

Análisis de pre-factibilidad para desarrollar un proceso de conversión de residuos de madera de pino

María A. Volpe, Marisa Frechero, Andrés I. Casoni, María Elena Gauchat, Hugo Fassola, Ana María Lupi, Alberto Acevedo



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria

Análisis de pre-factibilidad para desarrollar un proceso de conversión de residuos de madera de pino

Instituto de Suelos

Centro Investigación de Recursos Naturales

Agosto 2022

Trabajo financiado por el INTA en el marco del Proyecto PEI016 - Silvicultura sostenible de bosques implantados de alta productividad, Proyecto PEI146 – Mejoramiento de especies de rápido crecimiento y por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica, ANPCyT, PICT start-up 2018 472: Biomasa residual como fuente de carbón renovable para mitigar la emisión de CO₂. Uso de biocarbones de pirólisis en la producción de acero.

Autores

María A. Volpe. Planta Piloto de Ingeniería Química, PLAPIQUI (CONICET-UNS), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

Marisa Frechero. Instituto de Química del Sur, INQUISUR (CONICET -UNS), Departamento de Química, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

Andrés I. Casoni. Planta Piloto de Ingeniería Química, PLAPIQUI (CONICET-UNS)

Maria Elena Gauchat. EEA Montecarlo, INTA. Montecarlo, Misiones, Argentina

Hugo E. Fassola, EEA Montecarlo, INTA

Ana Maria Lupi. Instituto de Suelos, Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRN), INTA Castelar, Buenos Aires, Argentina

Alberto Acevedo*. Instituto de Suelos, CIRN

*Autor de contacto:

acevedo.alberto@inta.gob.ar

Diseño y Edición: Ana M. Lupi

Fotografías: Pindó SA

Contenido

Resumen ejecutivo	1
Introducción	2
Objetivo	3
Estudio de pre-factibilidad.....	3
1. Distribución y clasificación de los aserraderos en la Mesopotamia Argentina.....	4
2. Tipos de subproductos y su disponibilidad.....	5
3. Panorama actual del uso de los residuos forestales.....	8
4. Estrategia de intervención. Metodología.....	12
Factibilidad del desarrollo de plantas de pirólisis para la valorización de desechos de la industria forestal.....	13
1. Pirólisis a escala banco. Caracterización de las maderas.....	14
2. Análisis termogravimétrico.....	15
3. Caracterización del biolíquido.....	17
4. Usos factibles de los productos de pirólisis para aserraderos chicos, medianos y grandes.....	20
Consideraciones finales	22
Referencias.....	23

Resumen ejecutivo

Este informe presenta un análisis sobre la posibilidad de usar los residuos o subproductos (se toman como sinónimos) de los aserraderos localizados en la Mesopotamia en procesos de pirólisis para la generación de productos bio-basados de alto valor agregado y que sean de impacto para los sectores productivos de la región. En este sentido, el equipo técnico que se constituyó para este trabajo llevó a cabo un relevamiento del uso actual de los subproductos de aserraderos para la generación de energía y de los volúmenes que exceden a este uso. Por otra parte, se realizó una caracterización fisicoquímica de fracciones de madera de 7 genotipos de pinos provistas por el Programa de Mejoramiento genético de la EEA Montecarlo INTA en el contexto de su potencial uso en procesos de pirólisis. Se incluyó material de *Eucalyptus grandis* provisto por la EEA Concordia a título comparativo, que también se cultiva en la región en análisis. Se llevaron a cabo ensayos de pirólisis a escala banco, así como también caracterizaciones de la biomasa principalmente por estudios térmicos. Se determinaron propiedades fisicoquímicas de los productos de la pirólisis, biocarbón, líquido de pirólisis o bio oil y gas de pirólisis. Se concluyó que en la región es factible desarrollar procesos sostenibles para la producción de biocarbón de pirólisis y co-productos en base a residuos de *Pinus*. Dicha producción se plantea asociada a plantas a ser instaladas en aserraderos medianos o grandes, para generar entre 358 y 1.792 tn de biocarbón mensuales, respectivamente. Los biocarbones a producir podrían ser empleados ya sea en aplicaciones agronómicas, o como materiales certificables secuestradores de carbono en el marco de acciones de empresas para disminuir su huella de carbono. En relación al co-producto gas de pirólisis, es propuesto para la generación de energía térmica. Para el caso del otro co-producto bio-oil, se proponen usos como biocida o como líquido protector de maderas, aunque debe consolidarse su empleo ya que es un producto altamente innovador y disruptivo.

Introducción

En Argentina, la actividad forestal se desarrolla en mayor medida en la región Mesopotámica. Allí se sitúa el 79% de la superficie de bosques cultivados con pino y eucalipto del país, que abastece la mayor parte del consumo nacional de madera que proviene de bosques cultivados (MAGyP, 2021). La industria del aserrado absorbe el 98% de la extracción total de madera, y el resto se destina a leña y postes. La principal característica del sector foresto industrial es el bajo rendimiento, donde una importante proporción de la materia prima se pierde como residuo (Mastrandrea y Vergara, 2010; Aguinalde Gonzales et al, 2019).

Es reconocido que las oportunidades en la cadena foresto industrial argentina se encuentran en la posibilidad de crecer en superficie forestada (hay una brecha importante entre la superficie actual y la potencial) y en avanzar en la industrialización mediante el aprovechamiento integral de todos los productos y subproductos (Mastrandrea y Vergara 2010; Morel, 2012; FAO 2021). Existen algunos antecedentes que indican que es posible desarrollar esquemas de biorrefinería a pequeña escala, adaptándose a aserraderos, lo cual permitiría aprovechar la disponibilidad de subproductos minimizando costos de transporte (Clauser, 2018). Ante esta escasa información disponible se ha hecho foco en el análisis de la posibilidad de emplear los subproductos (o residuos) de los aserraderos mesopotámicos en procesos de pirólisis para producir productos bio-basados de alto valor agregado.

Objetivo

Analizar la pre-factibilidad de desarrollar un proceso de conversión de los residuos de madera, por pirólisis, en el marco de la producción de biocarbones como material secuestrante de carbono, o para su uso agronómico. Se analiza dicha factibilidad en comparación con la combustión de los residuos en caldera para generación de calor, o la combustión en plantas para generación de energía eléctrica.

Estudio de pre-factibilidad

Para proceder con un estudio de factibilidad tendiente a desarrollar plantas de pirolisis para agregar valor a los subproductos de la industria forestal es necesario conocer: 1. La distribución y clasificación de los aserraderos, 2. Los tipos de subproductos y su disponibilidad, 3. El uso actual y potencial de los subproductos, y 4. La estrategia de intervención.

Seguidamente desarrollaremos estos aspectos. A partir de esto se evaluará la factibilidad técnica de implementar un proceso de pirólisis, llevando a cabo una comparación con otras conversiones termoquímicas, específicamente el empleo de calderas que usen los residuos como combustibles para la generación exclusiva de energía térmica y en calderas en procesos de cogeneración, CHP. Se evaluarán eficiencias de cada proceso, cuestiones ambientales asociadas, y se estimarán algunos costos aproximados de equipamiento (se analizarán equipamientos desarrollados por el sector privado o por el sistema científico nacional).

1. Distribución y clasificación de los aserraderos en la Mesopotamia Argentina

Las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos que conforman la Mesopotamia Argentina constituyen el nicho geográfico por excelencia de aserraderos a nivel nacional. La distribución de aserraderos en estas 3 provincias muestra patrones contrastantes (Figuras 1-3). En Misiones la localización de los aserraderos es bastante uniforme en la provincia, siendo ligeramente más concentrada en el sector oeste (sobre la Ruta nacional 12) y en la parte central de la misma (Figura 1). En Corrientes el asentamiento de aserraderos ocurre preferentemente cerca de las riberas de los ríos Paraná y Uruguay (Figura 2). Para el caso de Entre Ríos los aserraderos están ubicados principalmente en los departamentos de Concordia y Federación (Figura 3).

