



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura

Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo

COLECCIÓN
INFORMES
TÉCNICOS

N.º 7



Secretaría de Energía
Ministerio de Hacienda
Presidencia de la Nación



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación

Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo

COLECCIÓN INFORMES TÉCNICOS N.º 7

FAO. 2019. *Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo*. Colección Informes Técnicos N.º 7. Buenos Aires.

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISBN 978-92-5-132013-6

© FAO, 2019



Algunos derechos reservados. Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales.; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es>.

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente, como se indica a continuación. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: "La presente traducción no es obra de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en inglés será el texto autorizado".

Toda mediación relativa a las controversias que se deriven con respecto a la licencia se llevará a cabo de conformidad con las Reglas de Mediación de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI) en vigor.

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización (<http://www.fao.org/publications/es>) y pueden adquirirse dirigiéndose a publications-sales@fao.org. Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: www.fao.org/contact-us/licence-request. Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: copyright@fao.org.

Este documento fue realizado en el marco del Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG), iniciativa de los siguientes ministerios:

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca

Luis Miguel Etchevehere
Ministro de Agricultura, Ganadería y Pesca

Andrés Murchison
Secretario de Alimentos y Bioeconomía

Miguel Almada
Director de Bioenergía

Ministerio de Hacienda

Jorge Roberto Hernán Lacunza
Ministro de Hacienda

Gustavo Lopetegui
Secretario de Gobierno de Energía

Sebastián A. Kind
Subsecretario de Energías Renovables

Maximiliano Morrone
Director Nacional de Promoción
de Energías Renovables

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Hivy Ortiz Chour
Oficial Forestal Principal
Oficina Regional América Latina

Francisco Yofre
Oficial de Programas
Oficina Argentina

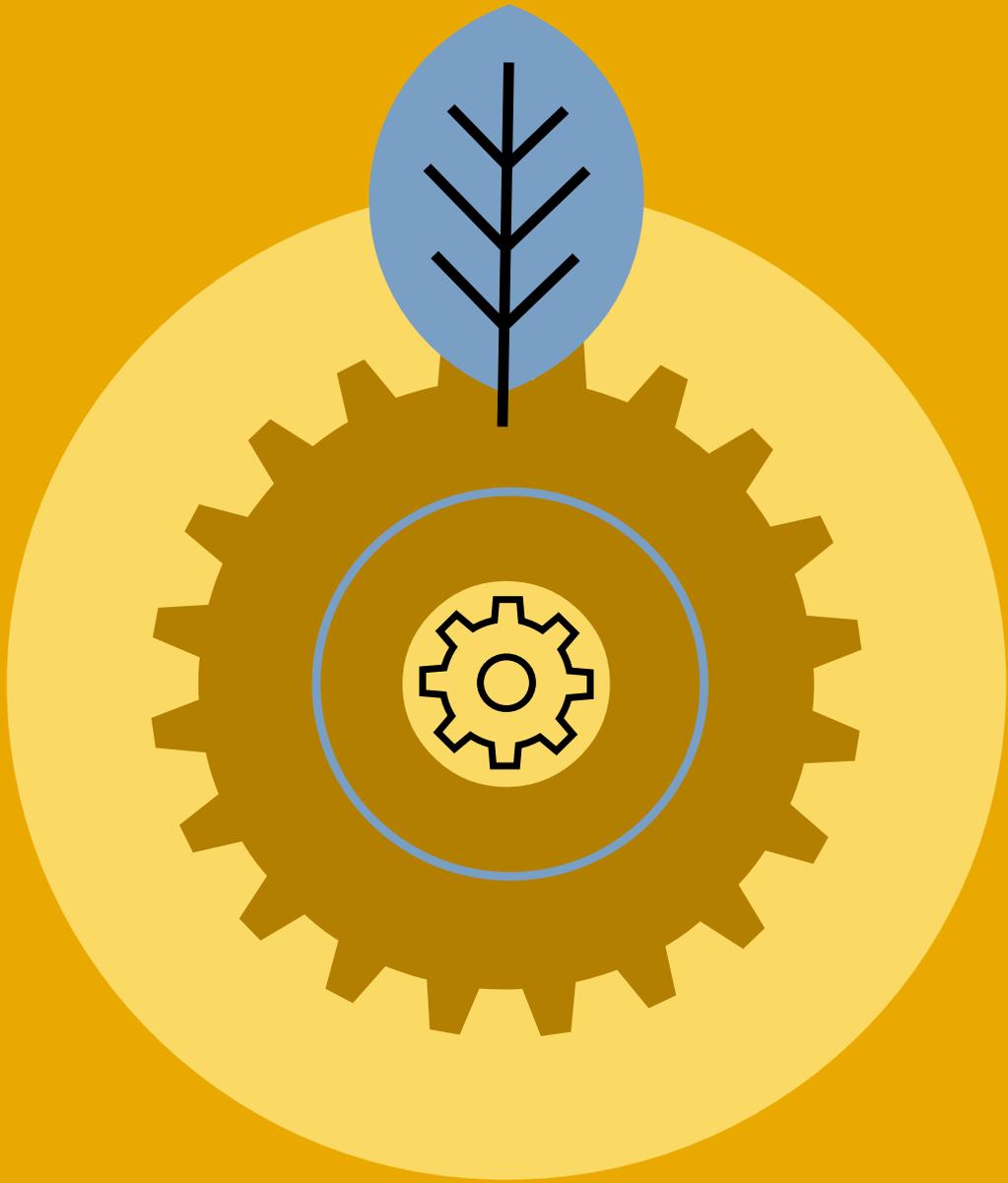
Andrés C. Körte
Autor

Verónica González
Coordinación Colección

Sofía Damasseno
Colaboración Colección

Marisol Rey
Edición y corrección

Mariana Piuma
Diseño e ilustraciones



ÍNDICE

Prólogo	ix
Agradecimientos	xi
Siglas y acrónimos	xiii
Unidades de medida	xiii
Resumen ejecutivo	xv

1.

Introducción	1
--------------	---

2.

Biomasa	2
2.1 Denominación de biomasa	2
2.1.1 Biomasa residual	3
2.1.2 Biomasa del sector de la industria forestal	4
2.1.3 Biomasa de montes forestales	4

3.

Contexto energético	5
---------------------	---

4.

Contexto de la producción forestal en la Argentina	7
4.1 Distribución de masas forestales	7
4.2 Cadena forestal	7
4.3 Aprovechamiento de montes forestales	10

5.

Localización del estudio	11
5.1 Corrientes	11
5.2 Misiones	12

6.

Estructura de la zona de estudio	13
6.1 Desarrollo de los actores principales	13
6.2 Experiencias locales	14
6.2.1 Empresa industrial	14
6.2.2 Contratista de servicios	15

7.

Tecnologías para la cosecha y extracción de la biomasa forestal	16
7.1 Tecnología utilizada en Europa	16
7.1.1 Primer raleo de árbol entero	16
7.1.2 Raleo combinando rollo con biomasa	17
7.1.3 Raleo o tala rasa astillado en la vía de saca y transporte a cancha	17
7.1.4 Armado y sacado de paquetes de rama	17
7.2 Tecnología local	17
7.2.1 Podas	17
7.2.2 Raleos	17
7.2.3 Tala rasa	18

8.

Justificación del estudio	21
8.1 Aprovechamiento de la tala rasa	21
8.2 Esquemas de extracción propuestos	22
8.3 Aprovechamiento de raleo	24

9.

Cálculo de costos directos	26
9.1 Costo desagregado por modelo	26
9.2 Flujo financiero	29
9.3 Cálculo del flujo de fondos	30
9.4 Fletes a destino	32

10.

Secado de la biomasa residual	34
--------------------------------------	-----------

11.

Biomasa en función de la energía	35
---	-----------

12.

