades locales tanto de desarrollo como de contralor de esta actividad, así como la investigación en la temática que permita el mayor agregado de valor a la cadena.

Así mismo, una queja tradicional de las industrias instaladas en el país ha sido la escasez de profesionales con títulos terciarios no universitarios (ej: tecnólogos) en las ramas de la química, la ingeniería y la mecatrónica. Si bien actualmente existen iniciativas para intentar revertir esta situación, existe una fuerte tradición de la enseñanza terciaria universitaria.

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, la formación debe concebirse como una política integral y debe ser mejorada a todos los niveles, terciario no universitario, grado universitario y posgrado universitario. Esto requiere el involucramiento y coordinación de diversos actores (UTU, UTEC, UdelaR, Universidades privadas), que actúen con bajo un objetivo común.

La investigación también debe desarrollarse sustancialmente, lo que requiere de fondos específicamente dirigidos. A modo de ejemplo, conocer las características de las especies locales es clave para promover el desarrollo del sector, y a la fecha, por ejemplo, no son conocidas las propiedades papeleras del pino, lo que puede dificultar su industrialización. La generación de conocimiento y competencias en la materia requiere tiempo e inversión. Las tecnologías clave (fraccionamiento y separación de productos) que forman parte de un proceso de biorrefinación aún no están lo suficientemente maduras para la implementación a escala comercial y requieren investigación local. Así mismo, dada la escasez de personal calificado, y la falta de coordinación entre los disintos grupos de investigación que están abordando la temática desde diferentes ángulos son puntos que deben ser corregidos para un desarrollo consensuado del sector.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

El desarrollo de políticas públicas para favorecer al sector es un elemento importante. La existencia de fondos específicos para la investigación y el desarrollo es clave y es una realidad en todos los países con un desarrollo forestal exitoso. Fomentar el emprendedurismo, imitar instituciones como la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT) de la Universidad de Concepción, buscando el desarrollo de nuevas tecnologías e implementando plantas pilotos son aspectos claves para promover la inversión. Otro ejemplo de este tipo de políticas puede ser la aplicada por Chile hace unos años, donde buscando promover el desarrollo de plantaciones con fines energéticos, generó una política de devolución de impuestos solamente para este tipo de plantaciones.

5.4 Amenazas

A la fecha Uruguay presenta las fortalezas consideradas en el punto 5.1, en particular respecto a los países vecinos. Sin embargo, no hacer uso de éstas en el corto plazo, puede hacer que estas ventajas se pierdan.

El desarrollo forestal a partir de una sola especie (Eucaliptus) si no se logra la industrialización del pino, es una realidad tan preocupante, como depender de un solo producto (pulpa kraft de Eucalipto).

Como ha sido mencionado, el desarrollo de las biorrefinerías se encuentra en sus primera fase. Cometer errores a escala comercial por tecnologías o productos inadecuados, puede generar el rechazo de la población a su implementación en el país. Para ello se requiere una fuerte investigación y estudios técnico, económicos, sociales y ambientales de los posibles tecnologías y productos a utilizar.

Las compañías tradicionalmente productoras de celulosa y papel están buscando intensamente la implementación de las biorrefinerías integradas a sus plantas, de forma de darle más valor agregado a plantas chicas y con tecnología fuera de punta y de esa forma mantenerse en competencia. Esto conlleva a que las operaciones en nuestro país con mayor escala y tecnología de punta, se centre fundamentalmente en la pulpa de celulosa.

Los sectores del mercado que deberían cooperar (alimentos, insumos para alimentación animal, agroindustria, química, energía, combustibles, logística, etc.) para el desarrollo y comercialización de cadenas de valor de biomasa totalmente sostenibles, incluidos los procesos de biorrefinería de alta eficiencia, a menudo todavía no funcionan juntos.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

6 Conclusiones

Uruguay ha avanzado significativamente como país forestal desde la implementación de la Ley Forestal a finales de los ochenta. La instalación de plantas de producción de pulpa de celulosa de última generación ha posicionado al país entre los 10 productores mundiales de celulosa de fibra corta (eucalipto en particular) y ha cambiado significativamente la composición del PBI del país.

Sin embargo, es deseable diversificar la cartera de productos forestales para dar sustentación social, económica y ambiental al país.

Del análisis realizado se desprende que existen diversas alternativas que permitirían lograr un desarrollo forestal integral en el país, con una interacción fuerte entre las industrias de transformación mecánica de con las de transformación química la madera, que busque aprovechar al máximo los recursos disponibles.