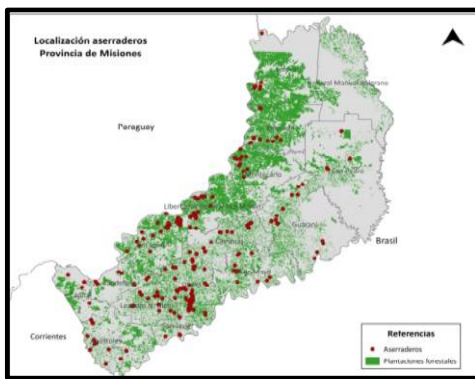


Figura 1. Mapa de distribución de los aserraderos en la provincia de Misiones (Ministerio de Agroindustria, 2018a)

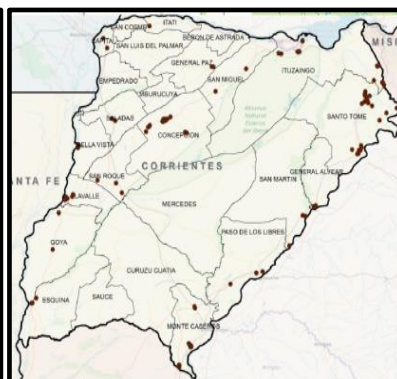


Figura 2. Mapa de distribución de los aserraderos en la provincia de Corrientes (Ministerio de Agroindustria 2018b).



Figura 3. Mapa de distribución de los aserraderos en la provincia de Entre Ríos (Ministerio de Agroindustria 2017a).

De acuerdo con su producción los aserraderos se clasifican en micros, pequeños, medianos y grandes (Tabla 1). Claramente la segmentación de aserraderos conforme su volumen de producción muestra que en Entre Ríos y en Corrientes la categoría más abundante corresponde a aserraderos pequeños, seguida de aserraderos medianos (Tabla 1). En Misiones, en cambio, la categoría más numerosa corresponde a aserraderos micros, seguida de aserraderos pequeños.

Tabla 1. Clasificación y cantidad de aserraderos conforme el volumen de producción anual en las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos.

Categoría	Producción anual	Número de establecimientos		
		Misiones	Corrientes	Entre Ríos
Micro	< 940 m ³	243	41	37
Pequeño	940 - 4.720 m ³	155	60	83
Mediano	4.720 - 23.585 m ³	32	42	56
Grande	> 23.585 m ³	8	7	2

Fuente: Ministerio de Agroindustria, (2017a, b); Ministerio de Agroindustria, (2018a,b).

2. Tipos de subproductos y su disponibilidad

La industria forestal es el sector de la actividad industrial que se encarga de la transformación física y química de la madera agregando valor y produciendo una gama amplia de productos diversos, como también de los consiguientes servicios de comercialización y transporte. El último relevamiento censal de los aserraderos en Argentina registra un total de 2.087 aserraderos distribuidos a lo largo de todo el país. La región mesopotámica representa un 37% del total, con industrias que se abastecen de bosques cultivados (Misirlian, 2019).

Además de la fabricación principal de productos de madera sólida, la industria del aserrado genera residuos o potenciales subproductos (Figura 4), dentro de los distintos procesos de tratamiento de la madera. Bajo condiciones establecidas, éstos son considerados productos de gran valor para la misma industria (viruta, costaneros, despuntes, cortezas, entre otros), que pueden ser utilizados para la generación de calor dentro del proceso de secado en los mismos aserraderos, energía para otros sectores, insumo de la industria de química básica o para la de madera triturable. En términos numéricos, de la materia prima que ingresa en los aserraderos entre el 45-55% es finalmente convertido en producto final, siendo el resto descartado (Mastrandrea y Vergara, 2010; Misirlian, 2019), por lo que un aproximado de 3,6 millones de toneladas de subproductos es descartado o quemado a cielo abierto (Misirlian, 2019).

En la Mesopotamia, la industria forestal engloba aserraderos que comercializan rollos, chips, tableros, tomando como insumos principalmente genotipos de los géneros *Pinus spp*, y *Eucalyptus spp*, siendo las especies más difundidas *P. tadea* y *E. grandis*, respectivamente. La Figura 4 muestra un esquema general de un aserradero estándar, las etapas de la producción y los subproductos que genera (FAO, 1991). Este último aspecto es el punto focal del presente trabajo, analizando las posibles vías de aprovechamiento para intentar agregar valor a los mismos.

En varios aserraderos queda sin aprovechar una gran fracción de los residuos, o bien se le da otro uso que difiere del energético. A modo de ejemplo pasemos a considerar la producción y disponibilidad de residuos en dos casos reales de aserraderos:

1. Un aserradero mediano de pino en Misiones procesó 4.331 tn de rollos de pino entre junio-noviembre (6 meses) de 2021, generó 1.264 tn de aserrín y 524 tn de viruta, consumiendo 1.000 tn en caldera propia. De este modo, el aserradero produjo aproximadamente un 40% de subproductos en base a la totalidad de los rollos y solamente un 16% de los mismos se emplearon en calderas. En este balance no está incluido el volumen de despuntes y otros residuos, que no se informan

2. Un aserradero en Entre Ríos que trabaja sólo con pinos produce 98.000 p²/mes (231 m³/mes) que representan 1.100.000 p²/año (2.594 m³/año). Si bien en esta provincia el género más difundido es *Eucalyptus sp*, se tomó este ejemplo ya que el informe se centra principalmente en *Pinus sp*. El rendimiento del aserradero es de 6.000 p²/día, en otros términos, 170 p²/tn de rollo. La producción y destino de los subproductos es el siguiente: costaneros: 150-160 tn/mes, son enviados a Arauco; aserrín: no está cuantificado, es enviado a horno de ladrillos en la zona de Lobos, Buenos Aires y viruta: no se genera pues no se hace cepillado de madera. El consumo eléctrico promedio del aserradero es 1.800 kw/h mensual y a pesar de contar con residuos, no genera ningún tipo de energía.