Conclusiones	38
---------------------	-----------

Bibliografía	40
---------------------	-----------

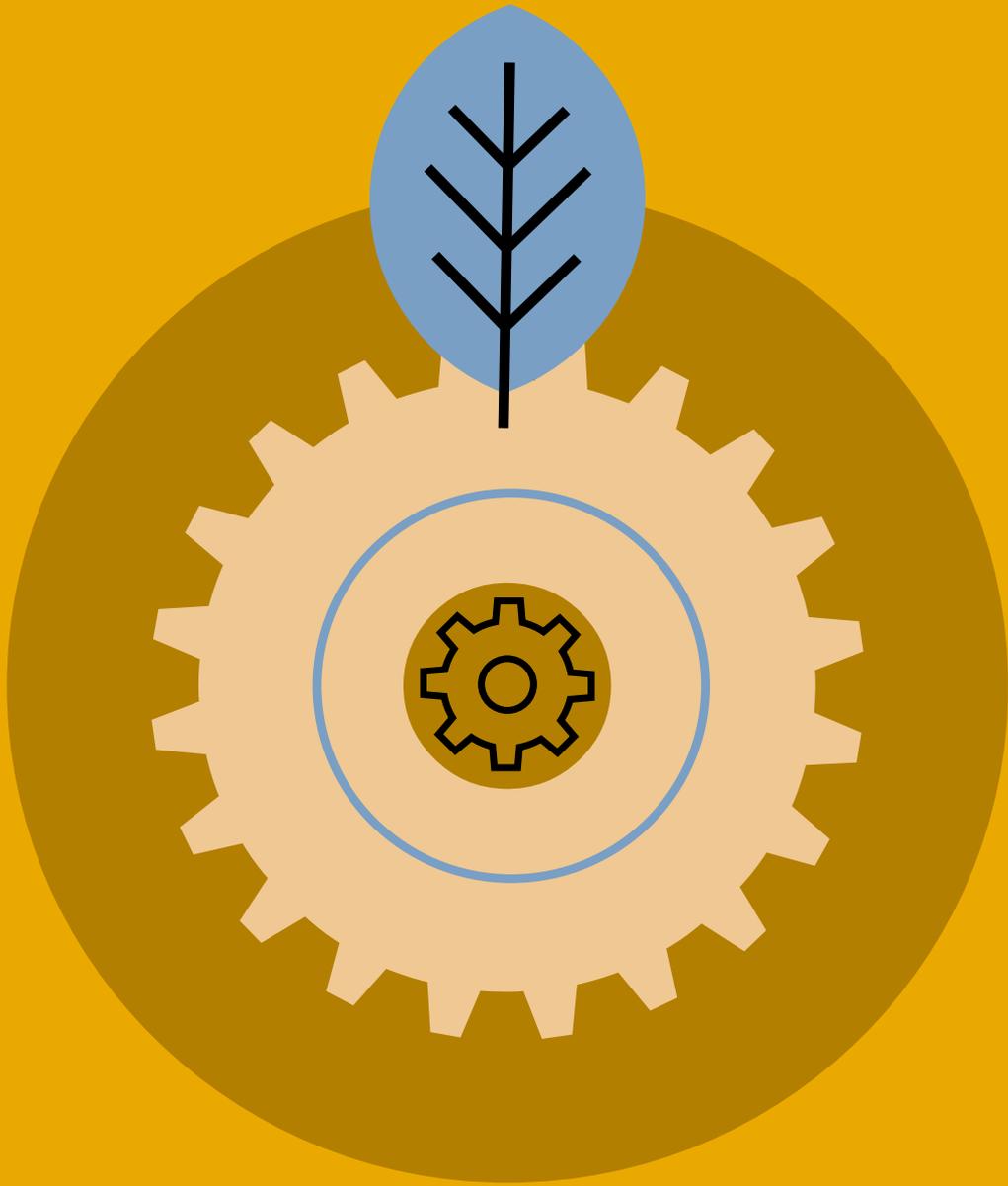
Anexo	43
--------------	-----------

Cuadros

Cuadro 1	Superficie forestada en Corrientes según especies	11
Cuadro 2	Superficie forestada en Misiones según especies	12
Cuadro 3	Identificación de costos por maquinaria	27
Cuadro 4	Valor de biomasa por modelo	31
Cuadro 5	Planilla de cálculos de energía	43
Cuadro 6	Planilla de cálculos costos de maquinaria	43
Cuadro 7	Cálculo costos por maquinaria	44
Cuadro 8	Cálculo de <i>cashflow</i>	46

Gráficos

Gráfico 1	Cadena forestal	8
Gráfico 2	Proporciones del árbol elaborado	20
Gráfico 3	Modelos propuestos	23
Gráfico 4	Costos de extracción por modelo	28
Gráfico 5	Costos operativos de cada máquina	30
Gráfico 6	Variación de la TIR en el modelo 3	32
Gráfico 7	Costos de flete por modelo	33
Gráfico 8	PCI en función del porcentaje de humedad	36
Gráfico 9	Energía en función del combustible	37
Gráfico 10	Precio de combustibles por venta y por energía	37



PRÓLOGO

La matriz energética argentina está conformada, en su gran mayoría, por combustibles fósiles. Esta situación presenta desafíos y oportunidades para el desarrollo de las energías renovables, ya que la gran disponibilidad de recursos biomásicos en todo el territorio nacional constituye una alternativa eficaz frente al difícil contexto energético local e internacional.

En este escenario, en 2015, la República Argentina promulgó la Ley 27191 –que modificó la Ley 26190–, con el objetivo de fomentar la participación de las fuentes renovables hasta que alcancen un 20% del consumo de la energía eléctrica nacional en 2025, otorgando a la biomasa una gran relevancia.

La biomasa es una de las fuentes de energía renovable más confiables, es constante y se puede almacenar, lo que facilita la generación térmica y eléctrica. En virtud de sus extraordinarias condiciones agroecológicas, y las ventajas comparativas y competitivas de su sector agroindustrial, la Argentina es un gran productor de biomasa con potencial energético.

La energía derivada de biomasa respeta y protege el ambiente, genera nuevos puestos de trabajo, integra comunidades energéticamente vulnerables, reduce la emisión de gases de efecto invernadero, convierte residuos en recursos, moviliza inversiones y promueve el agregado de valor y nuevos negocios.

No obstante, aún existen algunas barreras y desafíos de orden institucional, legal, económico, técnico y sociocultural que deben superarse para incrementar, de acuerdo con su potencial, la proporción de bioenergía en la matriz energética nacional.

En este marco, en 2012, se creó el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa – UTF/ARG/020/ARG (PROBIOMASA), una iniciativa que llevan adelante el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca y la Secretaría de Gobierno de Energía del Ministerio de Hacienda, con la asistencia técnica y administrativa de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

El Proyecto tiene como objetivo principal aumentar la producción de energía térmica y eléctrica derivada de biomasa a nivel local, provincial y nacional, para asegurar un creciente suministro de energía limpia, confiable y competitiva y, a la vez, abrir nuevas oportunidades agroforestales, estimular el desarrollo regional y contribuir a mitigar el cambio climático.

Para lograr ese propósito, el Proyecto se estructura en tres componentes principales con objetivos específicos:

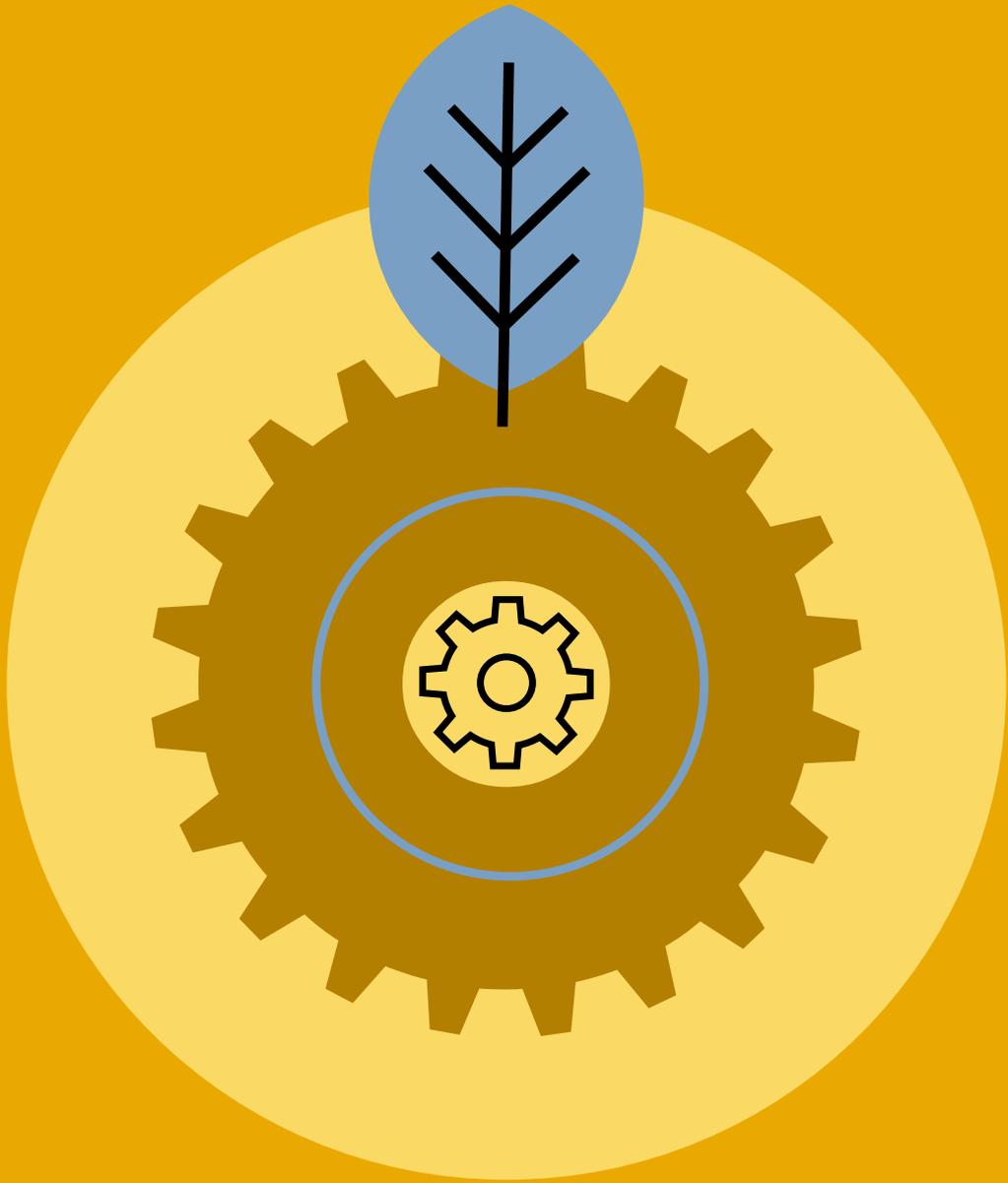
- Estrategias bioenergéticas: asesorar y asistir, legal, técnica y financieramente, a proyectos bioenergéticos y tomadores de decisión para aumentar la participación de la energía derivada de biomasa en la matriz energética.
- Fortalecimiento institucional: articular con instituciones de nivel nacional, provincial y local a fin de evaluar los recursos biomásicos disponibles para la generación de energía aplicando la metodología WISDOM (*Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping*, Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles).
- Sensibilización y extensión: informar y capacitar a los actores políticos, empresarios, investigadores y público en general acerca de las oportunidades y ventajas que ofrece la energía derivada de biomasa.