Para lograr tal desarrollo es necesario implementar la utilización de la madera para la construcción y aumentar la oferta de productos de ingeniería de la madera. Así mismo, los residuos obtenidos en el procesamiento mecánico, deben ser consumidos por industrias de transformación química de la madera. Para el caso del eucalipto, el actor natural para consumir estos residuos son las plantas de celulosas ya instaladas en el país, pero para el caso del procesamiento del pino, deben generarse industrias para su transformación química.

Los productos para la construcción más interesantes a partir tanto de madera de pino como de eucalipto son la madera modificada térmicamente (TMT) y la madera contralaminada (CLT), agregándose solo para el caso del eucalipto la madera laminada y encolada (MLE). Todas estas tecnologías están disponibles y pueden adaptarse fácilmente a las condiciones de Uruguay para generar valor a la madera aserrada. Además, en el caso de CLT o MLE la inversión inicial por unidad de producto es baja, por lo que es factible que fabricantes locales tengan en cuenta esta alternativa como una forma de agregar valor a su producción. Si bien el LVL es también un producto atractivo desde el punto de vista del valor agregado y el EBIDTA, especialmente para pino, su fabricación requiere una escala mínima que supone mayor riesgo.

Es probable que el mercado local uruguayo y el regional puedan comenzar a demandar productos de ingeniería de madera de manera creciente. En este aspecto, si bien la disponibilidad de madera no puede ser adsorbida por el mercado local, éste puede ser un fuerte impulsor del desarrollo de estas tecnologías de producción. Para ello es necesario, en lo inmediato, actualizar y unificar las normativas acerca de construcción con madera, así como incentivar el desarrollo de industrias productoras de maderas estructurales. Incluir la construcción con productos de madera en proyectos de obra pública, sería un buen incentivo para fomentar el desarrollo de la construcción y para desarraigar creencias populares acerca de la construcción en madera. En Uruguay existe una demanda insatisfecha de vivienda y dado que la productividad de la construcción tradicional es baja, la prefabricación con madera es una alternativa para solucionar esta situación.

En cuanto a la transformación química de la madera, se identifica que depender de un solo producto (celulosa kraft blanqueada de eucalipto – BEKP) es una situación riesgosa. La diversificación puede generarse a partir de la producción de otros tipos de fibras a partir de eucalipto, como la pulpa de

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

disolución o la pulpa al sulfito neutro NSSC, el cual podría estar acoplado a alguna instalación kraft ya existente. Para la industrialización del pino, parece una buena oportunidad el desarrollo de una planta kraft para la producción de papel liner, que consuma los residuos de la industrialización mecánica de esta materia prima. Hoy por hoy, una planta kraft de pino se considera una biorrefinería, ya que además de la fibra se producen otros coproductos (tall oil, lignina y trementina) que pueden representar del 5 al 10% de la facturación de la planta.

Referente a las biorrefinerías, Uruguay está bien posicionado para el desarrollo de ellas, ya que tiene biomasa suficiente y las operaciones anteriormente descritas generan o generaran una cantidad interesante de biomasa a procesar. Hoy en día esta biomasa se utiliza como combustible para la generación de energía, operación que, con el cambio en la conformación de la matriz energética, puede no ser interesante dados los cambios en la rentabilidad. El desarrollo de las biorrefinerías debería conducir a la instalación y/o desarrollo de las industrias químicas en el país.

Aumentar el desarrollo forestal requiere de recursos humanos altamente calificados y del desarrollo de investigación local en esta temática. Para ello es necesario mejorar los planes actuales de formación a varios niveles, tanto medio-superior como terciario, tecnológica como universitaria, y consolidar grupos de investigación que trabajen coordinadamente. Actualmente existen algunos grupos de investigación en el país que analizan en profundidad la temática, pero se carece de financiación específica y de una visión de largo plazo donde los distintos grupos estudien un mismo problema de manera interdisciplinaria. Por tanto, la creación de un centro tecnológico forestal y el desarrollo de un fondo sectorial específico, pueden revertir esta situación en el mediano plazo.

La asociación de diversos sectores como la industria, centros de investigación, academia y el gobierno resulta clave para el desarrollo del sector.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