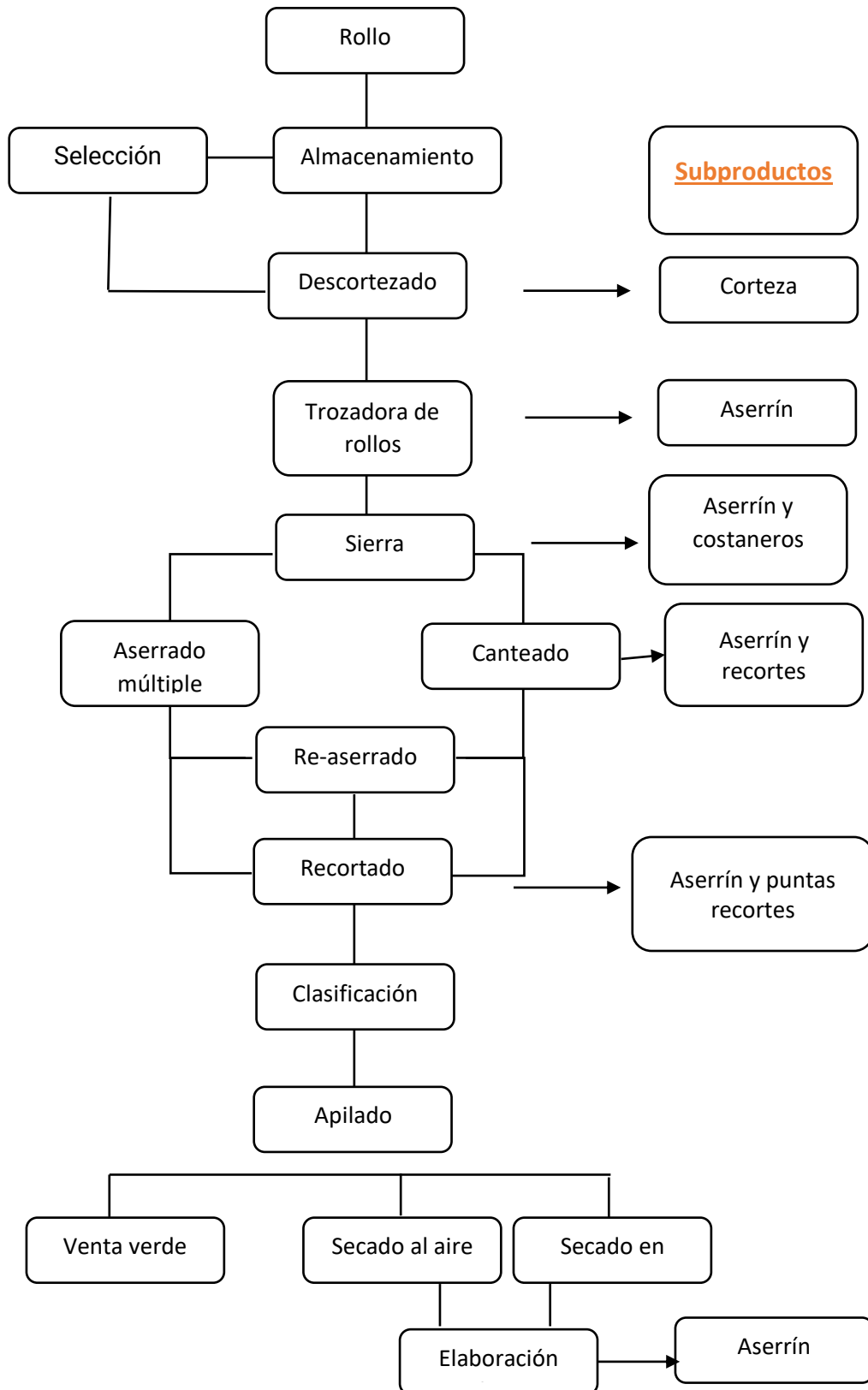


Figura 4. Etapas de la producción de un aserradero estándar. Las flechas indican los diferentes subproductos generados. Adaptado de FAO (1991).

3. Panorama actual del uso de los residuos forestales

a. Calderas en Aserraderos.

Uno de los destinos de los subproductos de los aserraderos en las provincias mesopotámicas es como combustible en calderas para la generación de calor a emplear en los procesos de secado de la madera (Uasuf y Hilbet, 2012; <https://www.argentinaforestal.com/2014/04/01/hay-faltante-de-chips-para-usar-en-calderas-de-indust>). Si bien esta fuente de energía es renovable, debe garantizarse una buena eficiencia de la caldera y que sus condiciones de funcionamiento sean buenas. Dado que la mayor parte de estas calderas corresponden a equipamientos de varios años de uso, con rendimientos bajos, la práctica de emplear los residuos de biomasa provenientes de aserraderos para generar calor se torna ineficiente, con lo que se desaprovecha su potencial.

b. Plantas de co-generación de energía.

En las plantas de co-generación de energía instaladas en la Mesopotamia el aprovechamiento de la biomasa tiene elevada eficiencia energética y las tecnologías son modernas. Las inversiones son elevadas, mayores a los 100 millones de U\$A, donde se involucran inversiones internacionales y programas nacionales de apoyo al desarrollo de energías renovables (RenovAR, 2016; Ministerio de Minería y Energía, 2017). En todos los casos se generan empleos directos (aproximadamente 30-40 puestos) e indirectos, que duplican los directos. Las centrales térmicas basadas en biomasa implican un gran desarrollo de la bioeconomía. La Tabla 2 (elaborada a partir de datos publicados por el Ministerio de Economía) muestra el listado de Plantas de energías renovables en operación comercial en la Mesopotamia.

La planta de co-generación establecida en Pindó está equipada con calderas de origen brasilero que se alimentan con residuos no aprovechados por el aserradero. Esta planta genera calor y energía eléctrica que se aprovechan en el aserradero. Además, los kwatt excedentes se vuelcan en el sistema interconectado nacional.

Otra planta de co-generación, la central térmica Generación Biomasa Santa Rosa, operada por Papelera Mediterránea /Lucena, se estableció en Santa Rosa, Corrientes. Equipada con

calderas Berkes, altamente eficientes, provistas de cámaras de combustión ciclónicas (similares a los hornos torsionales) lo que les brinda una alta eficiencia de la combustión de la biomasa, cercana al 90%. En este caso la energía eléctrica producida se genera consumiendo más de 700 tn diarias, 20.000 tn mensuales, de restos de materia orgánica de árboles, plantas y subproductos de la industria forestal, aserrín, costaneros, chips y raleos de montes provenientes de 16 aserraderos de la zona unificados en esta estrategia. La central térmica inyecta energía al sistema eléctrico provincial de Corrientes.

Las plantas de Alto Paraná, en Puerto Esperanza y Puerto Piray, en Misiones, se abastecen con residuos forestales de esta provincia y del norte de Corrientes. Alto Paraná (perteneciente al grupo Arauco) se autoabastece con la energía generada.

La planta Bm Mm Bioenergía (Molino Matilde Bioenergía)¹ ubicada en cerro Azul, Misiones, fue inaugurada a fines de agosto de 2021, y en promedio consume 50 toneladas de raleo y chips de la zona, con un 60% de abastecimiento de terceros.

Fuentes Renovables de Energía S.A. (FRESA) opera la Central Térmica Garruchos, localizada en Gobernador Virasoro, Corrientes. La planta cuenta con una potencia instalada de 40MWh, de los cuales se adjudican para volcar a la red 36 MWh. La planta acepta residuos de pino, eucalipto y grevillea, entre otras especies forestadas, que son recolectados dentro de un radio de 100km y consume aproximadamente 63 tn de biomasa /hora.⁴

Tabla 2. Plantas de generación de energía renovable a base de biomasa forestal en operación comercial en la Mesopotamia. P.A. Potencia Adjudicada. C.T. Central Térmica

Nombre del Proyecto	P.A. (MW)	Localidad - Provincia
C.T. Pindó Eco - Energía ²	2,00	Pto. Esperanza - Misiones
C.T. Generación Biomasa Santa Rosa ²	12,50	Santa Rosa - Corrientes

¹ <https://maderamen.com.ar/desarrollo-forestal/2021/11/22/molino-matilde-biomasa-forestal-en-misiones/>

² <https://www.minem.gob.ar/www/833/25871/precios-adjudicados-del-programa-renovar;>
[https://www.minem.gob.ar/energia-electrica/energias-renovables/prensa/26675/entro-en-operaciones-el-primer-proyecto-de-biomasa-forestal-del-renovar.](https://www.minem.gob.ar/energia-electrica/energias-renovables/prensa/26675/entro-en-operaciones-el-primer-proyecto-de-biomasa-forestal-del-renovar)

C.T. Alto Paraná ³	78,00	Pto. Piray y Pto. Esperanza - Misiones
C.T. Bm Mm Bioenergía ^{1,2}	3,00	Cerro Azul - Misiones
C.T. Garruchos ⁴	36,00	Gobernador Virasoro - Corrientes

c. Gasificación de biomasa.