Esta Colección de Informes Técnicos pone a disposición del público estudios, guías y recomendaciones sobre aspectos específicos de la generación de energía derivada de biomasa, elaborados por consultoras y consultores del Proyecto e instituciones parte, con el propósito de contribuir tanto al desarrollo de negocios como al diseño, formulación y ejecución de políticas públicas que promuevan el crecimiento del sector bioenergético en la Argentina.

AGRADECIMIENTOS

La elaboración de esta publicación fue posible gracias a la colaboración de Martín López del área de Desarrollo Forestal del Ministerio del Agro y la Producción de Misiones, de Francisco Torres del Instituto Correntino de la Industria de la Madera, de Roberto Rojas, Director de la Dirección de Recursos Forestales del Ministerio de Producción Corrientes, del productor forestal Edgardo Torres, de Diego Ezquivel de Servicios Forestales Corrientes y de Fernando de Giorgi, Coordinador del Consorcio Corrientes Norte.

Por último, un reconocimiento para las plantas privadas que brindaron información sobre sus procesos, sus costos y las maquinarias que emplean.

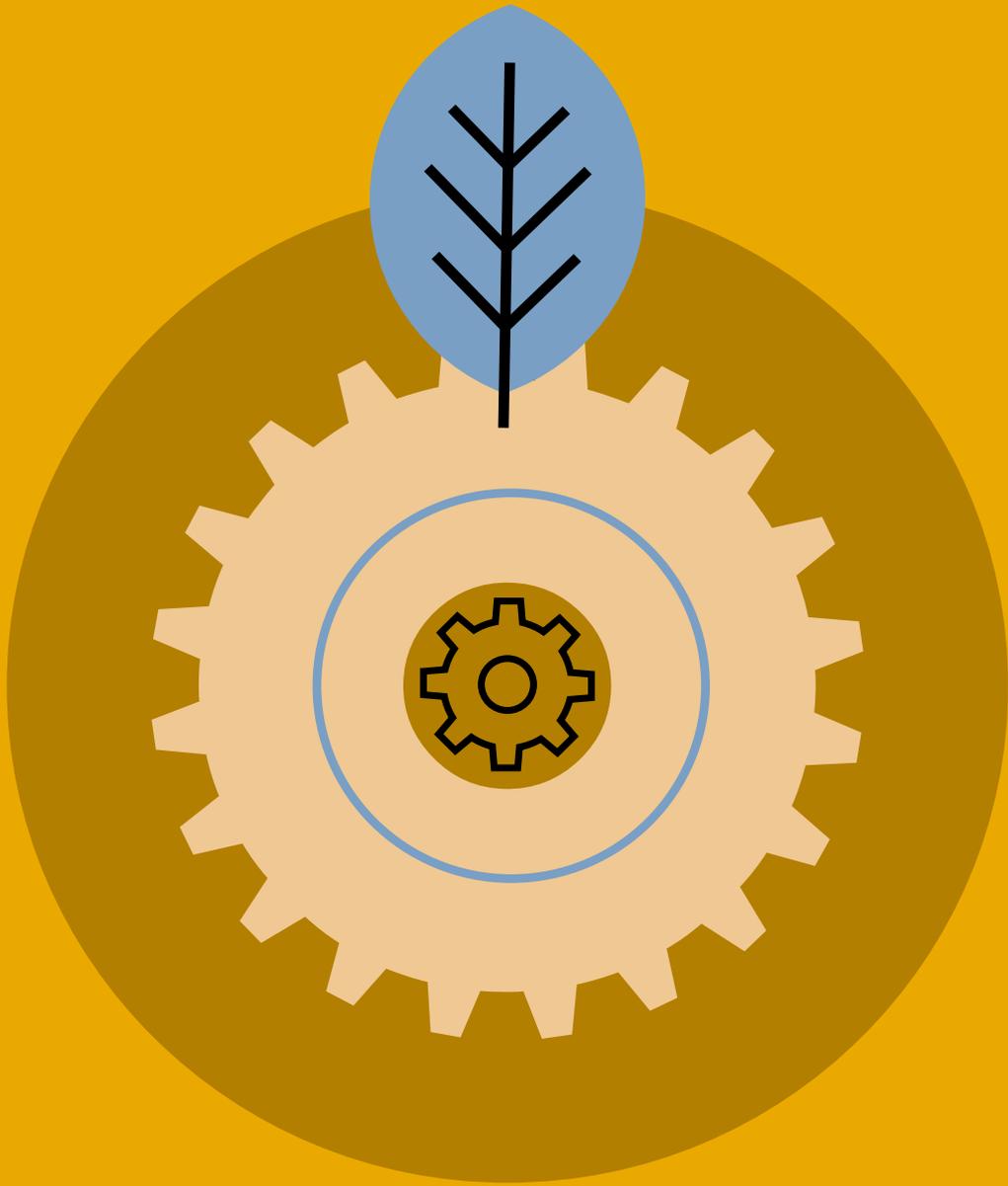


SIGLAS Y ACRÓNIMOS

CyD	cheques y débitos
EBITDA	beneficios antes de intereses, impuestos, depreciación y amortización (por su sigla en inglés: <i>Earnings before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization</i>)
IIBB	ingresos brutos
IVA	impuesto al valor agregado
H	humedad basada en al peso húmedo
HR	humedad relativa
PCI	poder calorífico inferior
TIR	tasa interna de retorno