7 Referencias bibliográficas

- Anónimo. 2007. Guía de Buenas Prácticas En Impregnación de Madera. Tomo 2: Gestión Ambiental Y Producción Más Limpia. Vol. 2. 2 vols. Cooperación Técnica Mercosur-Alemania. Uruguay: Dirección Nacional de Medio Ambiente.
- Anónimo. 2012. "Pulping Not for Paper". Wires & Fabriks S.A.
- Anónimo. 2015. "Capacitación Para La Innovación En La Industria de La Madera." 6. Montevideo: Dirección Nacional de Industrias - Ministerio de Industrias, Energía y Minería.
- Anónimo. 2018. "Outlook for the World Fluff Pulp Market."
- Anónimo. 2019. "Cartografía Forestal 2018." Dirección General Forestal - Ministerio de Ganadería, Agricultura Y Pesca. 2019. <http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/superficie.pdf>.
- Area, MC., F. Felissia, A. Venica, and J. Valade. 2001. "NSSC Process Optimization, Part I: Pulping, Pulps, and Spent Liquors." *Tappi Journal* 84 (4): 1–13.
- Arnoult_Jarriault, B, C Chirat, D Lachenal, and L Heux. 2014. "Updrading Softwood Bleached Kraft Pulp to Dissolving Pulp by Cold Caustic Treatment and Acid-Hot Caustic Treatment." *Industrial Crops and Products* 65. <https://doi.org/10.1016/j.indrop.2014.09.051>.
- Biddy, M. J., C. Scarlata, and C. Kinchin. 2016. "Chemicals from Biomass: A Market Assessment of Bioproducts with Near-Term Potential." National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1244312>.
- BIOWAYS (2017) D2.1 Bio-based products and applications potential. Available at: <http://www.bioways.eu/multimedia/press-corner/public-results/>.
- Boscana, M., and L. Boragno. 2018. "Estadísticas Forestales 2018." Montevideo, Uruguay: Dirección General Forestal - Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/dgf_boletin_estadistico_2018_0.pdf.
- Bozell, Joseph J., and Gene R. Petersen. 2010. "Technology Development for the Production of Biobased Products from Biorefinery Carbohydrates—the US Department of Energy's 'Top 10' Revisited." *Green Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/b922014c>.
- Cabrera, M.N. 2018. "Alternativas Tecnológicamente Probadas Al Uso de CCA Como Impregnador de Madera." Trabajo de fin de curso, Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.
- Chen, C, C Duan, J Li, Y Lui, X Ma, I Zheng, J Stavik, and Y Ni. 2018. "Cellulose (Dissolving Pulp) Manufacturing Process and Properties: A Mini-Review." *BioResources* 2 11 (2): 5553–64.
- Cherubini, Francesco. 2010. "The Biorefinery Concept: Using Biomass instead of Oil for Producing Energy and Chemicals." *Energy Conversion and Management* 51 (7): 1412–21. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>.
- Cordeiro, J. 2018. "Who Needs More Plantations?" Oral presentation presented at the Council of Academics of Engineering and Technological Sciences (CAETS), Montevideo.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

- Correa, F. 2017. "Proyecto Ysyry Cuatia." presented at the Jornadas Celulósicas Papeleras 2017 - AFCP Argentina, Buenos Aires.
- Costa, R., F. Cúneo, M. Martínez, L. Ramírez, and K. Soca Rosas. 2019. "Producción de Paper Liner Kraft a Partir de Madera de Pino." Proyecto de fin de carrera, Montevideo: Universidad de la República.
- Dangel, Ulrich. 2016. *Turning Point in Timber Construction*. Basel: Birkhäuser.
- DGF-MGAP. 2012. "Superficie Total de Bosques (Cartografía 2012)." Dirección General Forestal - Ministerio de Ganadería, Agricultura Y Pesca. 2012. <http://www.sistemanacionaldebioseguridad.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-forestal/informacion-tecnica/estadisticas-y-mercados/recurso-forestal/superficie-total-de-bosques>.
- Di Chiara, L., Enzo Coppes, G. Casaravilla, and R. Chaer. 2017. "Optimización de Las Inversiones En Generación Eléctrica Del Uruguay 2016-2046. (Enfoque Desde La Academia)." Montevideo: Facultad de Ingeniería - Universidad de la República. adme.com.uy.
- Dieste, A. 2014. "Mitigación Del Impacto Ambiental de Madera Tratada Químicamente." 4. Montevideo: Dirección Nacional de Industrias - Ministerio de Industrias, Energía y Minería.
- Dieste, A., V. Baño, M.N. Cabrera, L. Clavijo, V. Palombo, G. Moltini, and Francisco Cassella. 2018a. "Forest-Based Bioeconomy Areas. Strategic Products from a Technological Point of View." Digital. Montevideo: Facultad de Ingeniería - Universidad de la República.
- E4TECH, Record and Wageningen University (2015) *From the Sugar Platform to biofuels and biochemicals*, Final report for the European Commission Directorate-General Energy. doi: contract No. ENER/C2/423-2012/SI2.673791.
- FAO. 2018. "Forest Products. Annual Market Review 2017-2018." Geneva: FAO-UNECE. <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/publications/FPAMR2018.pdf>.
- Faroppa, C. 2017. "Primer Informe de La Línea de Base Del Sector Forestal-Madera Uruguayo. Pre-Diagnóstico Y Tendencias." Montevideo.
- Feng, Shanghuan, Shuna Cheng, Zhongshun Yuan, Mathew Leitch, and Chunbao (Charles) Xu. 2013. "Valorization of Bark for Chemicals and Materials: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 (October): 560–78. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.024>.
- Ferreira, Ana F. 2017. "Biorefinery Concept." In *Biorefineries- Targeting Energy, High Value Products and Waste Valorisation*, edited by Miriam Rabaçal, Ana F. Ferreira, Carla A.M. Silva, and Mário Costa, 1st Ed., 57:1–20. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48288-0>.
- Flickinger, P., L. Lammi, and B. Ernerfeldt. 2011. "Dissolving Pulp." In *Proceedings of PEERS Conference 2011*.
- Gamache, S.L., O. Espinoza, and M. Aro. 2017. "Professional Consumer Perceptions about Thermally Modified Wood." *Bioresources* 12 (4): 9487–9501.
- Gírio, Francisco M, Susana Marques, Filomena Pinto, Ana Cristina Oliveira, Paula Costa, and Alberto Reis. 2017. "Biorefineries in the World." In *Biorefineries- Targeting Energy, High Value Products and Waste Valorisation*, edited by Miriam Rabaçal, Ana F. Ferreira, Carla A.M. Silva, and Mário Costa, 1st. Ed, 57:227–81. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG.