Esta tecnología esta difundida mundialmente para la generación de energía eléctrica y térmica a partir de biomasa. Conforme nuestro conocimiento, no existen en la actualidad en la Mesopotamia gasificadores de biomasa, y sólo aparecen escasos ejemplos en el resto del país (Gasificador de cáscara de maní, de origen hindú, en Córdoba)⁴. Incluso se han importado equipos de gasificación que no lograron finalmente instalarse en Argentina⁵.

Los gasificadores presentan una alta eficiencia para convertir biomasa en energía eléctrica, y se adaptan a variados residuos (Anesini, 2011). El consumo de biomasa es elevado (aproximadamente 1 tn biomasa por hora para alimentar el gasificador) y son equipos que funcionan en forma continua, requiriendo aproximadamente 7.000 tn de biomasa por año. La principal desventaja de los gasificadores radica en que la biomasa a gasificar, si bien puede provenir de diferentes orígenes, debe presentar características adaptadas al equipamiento específico para lograr alta eficiencia en la generación de energía. Consecuentemente, no podría emplearse la totalidad de los residuos como materia prima para los gasificadores. Además, el elevado consumo de biomasa asociado al gasificador, sólo justifica su instalación cuando exista una producción elevada de residuos. De todas formas, se destaca la alta eficiencia de los gasificadores, y en principio se considera la tecnología por excelencia para la generación de energía eléctrica a partir de biomasa.

d. Pirólisis de residuos de biomasa.

La tecnología de pirólisis de residuos de biomasa no se encuentra difundida en nuestro país, pese a ser factible desde el punto de vista técnico y ser una tecnología que no genera impactos ambientales negativos. Los hornos de media naranja, que producen carbón vegetal a partir de leña, difundidos en el norte de nuestro país (Chaco principalmente) no serán

³ <https://www.argentinaforestal.com/2014/08/12/alto-parana-genero-78-mw-de-energia-limpia-y-renovable-en-el-primer-semestre-del-ano/>

⁴ Adriana Steckler, comunicación personal.

⁴ <https://www.energiaestrategica.com/un-pueblo-cordobes-inaugura-su-planta-electrica-que-utilizara-cascara-de-mani/>

⁵ <https://www.energiaestrategica.com/llega-a-la-argentina-un-novedoso-gasificador-con-tecnologia-de-punta-capaz-de-generar-energia-a-partir-de-cualquier-biomasa/>

considerados en este apartado, si bien su funcionamiento se basa en pirólisis (lenta). Esto se debe a que su tecnología es muy rudimentaria, se manipulan en forma muy artesanal, su eficiencia es muy baja y emplea leña en lugar de residuos como insumo⁶.

En Misiones se instalaron plantas de producción de biocarbón y co-productos mediante pirólisis de subproductos de aserraderos. Sin embargo, a pesar de generar productos de impacto, algunas de ellas no llegaron a ser sostenibles dado que con el tiempo los proveedores del aserrín elevaron su precio a montos que implicaron balances económicos negativos para estas plantas. Estos casos deben llamar nuestra atención, ya que son un ejemplo que se repite en lo que a procesos se refiere y plantas que usan los residuos como materia prima. Cuando no existen los procesos para convertir estos residuos en productos de valor, y la gestión de estos desechos no es propicia desde un punto de vista económico, y/o su disposición final es compleja, el costo de los residuos es nulo. Pero cuando se instalan plantas que consumen estos residuos y resultan rentables, los generadores de los mismos comienzan a darle un valor monetario, que incluso aumenta con el tiempo.

La planta Santa Ana⁷, en Misiones, corresponde a una biorefinería basada en la tecnología de pirólisis para la producción de biocarbón y licor de pirólisis (Bocchetto et al, 2020). De acuerdo a nuestra información no se encuentra activa. Resulta muy difícil obtener información en cuanto al volumen, tipo y procedencia de los residuos o maderas que dicha biorefinería planteaba originalmente usar, ni de las cantidades productos que se comercializarían. Si bien se han realizado consultas a los responsables, el acceso a la información es restringido.

Finalmente, se destaca que la reciente tendencia mundial de considerar al biocarbón de pirólisis como material alineado con acciones para mitigación ambiental podría contribuir a difundir en nuestro país la tecnología de pirolisis para la conversión de residuos biomásicos (Das et al, 2014).

⁶ <https://redforestal.conicet.gov.ar/una-mirada-a-la-cadena-de-valor-de-la-produccion-de-carbon-de-madera-en-la-argentina/>

⁷ <https://www.eltterritorio.com.ar/noticias/2014/05/24/390337-fertilizante-biocombustible-y-abono-a-partir-de-biomasa>.

4. Estrategia de intervención. Metodología

- *Cantidad de residuos*. Los casos que se analizan refieren a tres tipos de aserradero: (i) pequeño, (ii) mediano y (iii) grande. Los micro aserraderos no serán considerados directamente, ya que *a priori* se considera que lo más práctico es que éstos abastezcan con sus residuos a los casos (i), (ii) o (iii). Se tomarán como ejemplos, para (i) un aserradero pequeño de Entre Ríos, con una producción de 2.594 m³/año; para (ii) tres aserraderos pequeños en Corrientes con una producción total de 7.782 m³/año - como ejemplo de aserradero mediano - y para (iii) un aserradero grande de Misiones con una producción de 13.673 m³/6 meses (27.346 m³/año). Los tres aserraderos pequeños (ejemplo de aserradero mediano) están ubicados en un diámetro de 60 Km, de forma tal de minimizar los efectos negativos de la logística de transporte de los residuos, habida cuenta que la potencial instalación de la planta de conversión se haría en uno de los 3 aserraderos pequeños.

- *Conversión de los residuos de madera, por pirólisis, en biocarbones*. Se analiza dicha factibilidad en comparación con la combustión de los residuos en caldera para generación de calor, o la combustión en plantas para generación de energía eléctrica. Los análisis fisicoquímicos realizados sobre las muestras aportadas por INTA EEA Montecarlo son:

a. *Caracterización de diferentes especies de pino para usarlos como insumos en procesos de pirólisis*. Estos estudios comprenden principalmente análisis térmicos realizados en laboratorios del Sistema Científico Tecnológico Nacional. El material empleado es madera de pino obtenida de la parte externa de rollizos basales, o sea, no considera la médula.

b. *Evaluación de los rendimientos obtenidos por pirólisis a los tres productos de este proceso: biolíquido, biocarbón y gas de pirólisis*. Se destaca que algunas de estas medidas ya fueron realizadas por Casoni et al, (2021) en el caso de ***Eucaliptus grandis***. Se llevan a cabo las pirólisis de siete genotipos de pino: **F1**: Pino híbrido F1 (*P. elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*); **F2** pino híbrido F2 (F1 x F1); **PE** (*P. elliotii*); **PT** (*P. taeda*); **PCH** (*P. caribaea* var. *Hondurensis*); **F1 x PCH** (F1 x *P. caribaea* var. *Hondurensis*); **F1 x PE** (F1 x *P. elliotii*).

Se caracterizan los productos gas, líquido y biocarbón de experiencias seleccionadas:

- Los biolíquidos de las pirólisis se caracterizaron mediante medidas de pH y se analizó su composición química mediante cromatografía gaseosa acoplada a detección por espectroscopía de llama (cromatógrafo Perkin Elmer Claurus). El pH medido en todos los líquidos fue ácido, con valores entre 3 y 3,2, que corresponden a los valores normalmente medidos en líquidos de pirólisis de residuos lignocelulósicos.
- La caracterización de carbón se realiza mediante análisis elemental (en un equipo Exeter Analytical CE-440), para determinar % de C, H, O y N, valores empleados para el cálculo del poder calorífico inferior de las muestras.
- Se determina el contenido de cenizas en el biocarbón a partir de análisis térmicos, (DTG en un equipo TA Instrument Discovery- TGA5500). Esta determinación se realizó mediante análisis térmicos por DSC en atmósfera de aire (en el mismo equipamiento nombrado anteriormente), determinando la masa de la madera que permanece sin combustionar a 800°C.
- Las pirólisis se llevaron a cabo a 500°C y bajo flujo de nitrógeno (para más detalles ver en Casoni et al, 2021).
- Las propiedades del gas se estiman indirectamente a través de las características químicas de los otros productos líquido y carbón.
- La caracterización de las maderas se completó con los Análisis Termogravimétrico (TGA) y Análisis Térmico Diferencial (DTG) en atmósfera de nitrógeno para obtener información en cuanto a la descomposición térmica en ausencia de aire para alguna de las muestras. Estos estudios son complementarios a los de pirólisis, permitiendo análisis en condiciones muy controladas a partir de los cuales se pueden efectuar comparaciones precisas. Además, se logra determinar la cantidad de carbono fijo y volátil. Los ensayos se realizaron en un equipo TA Instrument Discovery- TGA5500. Las muestras de 10 mg aproximadamente fueron purgadas en nitrógeno durante 20 min para la eliminación de oxígeno, y luego fueron calentadas desde temperatura ambiente hasta 900°C, conforme una rampa de 10°C/min.
- Análisis de las muestras por sortimetría de N₂. Este estudio se realiza en un equipo Quantachrome Nova e para determinar el área específica expuesta de los biocarbones obtenidos de las pirólisis de las diferentes muestras. La misma se calcula por el método BET y se reporta como S_{BET}.

Factibilidad del desarrollo de plantas de pirólisis para la valorización de desechos de la industria forestal

En forma general y del análisis de la información volcada en los párrafos anteriores, principalmente en el punto “*Panorama actual del uso de los residuos forestales*”, se deduce que, si bien existe un aprovechamiento de los subproductos de los aserraderos para generar energía térmica para propio uso o en centrales térmicas para la generación de energía, sigue disponible y sin aprovechar una gran cantidad de recursos biomásicos. Por otra parte, es importante señalar que las centrales térmicas para la generación de energía eléctrica como Pindó o Santa Rosa son de gran envergadura, instaladas gracias a elevadas inversiones. Así, en este escenario, los procesos de pirólisis se contextualizan asociados a consumos relativamente bajos/medianos de biomasa y a inversiones mucho menores a las correspondientes a las centrales térmicas. A partir de estos comentarios se deduce que la factibilidad de contar con biomasa de maderas para pirolizar es elevada.

1. Pirólisis a escala banco. Caracterización de las maderas.

En particular, para este informe se analizaron especies de pino comunes en la Mesopotamia. En la Tabla 3 se detallan los rendimientos a los productos biolíquido, biocarbón y gas de pirólisis para todos los casos. Se muestran datos correspondientes a *Eucalyptus grandis* a fines comparativos.

Tabla 3. Rendimiento a los tres productos de pirólisis, gas, biolíquido y biocarbón. Contenido de cenizas (Cen), carbono volátil (Cvol)

Genotipo	%				
	Gas	Biolíquido	Biocarbón	Cen.	C vol.
F1	31	26	43	2,1	73,1
F2	32	26	42	0,8	72,7
PCH	30	30	40	0,3	76,7
PE	35	25	40	0,3	74,5

PT	32	27	41	0,2	75,0
F1x PCH	33	25	42	0,2	77,5
F1x PE	33	27	40	0,8	76,4
<i>E. grandis</i>	30	26	44	0,5	75

F1: Pino híbrido F1 (*P. elliottii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*); **F2** pino híbrido F2 (F1 x F1); **PE** (*P. elliottii*); **PT** (*P. taeda*); **PCH** (*P. caribaea* var. *Hondurensis*); **F1 x PCH** (F1 x *P. caribaea* var. *Hondurensis*); **F1 x PE** (F1 x *P. elliottii*).

En pinos, el rendimiento a biocarbón (40-43%) fue el mayor, seguido de gas (30-35%) y biolíquido (25-30%). Los rangos demuestran que la fracción sólida resultó ser la de menor variación (Tabla 3). Estos valores no son significativamente diferentes a los correspondientes a otros materiales lignocelulósicos (especies de pinos, residuos de poda municipal, cáscara de girasol, salvado de trigo, bagazo de caña, marlo de maíz, entre otros) analizados por el grupo de investigación que realizó este informe.

2. Análisis termogravimétrico.

A partir de las curvas obtenidas en el análisis termogravimétrico (DSC/TGA) realizado bajo atmósfera inerte (Figura 5), se calcularon varios parámetros de los materiales, que se reportan hasta 500°C. Esto está relacionado con la biomasa que sería potencialmente pirolizable a esa temperatura y que se reporta en la última columna de la Tabla 3. A modo de ejemplo se describirá el comportamiento del material PT-6 que se muestra en la Figura 5. La primera etapa corresponde a una pérdida de masa (6,4%) por deshidratación y está asociada al contenido de humedad que presenta este material. En la gráfica correspondiente a la derivada de la pérdida de peso, dicho fenómeno presenta un pico a los 77,22°C. La segunda fase de pérdida de peso (entre 200°C – 400°C) es debida a la degradación de los componentes de las muestras (celulosa, hemicelulosa y lignina). Las temperaturas teóricas de descomposición térmica, de estos compuestos orgánicos, son: 260 °C - 280 °C (celulosa), 220 °C - 315 °C (hemicelulosa) y 200 °C - 700 °C (lignina) (Contreras-Valero et al, 2017). En la curva se observa que a 200 °C empieza la degradación del material, evidenciando un pico

en la curva de la derivada a los 363,76°C, con un hombro a más baja temperatura. A estas dos señales se les corresponde la mayor pérdida de masa (63%) atribuida a la descomposición de la holocelulosa y de la celulosa (su componente mayoritario). Se acepta generalmente que el principal pico de la curva DTG es producido por la volatilización de la celulosa (alrededor de 350 °C). La lignina presenta degradación térmica en un amplio rango de temperatura (Collard et al, 2016), aunque en las curvas DTG las pérdidas a partir de los 400°C se asignan prácticamente sólo a este compuesto. El aporte del análisis térmico es de suma importancia ya que permite conocer la temperatura óptima de pirólisis del material. En este sentido, si se emplean temperaturas por debajo de los 365°C no se degradará completamente la celulosa, y la lignina permanecería prácticamente inalterada. La temperatura de pirólisis seleccionada para este trabajo, de 500°C, garantiza que prácticamente toda la biomasa se degrada térmicamente.