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-48288-0>.

- Gorrini, B. 2018. "Natural Adhesives in the Wood Industry." presented at the CAETS 2018, Montevideo.
- Harlin, A. et al. (2018) Cellulosa goes digital. VTT's vision of digital cellulosa-based industries. VTT Visions 14. Helsinki: VTT.
- Hildebrandt, Jakob, Nina Hagemann, and Daniela Thrän. 2017. "The Contribution of Wood-Based Construction Materials for Leveraging a Low Carbon Building Sector in Europe." *Sustainable Cities and Society* 34 (October): 405–18. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.013>.
- Hill, C. 2006. *Wood Modification. Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley&Sons.
- Hughes, Stephen R, William R. Gibbons, Bryan R. Moser, and Joseph O. Rich. 2013. "Sustainable Multipurpose Biorefineries for Third- Generation Biofuels and Value-Added Co-Products." In *Biofuels - Economy, Environment and Sustainability*, edited by Zhen Fang, 1st ed., 245–67. InTechOpen. <https://doi.org/10.5772/54804>.
- IEA Bioenergy Task42. 2018. *Bioeconomy and Biorefining Strategies in the EU Member States and beyond - Reference Year 2018*.
- IEA Bioenergy. 2014. "IEA Bioenergy Task 42- Biorefining." Task 42 Biorefinery. Wageningen. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(07\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(07)00064-5).
- Kallio, Maarit, Antti Lehtilä, T. Koljonen, and Birger Solberg. 2015. *Scenarios for the Forest Energy Sectors - Implications for the Biomass Market*. Research report no D 1.2.1. Helsinki: Cluster for Energy and Environment (CLEEN) - Finish Bioeconomy Cluster (FIBIC).
- Kamm, B, and M Kamm. 2004. "Principles of Biorefineries." *Applied Microbiology and Biotechnology* 64 (2): 137–45. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1537-7>.
- Kamm, Birgit, Patrick R. Gruber, and Michael Kamm. 2010. *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. WILEY-VCH Verlag GmbH &Co. KGaA.
- King, David, O.R. Inderwildi, and Alex Williams. 2010. "The Future of Industrial Biorefineries." *World Economic Forum*. Cologny/Geneva- Switzerland.
- Leal Filho, Walter, Ulla Saari, Mariia Fedoruk, Arvo Iital, Harri Moora, Marija Klöga, and Viktoria Voronova. 2019. "An Overview of the Problems Posed by Plastic Products and the Role of Extended Producer Responsibility in Europe." *Journal of Cleaner Production* 214 (March): 550–58. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.256>.
- Legros, Robert, Mario Jolicoeur, Louis Fradette, and François Bertrand. n.d. "From the Process Engineering To the Biorefinery." *Biorefinery CRIP*. Accessed March 14, 2019. http://www.groupes.polymtl.ca/crip/en/bio_1stgen.php.
- Mcmillan, J. D. (2004) 'Biotechnological Routes to Biomass Conversion The Unique Role of Biomass'.
- Miller, J. (2017) *Nanocellulose: Producers, Products, and Applications*. 1st. Ed. Peachtree Corners, GA 30092 U.S.A.: TAPPI Press.
- Morrell, Jeffrey J. 2017. "Protection of Wood: A Global Perspective on the Future." In *Wood Is Good*, edited by Krishna K. Pandey, V. Ramakantha, Shakti S. Chauhan, and A.N. Arun Kumar, 213–26. Springer Singapore.
- Muñoz, F., A. Ballerini, and W. Gacitúa. 2013. "Variabilidad de Las Propiedades Físicas, Morfológicas Y

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

- Térmicas de La Fibra de Corteza de Eucalyptus Nitens.” *Maderas. Ciencia Y Tecnología* 15 (1): 17–30.
- Pizzi, A. 1983. “A New Approach to the Formulation of Application of CCA Preservatives.” *Wood Sci Technol* 17: 303–19.
- Pizzi, A., W.E. Conradie, and A. Jansen. 1986. “Polyflavonoid Tannis - a Main Cause of Soft-Rot Failure in CCA-Treated Timber.” *Wood Sci Technol* 20: 71–81.
- Ragauskas, Arthur J., Máté Nagy, Dong Ho Kim, Charles A. Eckert, Jason P. Hallett, and Charles L. Liotta. 2006. “From Wood to Fuels: Integrating Biofuels and Pulp Production.” *Industrial Biotechnology* 2 (1): 55–65. <https://doi.org/10.1089/ind.2006.2.55>.
- Ramage, Michael H., Henry Burrige, Marta Busse-Wicher, George Fereday, Thomas Reynolds, Darshil U. Shah, Guanglu Wu, et al. 2017. “The Wood from the Trees: The Use of Timber in Construction.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, Part 1 (February): 333–59.
- Reports&Reports. 2018. “Global Dissolving Pulp Market Key Companies, Demands, Growth, Sales and Forecast to 2022.”
- RISI. 2018a. “Fluff Pulp Prices Spike 15% Over 2017, Propelled by Demand for Paper-Grade Pulp.” 2018. <https://www.prnewswire.com/news-releases/fluff-pulp-prices-spike-15-over-2017-propelled-by-demand-for-paper-grade-pulp-300672367.html>.
- Sateri. 2017. “Sateri’s Sustainability Report 2017.”
- Schreiber, D., M. Mallo, G. Rossi, C. Ciganda, I. Suárez, S. Böthig, J. Martínez, G. Rondini, and A. Laborde. 2007a. *Guía de Buenas Prácticas En Impregnación de Madera. Tomo 1: Seguridad Y Salud Ocupacional. Vol. 1. 2 vols. Cooperación Técnica Mercosur-Alemania. Uruguay: Dirección Nacional de Medio Ambiente.*
- Sixta, Herbert. 2006. *Handbook of Pulp. Edited by Herbert Sixta. Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. Vol. 1. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH.* <https://doi.org/10.1002/9783527619887>.
- Su, Yanqun, Bo Yang, Jingang Liu, Bo Sun, Chunyu Cao, Xuejun Zou, Ryan Lutes, and Zhibin He. 2018. “Prospects for Replacement of Some Plastics in Packaging with Lignocellulose Materials: A Brief Review.” *BioResources*; Vol 13, No 2 (2018). http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_13_2_Su_Review_Prospects_Replacement_Plastics_Packaging/6094.
- Suhonen, T, and N Oksanen. 2016. “Furute Outlook for the Forest Industry - Poyry.” In *Proceedings of SPCI Conference 2016*.
- Sun, R., Sun, X. F. and Tomkinson, J. (2004) ‘Hemicelluloses and Their Derivatives’, in Gatenholm, P. and Tenkanen, M. (eds) *Hemicelluloses: Science and Technology*. First Ed. Orlando, FLA: ACS Symposium Series 864, pp. 2–22.
- Talvi, E. 2018. “The Economics and Politics of the Post-Financial Crisis Global Geography.” Oral presentation presented at the Council of Academics of Engineering and Technological Sciences (CAETS), Montevideo.
- Thermowood. 2018. “Production Statistics 2017.” Finland. <https://www.thermowood.fi/>.
- Vertés, Alain A. 2014. “Biorefinery Roadmaps.” *Biorefineries: Integrated Biochemical Processes for*

La bioeconomía forestal en Uruguay desde una perspectiva tecnológica.

Liquid Biofuels, no. 1: 59–71. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59498-3.00003-8>.

Werpy, T, and Petersen. 2004. "Top Value Added Chemicals from Biomass Volume I — Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas." National Renewable Energy Laboratory- NREL/TP-510-35523. Oak Ridge, USA. <https://doi.org/10.2172/926125>.