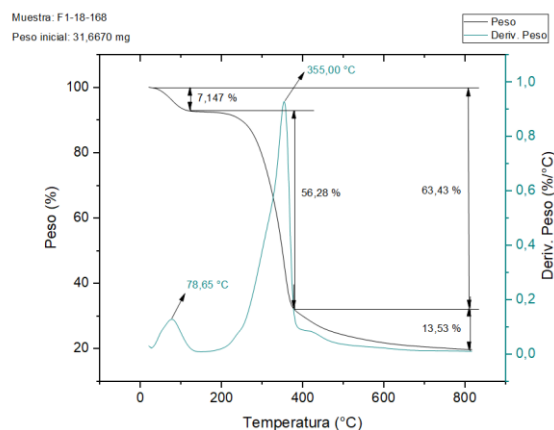
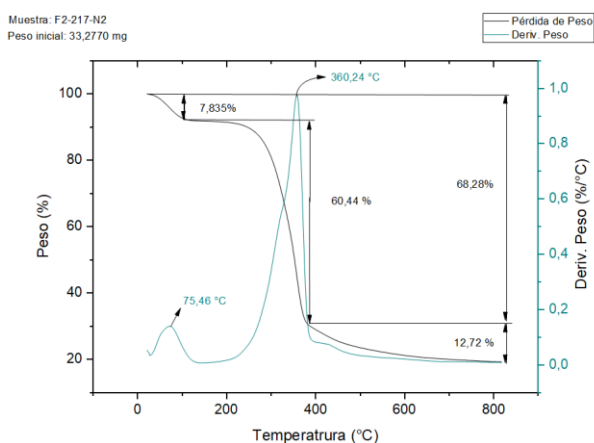
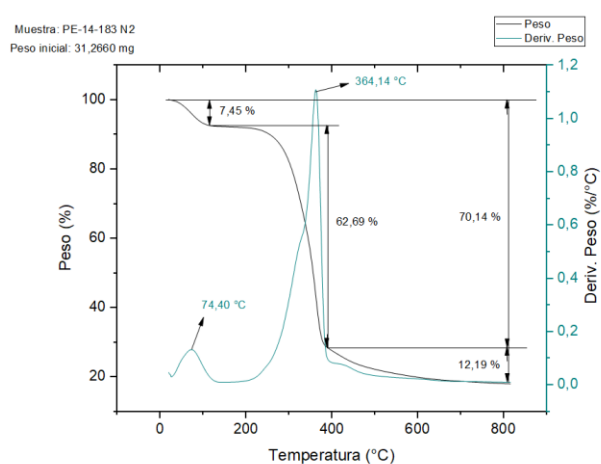
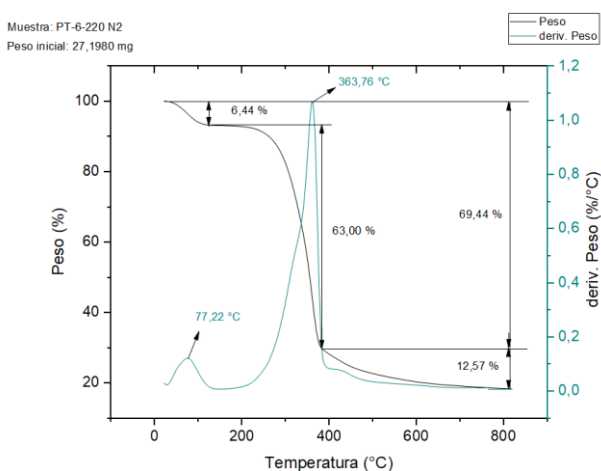


Figura 5. Perfil DSC/TGA de las muestras de maderas de pino en estudio. Desde arriba, hacia abajo (a) PT (*P. taeda*), (b) PE (*P. elliotii*), (c) F2 (F1 x F1), (d) F1 (*P. elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*).

En cuanto a la determinación de cenizas, dado que la concentración y naturaleza de las mismas tiene marcada influencia en las propiedades de los biocarbones de pirólisis, se hace notar que la muestra de pino F1 (*P. elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*). presenta una elevada cantidad. De acuerdo a experiencias previas del grupo de trabajo esto llevaría a un bajo rendimiento a líquido. Sin embargo, esto no fue observado en los experimentos de pirólisis, como se concluye de los valores de la Tabla 3.

3. Caracterización del biolíquido.

La Figura 6 muestra un cromatograma típico correspondiente al biolíquido proveniente del pirólisis de la muestra F1 (*P. elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*). Se observan los compuestos tradicionales de líquidos de pirólisis de materiales lignocelulósicos: ácido acético, furfural, metoxifenoles, entre otros compuestos oxigenados. No se detectan diferencias notables entre los líquidos de las diferentes muestras. En todos los casos los compuestos mayoritarios son el ácido acético y el furfural (Figura 6, tiempos 4.89 y 7.58 min, respectivamente). Se detectan varios metoxifenoles, entre ellos, siringol y guayacol en tiempos de retención superiores a 11 min.

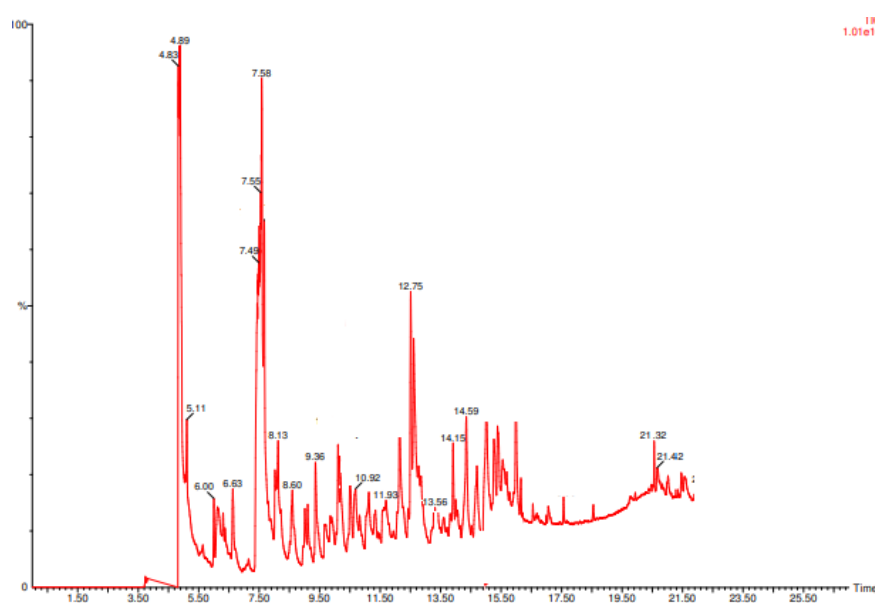


Figura 6. Cromatograma correspondiente al biolíquido del pirólisis de la muestra F1 (*P. elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*)

A pesar de que los compuestos presentes en concentraciones relativamente elevadas poseen un valor comercial, no es factible técnicamente separarlos del bio-líquido, por lo que desde el punto de vista práctico el mismo no es una fuente de productos químicos de alto valor. El biolíquido es, además, corrosivo e inestable al almacenamiento. Se considera que podría ser usado en aplicaciones que, si bien no están ampliamente consolidadas, han comenzado a ser estudiadas y reportadas en la literatura abierta. Un ejemplo de ello es el uso de los biolíquidos como biocidas o protectores de maderas ante el ataque de insectos (Urrutia et al, 2022).

El biolíquido presenta un poder calorífico aceptable para ser usado como combustible líquido, especialmente para formar parte de mezclas con combustibles fósiles tradicionales de corte fuel oil. Esta posibilidad sería de alto impacto, y puede avizorarse una aplicación concreta: la constitución de blends biolíquido/fuel oil para ser empleados en la generación de energía en plantas termoeléctricas. Estos blends presentarían un porcentaje de líquidos de origen renovable y así su Huella de Carbono sería menor a la del fuel oil puro. Los blends podrían asociarse a acciones en la lucha contra el cambio climático. Esta práctica permitiría la disposición final del líquido y a la vez se aprovecharía su poder calorífico, que si bien es bajo no impacta negativamente al ser añadido en la calidad de los combustibles fósiles. Se destaca también que el grupo de investigación que llevó a cabo este informe ha analizado y caracterizado blends de biolíquidos y fuel oil llegando a resultados que avalan las conclusiones recién comentadas. Los principales resultados de la caracterización fisicoquímica de los biocarbones de tres muestras de pino se exhiben en Tabla 4.

Tabla 4. Algunas propiedades fisicoquímicas de biocarbón proveniente de pirólisis de muestras de pino. Carbono fijo (C fijo), área superficial específica (SBET), poder calorífico (PCS).

Biomasa	C fijo (%)	SBET (m²/g)	Cenizas (p/p%)	PCS* (MJ/kg)	pH
F1	67,1	6	4,8	30,2	7

PE	68,5	4	0,8	31,3	6
PT	70,2	4	0,5	32,0	6

*determinado a partir de la % de C, H, O, N determinada por Análisis Elemental. F1 Pino híbrido F1 (*P. elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*); PE (*P. elliotii*); PT (*P. taeda*).

El porcentaje de carbono fijo en los biocarbones es notoriamente mayor al correspondiente a las maderas que le dieron origen (Cf. Tablas 3 y 4). El resultado es esperable, ya que la pirólisis disminuye notoriamente el carbono volátil, transformando la biomasa en un material recalcitrante y más estable. El valor elevado de carbono fijo indica la potencialidad que presentan estos biocarbones para considerarse sumidero de carbono, materiales en los que la concentración elevada de carbono fijo es deseable. Esta propiedad indica que en el caso de una producción a gran escala de biocarbón a partir de las maderas de pino o de sus aserrines para su aplicación en suelos se constituye en una metodología para reducir las emisiones de CO₂ equivalente, mitigando efectos del cambio climático. Por supuesto que a esto se le agrega el efecto benéfico que podrían presentar los biocarbones sobre características del suelo y el crecimiento vegetal.

Aunque no son importantes las diferencias se rescata que el biocarbón proveniente de PT (*Pinus taeda*) presenta el valor más alto de C fijo, mayor poder calorífico y menor % de cenizas. El área superficial específica, SBET, (Tabla 4) se encuentra en el orden observado para biocarbones obtenidos de gran variedad de biomásas (Casoni et al, 2021). Este valor de área se asocia a una porosidad muy superior a la de la madera o los aserrines correspondientes.

La concentración de cenizas es elevada en F1 (*P. elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*) (Tabla 4). El análisis por difracción de rayos X, XRD de este biocarbón indicó la presencia de compuestos de K, Mg y Ca que resultarían benéficas si se considera la disposición de los biocarbones en suelos, dado su efecto fertilizante. Debe señalarse que el análisis por XRD también detectó la presencia de especies de silicio. La presencia de especies de K y Ca se asocia con cenizas de bajo punto de fusión, lo que indicaría que estos materiales (al igual

que las maderas que le dan origen) presentarían propiedades negativas para su uso en calderas.

Finalmente, en cuanto al poder calorífico, que se muestra en la Tabla 4 en la columna PCS, los valores son elevados para todos los biocarbones y mucho mayores que los correspondientes a las maderas que les dieron origen, como es de esperar. Se destaca que los valores de poder calorífico de los biocarbones provenientes de los pinos analizados están en el rango 32-30 MJ/kg, siendo mayores al PCS del *E. grandis* (27,4MJ/kg).

En cuanto al producto gaseoso del pirólisis, el mismo no fue analizado químicamente. Sin embargo, a partir de las composiciones químicas medidas en los biolíquidos y biocarbones se deduce que el gas de pirólisis es de naturaleza similar a un gas pobre, en cuanto a poder calorífico se refiere. Así, su uso podría vincularse con la generación de energía térmica, con tecnologías simples, pudiéndose emplear para el secado en el aserradero donde se origina.

4. Usos factibles de los productos de pirólisis para aserraderos chicos, medianos y grandes.

Tomemos el caso de un aserradero pequeño de cualquiera de las provincias de la Mesopotamia, asumiendo que el producto de interés es el biocarbón a emplear como sumidero de carbono. La totalidad de los subproductos que genera a partir de las maderas de pino, asciende a aproximadamente un 40% de la producción. En consecuencia, los subproductos pueden asumirse del orden de las 1000 tn (valor elegido dentro del rango que se muestra en Tabla 1). Considerando que los rendimientos medidos en este informe a escala banco son reproducibles a escalas mayores y tomando como ejemplo al pino correspondiente a la muestra F1 (*P. elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*) (Tabla 3), se llegaría a la producción de más de 400 tn de biocarbón.

De la misma forma se calculó el CO₂ evitado tomando al biocarbón como sumidero de carbono para un aserradero mediano y uno grande (se consideraron producciones promedio de 10.000 tn y 50.000 tn, respectivamente). Se consideró para los tres casos que la producción del biocarbón se realizó en el mismo aserradero, evitando así emisiones asociadas a transporte de biomasa que son relativamente elevadas. Los valores calculados

que aparecen en la Tabla 5 son estimativos y no se ha tenido en cuenta las emisiones originadas por la producción, basándose en la aproximación conocida como “zero burden approach” (Casoni et al, 2021b), que si bien no resulta detallada brinda una tendencia general de gran utilidad.

La producción del biocarbón se acompaña de la de biolíquido y gas. El gas sería usado en el mismo aserradero, a fines de generar energía térmica, vía la instalación de equipamiento de baja complejidad. El biolíquido no es un producto que en la actualidad presente mercado y debe investigarse su aplicación y potencialidades económicas mediante un plan de negocios específico, teniendo en cuenta las aplicaciones comentadas.

Tabla 5. Producción de biocarbón en aserraderos de la Mesopotamia y CO₂ evitado anualmente, asociado a sumidero de carbono.

Tipo de aserradero	ktn biocarbón	tnCO₂ evitado
Pequeño	0,43	1.005
Mediano	4,30	10.050
Grande	21,50	50.250

*en el cálculo se empleó el valor de carbono fijo reportado en Tabla 4

Dado el volumen de biomasa disponible/biocarbón producido por un aserradero pequeño o uno mediano, no sería conveniente el desarrollo de un proceso de pirólisis continuo o semicontinuo. Por el contrario, debería considerarse un proceso de pirólisis empleando un reactor batch, más apropiado para esos volúmenes de producción. En este sentido existen tanto reactores comerciales de tecnología extranjera, como desarrollos locales que tornan factible la instalación del proceso en el mismo aserradero. Un cálculo estimativo de la inversión en el equipamiento, considerando un desarrollo local, indica costos entre 100 y 200 mil U\$A.

En el caso de un aserradero grande y considerando 50 mil tn de biomasa a convertir, se llega aproximadamente a 200 tn diarias de biomasa a pirolizar. Por lo tanto, la planta de pirólisis es de mayor envergadura, pudiéndose considerar un proceso continuo. Existen tecnologías comerciales continuas que podrían también aplicarse en los aserraderos grandes. Las inversiones son mucho más elevadas que para el caso de los aserraderos pequeños y

medianos. Al tratarse de equipamiento a ser importado, el cálculo de la inversión se torna difícil, ya que el valor final del equipamiento ya nacionalizado depende fuertemente de las regulaciones vigentes que deben evaluarse al momento de la compra.

La comparación de los procesos de pirólisis con la conversión de los residuos en plantas térmicas para la generación de calor y energía (CHP) es difícil de llevar a cabo respecto de su rédito económico.

Consideraciones finales

- La biomasa proveniente de los pinos analizados contiene cenizas de bajo punto de fusión, propiedad negativa para su uso en calderas, principalmente en las de hornos torsionales. Por otro lado, estas cenizas son fijadas en el proceso de pirólisis en el biocarbón, brindando una fuente de nutrientes para el uso de este material como fertilizante en suelos.
- Las calderas de última tecnología (como por ejemplo las Berkes) que generan vapor en las centrales térmicas son altamente eficientes y se asocian con una baja huella de carbono. La producción de co-productos (alquitranes y cenizas) es relativamente baja. Por el contrario, la pirólisis genera líquidos con rendimientos relativamente elevados, cuyo uso aún no se encuentra consolidado, siendo éstos un producto disruptivo.
- La tecnología de pirólisis en Argentina no se encuentra consolidada, aunque se avizora que lo estará en un futuro cercano.
- Otros usos del biocarbón son altamente factibles, aunque no hayan sido analizados en profundidad en este informe. Uno de ellos es el empleo de biocarbones en la industria del acero.

- El biolíquido además es corrosivo e inestable al almacenamiento. Se identifican como posibles usos: combustible (especialmente para formar parte de mezclas con combustibles fósiles tradicionales de corte fuel oil) y biocidas o protectores de maderas ante el ataque de insectos (aplicaciones que aún no están ampliamente consolidadas, pero que sí han sido comprobadas).
- Si bien el estudio presente se refiere a biomasa proveniente de especies de pino, muchos de los resultados son extrapolables a otras maderas, por lo que el pirólisis puede llevarse a cabo para mezclas de maderas o aserrines de diferentes especies. Más aun, las restricciones en cuanto a la calidad de la biomasa (química y física) para la pirólisis son mucho menores que para el uso de la biomasa en calderas, siempre y cuando se considere una alta eficiencia del proceso.

Referencias

- Aguinaldes Gonzales, et al, 2019. Producción de Pellet de madera a base de residuos y subproductos de la industria forestal. UTN Facultad Regional de La Plata. 212p. <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/4222/Producci%C3%B3n%20de%20pellet%20de%20madera%20a%20base%20de%20residuos%20y%20subproductos%20de%20la%20industria%20forestal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Anesini, A. 2011. El gas de biomasa puede ser rentable para industrias. APIE Informa Boletín periódico bimensual, Número 18, 2011. <http://www.apie.com.ar/Boletines/boletin-18/biomasa.html>.
- Bocchetto, R., Gauna, D., Bravo, G., González, C., Rearte, M., Molina Tirado, L., Hilbert, J., Eisenberg, P., Lecuona, R., Taraborrelli, D., Papagno, S., Vaudagna, S. (2020). Bioeconomía del Norte Argentino: situación actual, potencialidades y futuros posibles. Proyecto "Bioeconomía Argentina: Construyendo un Futuro Inteligente y Sustentable para el Norte Argentino 2030". MINCyT INTA-INTIUNNE-UNSa-UNSE. Documento de Trabajo. Buenos Aires.
- Casoni, A. 2017. Pirólisis de biomasa residual abundante en la región sur de la Provincia de Buenos Aires para la obtención de productos de alto valor agregado. Tesis de Dr en química. Universidad Nacional del Sur, 143p.
- Casoni, A.; Volpe, M. A.; Acevedo, A.; Marinangeli, P.; Oberschep, J.; Harrand, L.; Gyenge, J.; Saelleses, L.; Lupi, A.M. 2021a. Biocarbones y coproductos por pirolisis en especies y clones de Eucalyptus: Pimeros resultados. XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos, octubre de 2021, Concordia, Entre Ríos. 5p.
- Casoni, A.; Gutierrez, V.; García, J.M.; Cabada, S.; Acevedo, A.; Volpe, M.A. 2021b. Pyrolytic coproduction of biochar and furfural from abundant agro-industrial wastes. Brazilian Journal of Chemical Engineering. <https://doi.org/10.1007/s43153-021-00167-6>.

- Clauser, N.M. 2018. Estudio técnico-económico de la biorrefinería de los residuos de la industrialización primaria de la madera y agroindustriales. Tesis presentada a la facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la Universidad Nacional de Misiones para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Aplicadas. 224p. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/79879/CONICET_Digital_Nro.dc7f6012-494d-4217-8e73-8476decf3cba_B.pdf?isAllowed=y&sequence=6
- Contreras-Valero, Y.; Cardona-Rodríguez, Y.; Torres-Sánchez, D.A. 2017. Estudio térmico e infrarrojo de cinco tipos de madera comercializadas en Norte de Santander, para su posible uso como fuente de energía”, *Respuestas*, 22(2) 36-47.
- Das, Sh. K.; Avasthe, R.K; Singh, R.; Babu, S. 2014. Biochar as carbon negative in carbon credit under changing climate. *Current Science* 107(7). https://www.researchgate.net/profile/Ravikant-Avasthe/publication/266861108_Biochar_as_carbon_negative_in_carbon_credit_under_changing_climate/links/606e8a624585150fe98ff782/Biochar-as-carbon-negative-in-carbon-credit-under-changing-climate.pdf.
- FAO, 1991. Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales. 93 <https://www.fao.org/3/T0269S/T0269S00.htm>
- FAO. 2020. Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N.º 18. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8031es>
- MAGyP. 2021. Visor <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/inventarios/tablero.php>
- Mastrandrea, C.; Vergara, L. 2010. Diagnóstico del sector de transformación primaria de la madera en la región noreste de Entre Ríos, Año 2019. XXIV Jornadas forestales de Entre Ríos, Concordia, octubre de 2010
- Ministerio de Agroindustria, 2017a. Censo Nacional de Aserraderos 2015. Informe del relevamiento censal en la provincia de Entre Ríos-Región Mesopotámica..
- Ministerio de Agroindustria, 2017b. Inventario Nacional de Plantaciones Forestales, Inventario forestal permanente de los bosques implantados en Entre Ríos-Area Continental. Diciembre 2017.35p
- Ministerio de Agroindustria, 2018a. Censo Nacional de Aserraderos. Informe de relevamiento censal en la provincia de Misiones, Marzo, 47p.
- Ministerio de Agroindustria, 2018b. Censo Nacional de Aserraderos. Informe de relevamiento censal en la pcia. de Corrientes, Censo Aserraderos, Enero, 32p.
- Ministerio de Economía. Plantas de energías renovables en operación comercial. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/plantas-de-energia-renovable>.
- Ministerio de Minería y Energía. 2017. <https://www.minem.gob.ar/energia-electrica/energias-renovables/prensa/26675/entro-en-operaciones-el-primer-proyecto-de-biomasa-forestal-del-renovar>
- Misirlían, E. 2019. Análisis del complejo foresto industrial maderero en Argentina. Número 66, ISSN: 2618-494X CERE - Centro de Economía Regional. Escuela de Economía y Negocios, Universidad Nacional de San Martín.
- Morel, I.J. 2012. Aprovechamiento sustentable de los residuos forestales en la provincia de Entre Ríos. XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, Entre Ríos. Octubre 2012. 7p. https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2012/trab_res_pos/540.15.TE.Morel.pdf

- RenovAR 2016. Plan de Energías Renovables en Argentina. <https://portalweb.cammesa.com/Documentos%20compartidos/Noticias/RenovAr/RenovAR%20%20Resumen%20Preliminar%20de%20Ofertas%20Recibidas.pdf>. 13p.
- Urrutia, R.; Gutierrez, V.; Stefanazzi, N.; Volpe, M.; Werdin González J. 2022. Pyrolysis liquids from lignocellulosic biomass as a potential tool for insect pest management: a comprehensive review. *Industrial Crops*, 177, 114533, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114533>
- Uasuf, A.; Hilbert, J. 2012. El uso de la biomasa de Origen Forestal con destino a bioenergía en la Argentina. Informes Técnicos Bioenergía Año 1 Ediciones INTA. 50p. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_uso_de_biomasa_forestal_para_bioenergia.pdf



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina