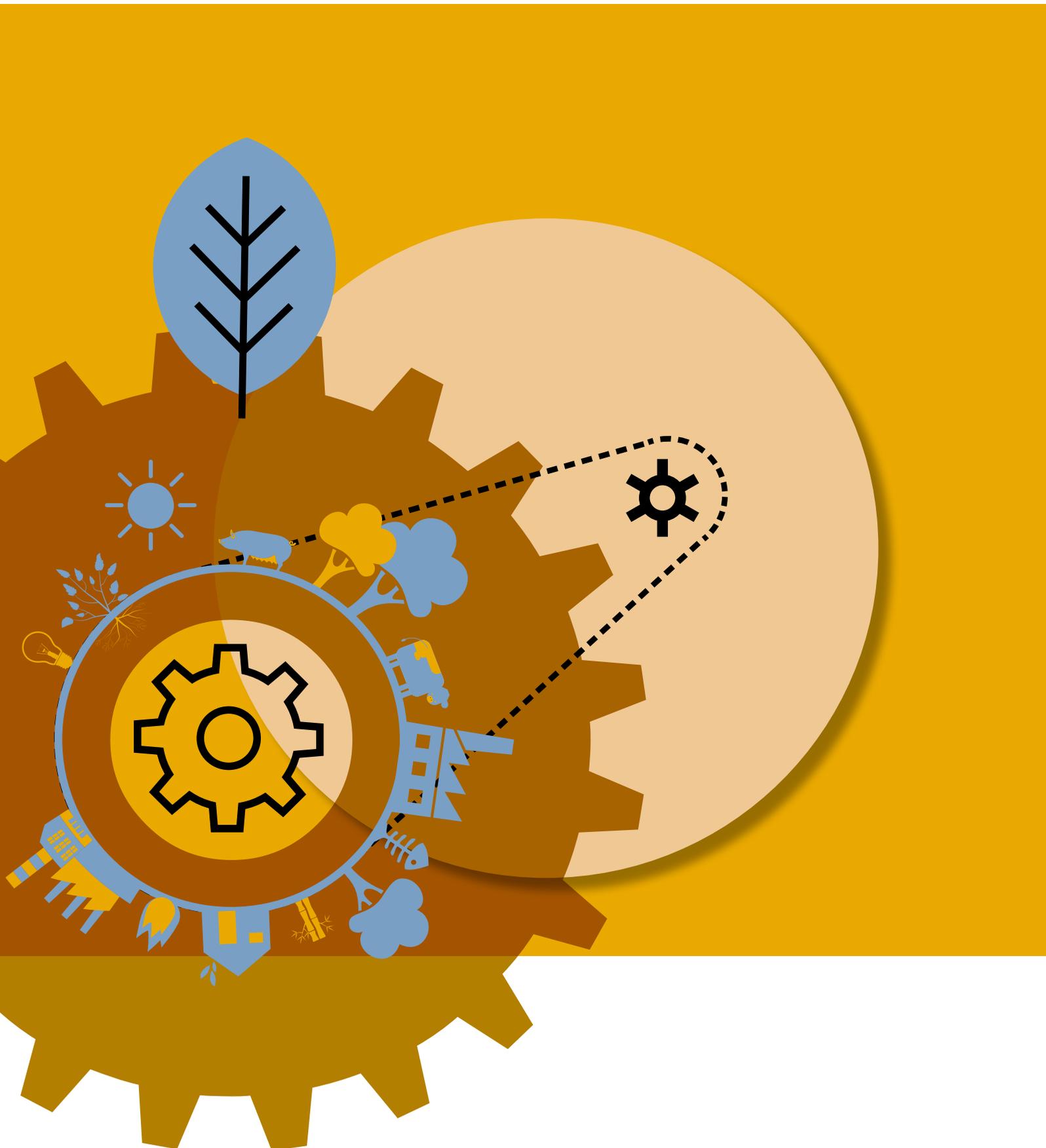
Unidades de medida

$\$/m^3$	peso por metro cúbico	m	metro
$\$/t$	peso por tonelada	m^3	metro cúbico
$\$/USD$	peso por dólar	MJ/kg	megajoule por kilogramo
$^{\circ}C$	grados Celsius	MBTU	millón de unidad térmica británica/tonelada
cm	centímetro	MW	megavatio
h	hora	USD/h	dólar por hora
ha	hectárea	USD/l	dólar por litro
Hp	caballos de fuerza	USD/ m^3	dólar por metro cúbico
kcal/kg	kilocaloría por kilogramo	USD/t	dólar por tonelada
kg	kilogramo	USD/MBTU	dólar por millón de unidad térmica británica
kg/m^3	kilogramo por metro cúbico	t/día	tonelada por día
km	kilómetro	t/h	tonelada por hora
l	litro	t/ha	tonelada por hectárea
l/h	litro por hora		
l/Hp/h	litro por caballos de fuerza por hora		



RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la factibilidad, los costos y la tecnología para la utilización de los residuos generados durante el aprovechamiento de montes forestales. Para esto, en primer lugar, se evalúa la viabilidad de implementar un servicio de logística, en tres rangos de distancia, que cubra desde la cosecha y la transformación de la biomasa hasta su traslado hasta la industria de generación. En segundo lugar, y como consecuencia directa de la definición de factibilidad, se identifica el interés de las empresas proveedoras de servicios forestales en las distintas localidades establecidas.



1. INTRODUCCIÓN

El mercado de la biomasa para su utilización en la generación de energía térmica se encuentra en constante expansión durante los últimos años en la Argentina. Acompañando este crecimiento, se fueron incorporando los desechos o residuos industriales en función de los costos de su acondicionamiento y del traslado al lugar de destino. En la cadena forestal, el eslabón industrial de los aserraderos pasó de quemar el aserrín, los recortes y costaneros a entregarlos como materia prima o combustible industrial. Este proceso implicó la incorporación de trituradoras de madera y un nuevo sistema de gestión lo que, a su vez, representó un cambio cultural en la utilización de los residuos de esta cadena industrial.

En la actualidad, el país está en un proceso de sinceramiento de costos de la matriz energética, cuyo objetivo es eliminar paulatinamente los subsidios a la energía. Este proceso determina que el costo de energía para los usuarios finales sea mayor, esto genera oportunidades para la expansión del mercado de la bioenergía basada en el uso de la biomasa. Existen nuevas instalaciones para generación de energía en funcionamiento, tanto térmica como eléctrica, con diversas tecnologías y procesos de combustión. Asimismo, debido al impacto de los resultados de las distintas rondas de licitación de RenovAr, al momento de realizar este informe hay varias plantas de generación eléctrica en construcción o en fase de proyecto. En este contexto, se podría prever que el crecimiento de la demanda de biomasa llegaría a ser mayor al de la oferta disponible en la industria. Esta proyección determinaría que la disponibilidad de la biomasa residual de las industrias de la cadena forestal no lograría satisfacer la mayor demanda, y se generaría un probable incremento de su valor en el mercado. Considerando que esta es la biomasa de mayor disponibilidad y simpleza de manejo, es esperable que el incremento de su costo abra la oportunidad para el aprovechamiento de otras biomásas.

El desafío para los nuevos proyectos es poder estimar la disponibilidad de biomasa forestal y su valor futuro en el mercado. Es en este contexto donde comienza a tomar preponderancia la biomasa residual en el campo, porque representa un volumen muy grande, capaz de abastecer expansiones relevantes en la demanda.

Es esperable que durante este proceso la principal limitante para disponer del material en la industria, apto para su consumo, sean los costos. Es por esto por lo que es importante conocer cuáles son los costos de cosecha y habilitación de la biomasa residual y su transporte hasta su destino final. Sobre la base de esta necesidad, se definen los objetivos de este trabajo, en el cual se costean distintos modelos tecnológicos de cosecha y extracción de biomasa, así como las opciones para acondicionarla y transportarla.

2. BIOMASA

Se puede definir como biomasa toda materia de origen biológico, excluyendo los combustibles fósiles o los derivados de ellos, ya sea que provenga de desechos o subproductos agrícolas y forestales, estiércol o biomasa microbiana o de cultivos energéticos. Es decir, cualquier sustancia orgánica de origen vegetal o animal originada en un proceso biológico, incluyendo los materiales que resultan de su transformación natural o artificial es biomasa.

El término “biomasa”, a efectos del presente informe, se circunscribe a la biomasa para uso energético de origen forestal, excluyendo todos aquellos recursos potenciales que son consumidos en procesos tales como alimentación, tanto humana como animal, o materiales para la construcción.

En estos términos, el incremento de la oferta biomásica tiene dos orígenes:

- Cultivos dendroenergéticos: aquellos que se establecen específicamente con destino para producción de biomasa.
- Residuos: se obtienen en los procesos productivos de las diferentes instancias de la cadena de la industria forestal.

Cabe aclarar que la cadena de la industria forestal se encuentra integrada en forma vertical y consume una porción relevante del residuo que genera. La creciente demanda de energías térmica y eléctrica basadas en combustibles renovables compite directamente con algunas industrias que forman parte de este mercado. La utilización de los residuos tiene un gran potencial de crecimiento. Esto se debe a que están disponibles y, por lo tanto, su aprovechamiento requiere un tiempo de implementación menor que el de los cultivos dedicados, y los incrementos en su demanda representan un potencial estímulo económico.

Actualmente, en la Argentina, los residuos de aprovechamiento forestal poseen una baja tasa de utilización en la industria y, por sus características, con frecuencia no poseen aptitud para ser usados como insumo de la industria de molienda tradicional. Esto los configura como una oferta relevante y adicional a la que se comercializa, en un mercado cuya demanda se encuentra en expansión. En este contexto, es prioritario estudiar la viabilidad tecnológica y económica de la generación de biomasa a partir de dichos residuos.

2.1 Denominación de biomasa

La definición de biomasa, en su más amplia expresión, engloba a toda materia orgánica que se genera por un proceso biológico. En la actualidad, se considera biomasa a aquella fracción de la materia orgánica que pueda ser aprovechable energéticamente. En la directiva 2003/30/CE del parlamento de la comunidad europea (Unión Europea, 2003), en el artículo 2, se definió la biomasa como “la fracción biodegradable de los productos, dese-

chos y residuos procedentes de la agricultura (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales”. Por lo tanto, el término “biomasa” que se utiliza en este trabajo engloba los conceptos orgánico y renovable.

La biomasa pertenece a los combustibles que son mayoritariamente renovables y, como su nombre lo indica, están producidos de materiales derivados de fuentes biológicas. Los recursos biomásicos se encuentran disponibles en distintas formas: cultivos energéticos (dedicados específicamente para eso), residuos de agricultura, residuos agroindustriales, residuos forestales, residuos de la industria forestal, desechos humanos y animales, basura doméstica, etc. Una gran ventaja de la utilización de recursos biomásicos para la generación de energía es que pueden originar combustibles líquidos, gaseosos y sólidos, los cuales pueden ser almacenados, transportados y utilizados con sistemas de abastecimiento semejantes a los de los combustibles fósiles u otros a granel estándares. Asimismo, la utilización de residuos biomásicos en forma responsable favorece el fortalecimiento de las cadenas de producción y su sustentabilidad.

2.1.1 Biomasa residual

Se denomina biomasa residual a los subproductos que se generan de procesos productivos originados sobre materia orgánica, especialmente los agropecuarios y los industriales. Por lo tanto, se entiende como biomasa residual aquella generada como consecuencia de diversas actividades, procesos o actuaciones realizadas sobre las plantas directamente o sobre los productos elaborados o semielaborados derivados de ellas.

La biomasa residual se puede clasificar según su origen de procedencia en (Castro Gil y Sánchez Naranjo, 1997):

1. Residuos forestales: se consiguen en el proceso de poda y raleo del monte, junto con aquellos que se producen en la explotación de los bosques para el uso industrial de la madera.
2. Residuos agrícolas: se consiguen de la planta sembrada al separar la parte que se cosecha con destino a la alimentación o como materia prima en la industria, por ejemplo, las podas de frutales o la paja de los cereales.
3. Residuos ganaderos: generados por los propios animales al utilizar la biomasa vegetal como alimento. Puede ser originada por un animal vivo (ej. estiércol) o por un animal muerto (residuos de matadero).
4. Residuos industriales de base forestal: originados, principalmente, en las industrias forestales, es decir, en las industrias madereras y papeleras. Estos quedan diferenciados según su industria de origen en:
 - a. Industrias de primera transformación (costaneros, aserrín, viruta, etc.).
 - b. Fabricación de productos de madera: aserrín, recortes de tableros y chapas de las industrias de muebles y de carpinterías.
 - c. Fabricación de pastas celulósicas y derivados de papel.
5. Residuos de la industria agrícola y agroalimentaria: es necesario destacar aquellas industrias que generan residuos que sí son susceptibles de ser utilizados con fines energéticos.

6. Residuos urbanos: son aquellos que se generan en los centros urbanos como consecuencia de la actividad habitual y diaria del ser humano. Se clasifican en:
 - a. Residuos sólidos urbanos.
 - b. Aguas residuales urbanas.

El concepto de “residuo forestal” está referenciado a la situación actual, en la cual el material residual de la tala rasa o del raleo permanece en el lote porque económicamente no se justifica su cosecha. Este debe ser manejado para permitir, ya sea la plantación nueva o el rebrote de los tocones, como así también la reducción de peligro de incendio o la circulación dentro del monte cuando se trata tanto de un raleo no comercial como comercial. En la medida en que se pueda aprovechar económicamente este material, dejaría de ser conceptualmente un “residuo”, dado que es parte de la materia prima de un proceso industrial.

2.1.2 Biomasa del sector de la industria forestal

La industria forestal tiene distintos grados de aprovechamiento del insumo durante todo su proceso. En términos generales, el aprovechamiento del insumo principal en las industrias de primera transformación es muy bajo, queda cerca del 50% del volumen como residuo. Este se encuentra concentrado dentro de la industria en sitios de fácil acceso y con una logística montada. Estas características de los residuos biomásicos del sector de la industria forestal, combinadas con la dificultad en su disposición final, permitieron que se puedan incorporar como combustible, y que produzcan un valor económico como subproductos. El sector se encuentra muy integrado, generando que el manejo y la utilización de estos subproductos estén muy desarrollados.

2.1.3 Biomasa de montes forestales

En función del manejo de cosecha que se realiza, la biomasa residual procedente de los aprovechamientos forestales se caracteriza por encontrarse de forma dispersa en el lote donde se produce. Esta característica supone la mayor limitación en su aprovechamiento como fuente de energía. La biomasa, por su propia naturaleza, requiere de una serie de pretratamientos o transformaciones para ser objeto de un aprovechamiento energético eficiente. Las características que aparecen en la biomasa forestal residual son:

- Gran tamaño de las piezas (granulometría).
- Heterogeneidad y poca uniformidad.
- Elevado contenido de humedad.
- Reducida densidad.
- Gran dispersión de los residuos.
- Dificultad de transporte y manipulación.
- Presencia de residuos no aprovechables, como arena, piedras, metales, etcétera.

Para conseguir el acondicionamiento de la biomasa y las características necesarias para mejorar su valorización como combustible, se debe realizar una reducción de las piezas para lograr una homogeneidad que permite su manejo industrial. Generalmente, estos tratamientos se efectúan antes de la fase de transporte para reducir el costo del traslado.

3. CONTEXTO ENERGÉTICO

El modelo de desarrollo industrial y tecnológico que posee la sociedad actual determina una fuerte dependencia de energía, ya sea eléctrica o térmica. A nivel mundial, hay un constante incremento en el consumo de energía, lo que conlleva a serios problemas de abastecimiento que deben ser resueltos en forma continua.

Existen distintas formas de generación de energía térmica, hoy los combustibles fósiles son uno de los principales insumos energéticos involucrados en esta. El uso de combustibles fósiles es, en gran medida, uno de los mayores causantes de problemas ambientales, tales como la contaminación del aire, la lluvia ácida y las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂. A esto se suma la heterogeneidad de la distribución de los combustibles fósiles, las mayores reservas están localizadas solo en algunos países, lo que causa un incremento en los costos de su abastecimiento y conflictos geopolíticos.

Por lo tanto, en el corto a mediano plazo, una solución posible a estos problemas es el desarrollo de energías limpias y renovables de origen biomásico. Estas no poseen los perjuicios ambientales enumerados y pueden ser producidas y consumidas en forma local, sin sobrecostos, con menor conflictividad en su distribución y produciendo riqueza local y empleo genuino. Además, permiten generar un ámbito de CO₂ neutro y mejoran la sustentabilidad del sistema, en tanto y en cuanto se garantice que provengan de recursos renovables. En muchos casos la biomasa tiene como ventaja adicional que es un residuo de distintas actividades productivas. Por lo tanto, su utilización productiva soluciona posibles pasivos ambientales.

En los últimos años, la Argentina no estuvo exenta del incremento del consumo energético, tanto a nivel industrial como doméstico. Este crecimiento no siempre fue acompañado por un aumento en las inversiones en la oferta en energía. Actualmente se está dando un fuerte impulso al desarrollo de energía en la Argentina, con foco en el crecimiento de la participación de energías renovables. A través de la Ley 27191, que, a su vez, modifica a la Ley 26190, se ha dado un fuerte impulso al desarrollo de una matriz energética con mayor participación de las energías renovables, principalmente solar y eólica.

La biomasa, como fuente de energía, se presenta como una gran oportunidad para la Argentina. Esto se debe tanto a la naturaleza agroindustrial del país con distintos sistemas productivos, que poseen muchas veces grandes cantidades de biomasa residual en sus distintas etapas productivas, como al gran potencial que poseen ciertas regiones para generar cultivos biomásicos dedicados para la generación de energía. En este contexto, es

importante conocer la capacidad de oferta potencial de biomasa presente en las distintas cadenas productivas y la viabilidad de su implementación como insumo para generación de energía.

En este mercado existe un excedente en la oferta, principalmente de chip y aserrín, que va a ser destinado a cubrir la mayor demanda proyectada con la entrada en producción de los proyectos energéticos que se encuentran encaminados hoy día. Teniendo en cuenta este contexto, el desarrollo y crecimiento del mercado energético basado en combustibles renovables no puede sostenerse con el material residual disponible en la industria forestal. Esto se debe, principalmente, a que la oferta de biomasa actual tiene, en términos generales, un mercado desarrollado, donde la utilización en usinas termoeléctricas estaría compitiendo con la industria de la celulosa y la de tableros, cuya producción es más rentable que la energética. Esto generaría distorsiones en el mercado de la biomasa, elevando sus precios por encima del punto de rentabilidad de las usinas termoeléctricas.

El incremento de la oferta de biomasa, en este nuevo panorama de crecimiento, tiene su claro lugar, dentro de la cadena forestal, en el mejor aprovechamiento de los residuos de la producción de los montes forestales. Es por esto por lo que este trabajo se centra en identificar los residuos de los trabajos silviculturales y las tecnologías que permitan aprovecharlos, tanto en poscosecha como en raleos.

En el presente estudio se hace foco en la biomasa residual producida en el aprovechamiento de plantaciones forestales, primer eslabón de la cadena forestal.

4. CONTEXTO DE LA PRODUCCIÓN FORESTAL EN LA ARGENTINA

4.1 Distribución de masas forestales

En su conjunto, la cadena forestal en la Argentina cuenta con una gran ventaja competitiva que reside en la gran productividad que tienen las especies de pino y *Eucalyptus*, con respecto a países con tradición forestal como Chile, Suecia, EE. UU. o Canadá. Este potencial se debe a la conjunción de buenos ambientes agroecológicos y la existencia de paquetes tecnológicos adecuados a estos.

La producción forestal de especies con aptitud industrial y de rápido crecimiento en la Argentina se desarrolló, principalmente, con la incorporación de políticas de promoción por parte del Estado argentino. Muchos de los bosques cultivados han sido generados como consecuencia de la ley de promoción de forestaciones (Ley 26432).

Estos bosques implantados se componen principalmente por los de coníferas (66%), seguidas por los de eucaliptos (24%), salicáceas (7%) y otras (3%).

A partir de este impulso, se fueron demarcando diferentes cuencas forestales. Estas se componen de la Región Mesopotamia (Misiones, Corrientes y Entre Ríos), Delta del Río Paraná, Región Pampeana, Córdoba y Centro, Cuyo, NOA y Patagonia.

Esto se evidencia principalmente en la Región Mesopotamia, donde se ha desarrollado de forma profusa la actividad forestal por disponer de suelos fértiles y profundos y un clima templado. Esta región concentra cerca del 80% de las forestaciones del país.

En la Argentina, los bosques cumplen un papel crucial en relación con las necesidades de subsistencia de una gran parte de la población que vive en zonas forestales o sus cercanías y le proporcionan un medio de obtención de ingresos, leña, y en ocasiones también alimentos.

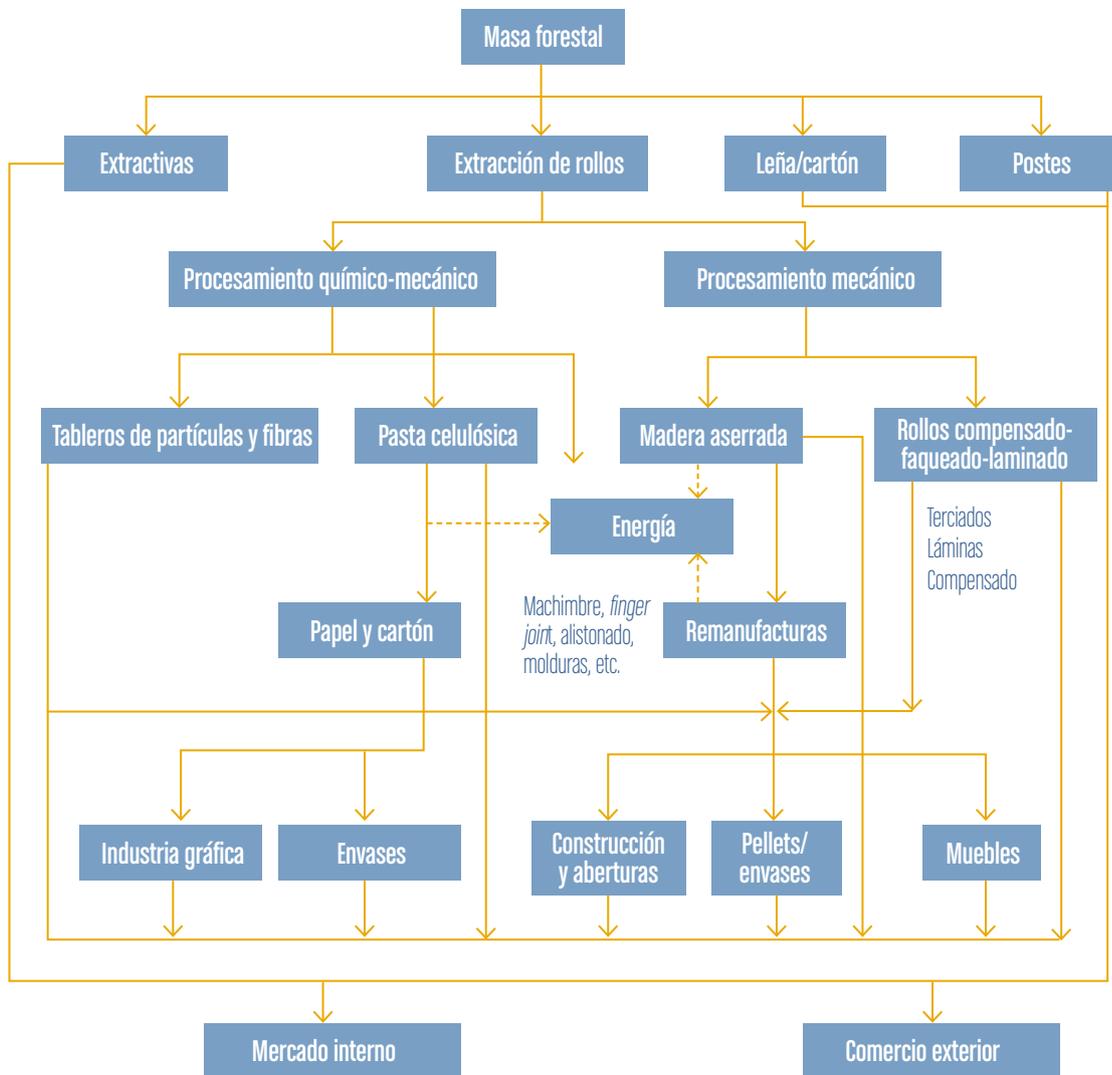
4.2 Cadena forestal

La cadena forestal está compuesta por los distintos productores forestales primarios, las empresas industrializadoras de maderas (primarias y secundarias) y el conjunto de contratistas y empresas de servicios de la industria forestal. El desarrollo y la orientación productiva forestal trabaja en función de los requerimientos de la industria, ya sea la de aserrado, pasta celulósica o de tableros de partículas. Según los requerimientos de estos

destinos núcleos industriales, se desarrollaron y orientaron los objetivos del mejoramiento genético y el diseño de los sistemas productivos. El sector papero, por ejemplo, fijó los objetivos en los tamaños de fibra y la coloración; el del aserrado trabajó en rectitud y calidad de madera sólida, resistencias de fibra y desramado natural.

El Gráfico 1 presenta un esquema tradicional de la cadena de la industria forestal. Es interesante destacar que no contempla, para el destino energía, los productos generados en el aprovechamiento de bosques forestales. Esto indica en qué medida estos muchas veces no son incluidos dentro de la cadena forestal.

Gráfico 1. Cadena forestal



Fuente: Alonso Schwarz (2014).

El mercado objetivo y el aprovechamiento de los macizos forestales son dinámicos y han ido cambiando a lo largo de los años. Estos se basan en las coyunturas económicas de las industrias y del mercado en general, y también en las capacidades económicas de los productores. Los trabajos silviculturales, en este contexto, han cambiado a medida que se generaban mercados nuevos o se frenaban los existentes, pero que luego podían volver a resurgir. Por ejemplo, la incorporación de las podas a los montes forestales para lograr trozas libres de nudo para el mercado de aserrado. En muchos casos, este nuevo mercado no respondió las expectativas de precio, no compensaba el costo extra y muchos productores dejaron de hacerlo. También sucedió con los raleos, cuyo objetivo era lograr mayores diámetros, pero no se pudo sostener el costo del primer raleo, que no tenía destino comercial. Estas variaciones, acompañadas de las mejoras genéticas y los usos de clones, en eucalipto, sobre todo, generaron cambios en los trabajos silviculturales, por ejemplo, una disminución en las densidades de plantación.

Todos estos cambios son difíciles de incorporar ya que, en el medio forestal, los procesos son de largo plazo, dado que las respuestas a estos se ven reflejadas luego de 10 o 15 años. Es por esto por lo que la producción primaria de la cadena forestal se encuentra tan desarticulada, en la que existen infinitas formas de producción, tecnologías aplicadas y costumbres en el uso de los productos obtenidos. La cantidad y los tipos de residuos generados en esta primera etapa de la cadena dependen, principalmente, de los procesos y las tecnologías involucrados.

El proceso productivo de la cadena forestal, desde el árbol hasta el producto terminado, ya sea pasta celulósica, tableros o tablas de aserrado, genera un volumen importante de residuos. La tasa de aprovechamiento de los montes para su uso como madera sólida –tablas, tirantes, etc.–, con frecuencia no supera el 30% del total generado en los bosques.

La cadena de la industria forestal produce una diversidad de productos, siendo los más habituales la madera sólida, el papel y los distintos tipos de tableros de partículas. Las características propias de la actividad determinan la generación de grandes cantidades de residuos en las distintas etapas del proceso. En este caso, estos residuos se encuentran concentrados en grandes volúmenes, en general, están tipificados y son de fácil acceso. En algunas cuencas, estas características han propiciado el desarrollo de un entramado de industrias que valorizan dichos residuos. La experiencia demuestra que donde este fenómeno ocurre, la cadena global es mucho más competitiva.

Una porción importante de la madera que no es aserrable se destina a la industria de molienda, junto con los residuos del aserrío. En algunos casos, los aserraderos consumen parcialmente sus residuos en procesos térmicos internos. La quema de residuos industriales es un proceso que está tendiendo a desaparecer.

En la producción primaria, en términos generales, los residuos se encuentran dispersos en el campo, tienen una composición muy heterogénea y son difíciles y costosos de extraer y de transportar, básicamente por su baja densidad. Estas características favorecieron, en gran medida, a que no se hayan podido incorporar los residuos forestales en los procesos que utilizan la biomasa como combustible.

Existe una fracción muy importante, en el sector primario, que no se encuentra utilizada, y que en muchos casos todavía se quema directamente, para reducir su volumen. Estos residuos son los generados en las operaciones de poda, raleo y tala rasa, conocidos como residuos de poscosecha.

El volumen de dichos residuos depende de varios factores. Uno de los principales es el diseño original del bosque y el paquete tecnológico implementado. Estos definirán si el rodal forestal posee mayor aptitud para ser aserrado o para ser utilizado en la industria de la madera triturable. Estudios internacionales señalan que un uso eficiente de un bosque implantado –dando el mayor uso posible al rollo, con buena tasa de tipificación por la calidad de cada uno de sus sectores y las características de cada industria– implicaría destinar aproximadamente el 46% de los rollos a la industria del aserrado, el 46% a la industria triturable –por ejemplo, pastas celulósicas, papel y tableros de fibras o partículas– y el 8% restante destinarlo a la generación de energía.

El esquema productivo de la cadena forestal de la Argentina está tendiendo a disminuir la frecuencia de tratamientos silviculturales, eliminar los raleos y reducir la tipificación de los rollos. Esto se debe, entre otros factores, a la existencia de nueva genética que aporta bosques con individuos más homogéneos, a la falta de mercado para los productos generados en los tratamientos intermedios y al bajo valor de mercado de los rollos finos.

La silvicultura es el conjunto de actividades que tienden a maximizar el volumen de madera de calidad aserrable, y la tipificación es la tarea en la cual se definen las clases de rollos buscando optimizar el flujo de madera que llega a usos sólidos. De este modo, el nuevo modelo de silvicultura –menos raleos y menos tipificación– tiende a concentrar la disponibilidad y a veces, inclusive, el volumen de residuos biomásicos al momento de la tala rasa.

Además, esto determina que para incrementar la rentabilidad primaria es necesario hacer un uso más eficiente del bosque implantado a través de mayor homogeneidad en cada individuo del bosque –con genética adecuada a tal fin– y el desarrollo de un uso de los residuos generados.

Frente a este desafío, el presente trabajo se enfoca en la viabilidad económica de la utilización de los residuos forestales generados en este primer sector productivo. Esto incluye los trabajos silviculturales, poda y raleo, y el aprovechamiento final del bosque cultivado. Con el foco puesto en la definición de costos y sistemas de aprovechamiento, y la caracterización de la biomasa generada en función de cada paquete tecnológico evaluado.

4.3 Aprovechamiento de montes forestales

La cosecha de los montes forestales viene evolucionando en forma marcada en los últimos 30 años. Desde su origen con hachas hasta la utilización de motosierras y la incorporación de cabezales procesadores, así como desde la extracción con animales al uso de grúas forestales, la utilización de autocargadores (*forwarders*) y extracción de carga (*skidders*), la biomasa residual fue variando su volumen y distribución dentro del lote.

A los efectos de poner bajo estudio la factibilidad del aprovechamiento del material residual forestal, se describen solo tres formas resumidas del aprovechamiento de un monte forestal. Existe una gran cantidad de formas combinadas para realizar una tala rasa, pero en términos generales, la distribución de la biomasa residual puede ser referenciada a cualquiera de las tres que son consideradas en este estudio.

5. LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO

El presente estudio analiza dos localizaciones representativas de la región forestal del noreste argentino, siendo una de ellas en el noreste de la provincia de Corrientes (Virasoro, Ituzaingó) y la otra, la zona centro y noroeste de la provincia de Misiones (Montecarlo, El Dorado).

5.1 Corrientes

Según la *Actualización del inventario forestal de la provincia de Corrientes* (Consejo Federal de Inversiones, 2015), con más de 470 000 hectáreas (Cuadro 1), es la provincia argentina con mayor superficie de bosques implantados. Sin embargo, de los 8 000 000 de toneladas de madera que produce anualmente, solo el 20% se industrializa en la provincia, el resto se comercializa como materia prima a las provincias vecinas (Misiones y Entre Ríos). El desarrollo de la actividad forestal está acompañado por una constante innovación tecnológica vinculada al material de propagación, a las técnicas de cultivo y a la organización de los actores que han transformado al sector en uno de los más dinámicos de los últimos tiempos.

Cuadro 1. Superficie forestada en Corrientes según especies

Género	Superficie del Inventario (ha)	Superficie estimada por DRF (ha)*	Total (ha)
<i>Eucalyptus</i>	107 457	14 400	121 857
<i>Pinus</i>	312 365	33 600	345 965
Otros	6 160	-	6 160
Totales			473 972

*Estimaciones de plantaciones años 2013, 2014 y 2015.

Fuente: Consejo Federal de Inversiones (2015).

5.2 Misiones

La actividad primaria de la provincia de Misiones se sustenta en la agricultura, la explotación forestal y la silvicultura. La explotación forestal se inició con los obrajes, a los cuales les siguieron los aserraderos; en la actualidad, la reforestación constituye una forma más racional de aprovechamiento de las potencialidades forestales. La silvicultura se especializa en plantaciones de pinos, cuyo destino son las compañías elaboradoras de papel. La industria está representada por plantas procesadoras de materias primas locales: secaderos y molinos yerbateros, secaderos de té, subproductos de cítricos, aserraderos y empresas de fabricación de pasta de celulosa y papel.

Misiones cuenta con más de 405 000 ha (Cuadro 2) de plantaciones forestales (Consejo Federal de Inversiones, 2015) distribuidas en los géneros *Pinus* (86%), *Eucalyptus* (10%), araucaria (2,5%) y paraíso, kiri, toona, y grevillea (1,5%). El crecimiento de las especies forestales en Misiones es casi el doble del de los países de tradición forestal.

Misiones, con mayor historia forestal, tiene en la zona de Montecarlo y de El Dorado, una de las mayores concentraciones de montes forestales en la provincia, y abarca un importante abanico de industrias forestales. En la provincia de Corrientes, se determinó como zona de estudio, la sección noreste, centrada en la ciudad de Gobernador Virasoro, principal ciudad dentro del departamento de Santo Tomé.

La zona centro de la provincia de Misiones, del sector oeste, sobre el río Paraná, tiene el recurso forestal muy desarrollado y el mercado de la industria forestal con una cultura muy extendida en el uso de los residuos. Incluso la cadena de la yerba mate y del té hacen uso de los residuos madereros en el secado de su proceso. Esto muestra el grado de evolución que tiene el mercado de la biomasa en esta zona. En este tipo de mercado, cualquier incremento en la demanda repercute en el incremento de los precios, permitiendo incorporar nuevas fuentes de biomasa forestal.

La ciudad de Virasoro y su entorno tienen un menor desarrollo de la industria forestal y también una gran disponibilidad del recurso forestal. La construcción de una planta grande de generación eléctrica con biomasa (80 MW) y la proyección de una industria en la zona de Ituzaingó, que tienda a realizar un mayor aprovechamiento de su residuo, determinarán la importancia de incorporar esta segunda zona bajo estudio.

Para determinar los costos del aprovechamiento de la biomasa residual en el aprovechamiento de montes forestales, se proponen tres rangos de distancia hasta la planta destino. Los valores de los fletes se establecieron para 10 km, 30 km y 60 km.

Cuadro 2. Superficie forestada en Misiones según especies

Género	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i>	Otros
Superficie (ha)	348 305	40 902	16 617
Total (ha)	405 824		

Fuente: Consejo Federal de Inversiones (2015).

6. ESTRUCTURA DE LA ZONA DE ESTUDIO

6.1 Desarrollo de los actores principales

Así como hay una distribución asimétrica en la tenencia de las tierras para el uso forestal, también ocurre con las empresas prestadoras de servicio para todos los trabajos silviculturales. Existen varios actores, sobre todo en la zona noreste de la provincia de Misiones, que, traccionados por las grandes empresas forestales, realizaron un salto tecnológico y productivo muy importante. La incorporación de cabezales cosechadores, autocargadores de gran tamaño y de *skidders* permitió un incremento en el volumen cosechado de gran escala. Además, también hay una gran escala de pequeños prestadores de servicio, que, al generarse ese avance tecnológico en las grandes empresas, lograron renovar la maquinaria. Aquellas empresas prestadoras de servicio forestal que incorporaron estas nuevas tecnologías se encuentran capacitadas para tomar el desafío de ingresar en el mercado de la biomasa como combustible energético. Las capacidades no solo son tecnológicas, sino también de escala en infraestructura y capacidad económica, ya que las incorporaciones de maquinarias nuevas requieren de inversiones de montos elevados.

Durante el relevamiento realizado en distintas empresas de servicios, se comprobó que existe un fuerte interés por incorporarse al mercado de la biomasa. En varias ocasiones ya hubo intentos de utilizar los residuos forestales con el objetivo de entregarlos a las plantas de generación térmica, como las celulósicas. La mayor dificultad que manifestaron para que estos proyectos individuales pudieran progresar radica en el bajo valor que, hasta la fecha, tiene el chip en el mercado local. Los casos aislados que están funcionando se engloban en dos marcos bien diferentes. Están, por un lado, aquellos que son sostenidos por una industria que los puede realizar por administración y el objetivo es mantener una capacidad negociadora dentro del mercado. Por el otro lado, están aquellos contratistas que, por el menor tamaño de sus empresas y un manejo irregular de los aportes impositivos, logran reducir los costos de producción. Los niveles de incumplimiento pueden ir desde pagar los aportes de solo algunos empleados contratados, o bien realizar aportes parciales, o no contratar los seguros de vida obligatorios exigidos por ley. Ocurre también que al trabajar a destajo se evitan los pagos del aguinaldo y con ello se reduce el costo del sueldo anual. También sucede que no contratan seguros de cobertura de la maquinaria o les realizan mantenimientos precarios. Estos incumplimientos generan, a su vez, mayores riesgos productivos, dado que las instalaciones y las maquinarias pueden estar en malas

condiciones. Cabe aclarar que, en el mercado de servicios forestales, existe un estado de informalidad importante, que en muchos casos se presenta solo en los pequeños prestadores de servicios, y, de esta forma, quedan marginados de poder ofrecer sus servicios a las grandes industrias.

El mercado del rollo de madera fina para triturar, y los precios que este genera, se presenta distorsionado, porque se encuentra concentrado en pocas industrias. El valor del chip en dicho mercado se encuentra con un techo para su precio, por la alta disponibilidad que existe por parte de la industria forestal, que necesita deshacerse del residuo. En cuanto haya una mayor demanda, por la instalación de nuevos actores industriales, como las usinas termoeléctricas, se generará una tracción hacia mayores precios, con la incorporación casi inmediata de muchos productores interesados en entregar el material residual. Esto también permitiría facilitar el manejo posterior de la plantación y cuidados silviculturales y, a su vez, reducir fuertemente el riesgo de incendio y su potencial propagación al disminuir el material combustible del lote.

6.2 Experiencias locales

6.2.1 Empresa industrial

En el noreste de Misiones, en la localidad de Puerto Esperanza, se encuentra una empresa que posee, hace muchos años, un aserradero. Asimismo, hace unos 10 años, instalaron una planta de fabricación de pellets para hacer uso de los residuos industriales propios, y comenzaron a utilizar el material residual de los montes forestales de su propiedad. Los montes actuales bajo aprovechamiento, en su mayoría de pino híbrido, son intervenidos con tres raleos comerciales con el objetivo de obtener plantas de calidad para el aserradero.

El material obtenido en esas intervenciones es utilizado en el aserradero propio. El material fino se destina a la industria de la celulosa. Al finalizar el ciclo del monte implantado y la tala rasa, la empresa aprovecha el material residual.

El sistema de cosecha utilizado es el denominado *full tree*, en el que un cosechador apea los árboles y son extraídos en su totalidad con un *skidder*. Luego, otra máquina con un cabezal procesador realiza el aprovechamiento y la selección del material en planchada, al costado del lote.

Según estimaciones realizadas por la empresa, el material de descope y desrame, así como los recortes y rollos defectuosos, que quedan una vez elaborado el lote, suman entre 15 t/ha y 20 t/ha aprovechadas. Este material se vuelve a juntar con un trineumático, en grandes montañas, para mejorar la eficiencia de la utilización de la máquina de chipeado. Finalmente, el material es picado directamente sobre el camión. Para tal fin se utiliza una chipeadora, marca Farming 380, traccionada por un tractor. El camión, de unos 60 m³ de capacidad de carga, realiza el traslado hasta la planta, a una distancia de 20 km, aproximadamente. La planta de peletizado de la firma utiliza, como medida para cuantificar el material ingresado, el cubicaje de la carga de los camiones. Por analogía, utiliza la misma medida para establecer los valores de las distintas actividades en campo. El costo final del material trasladado a la planta ronda los 120 \$/m³, lo que expresado en USD con tipo de cambio de 20 \$/USD resulta en 6 USD/m³.

Es importante destacar que el método de cosecha usado es el que les permitió obtener la mayor eficiencia en la utilización de los recursos biomásicos residuales.

6.2.2 Contratista de servicios

En la localidad de Puerto Rico, una proveedora de servicios forestales armó una pequeña estructura para realizar el aprovechamiento de los residuos forestales de los campos, chipando el material para su venta a la industria. Utilizaban los residuos obtenidos una vez realizada la limpieza de los montes, con una chipera móvil, traccionada con un motor a combustión. El trabajo se realizaba con dos personas en forma manual, que llenaban unos bolsones *big-bag* hasta completar la carga. Posterior a eso, se cargaban los bolsones en un camión volcador, tipo batea, mediante una grúa. Con este sistema se podían procesar unos 65 m³ por día (20 t/día). Los tiempos del proceso no le permitieron incrementar la producción, por lo que los costos de esta terminaban siendo mayores a los valores obtenidos por el producto en el mercado. Por estas razones no pudo continuar con el aprovechamiento de la biomasa residual en poscosecha.

7. TECNOLOGÍAS PARA LA COSECHA Y EXTRACCIÓN DE LA BIOMASA FORESTAL

Para el presente estudio se realizó la búsqueda de información para conocer las nuevas tecnologías que se utilizan en los centros más desarrollados en el ámbito forestal a nivel mundial. En países como Finlandia, EE. UU., Canadá, Suecia, se utilizan maquinarias de última generación en lo que respecta al aprovechamiento de la biomasa forestal. Se consultaron a empresas extranjeras por maquinaria (Monra Forestal, Forest Pioneer SL) y sus costos. A nivel local, se consultaron a dos empresas que poseen representaciones de compañías extranjeras, como Kesla, Farmi, Rottne y Plan Alto.

7.1 Tecnología utilizada en Europa

Se presentan en forma esquemática las tecnologías utilizadas en los principales países del mundo que poseen mercados desarrollados, como por ejemplo Finlandia, Suecia, Canadá y EE. UU. Las condiciones de desarrollo de la utilización de energías renovables permitieron un mejor aprovechamiento del bosque destinando una mayor proporción al mercado de la biomasa. La integración del productor con la industria hace viable alcanzar valores del 70 al 80% de aprovechamiento del rollo, desde la cosecha hasta las producciones primarias y secundarias.

El principal salto tecnológico que existe en estos países consiste en reducir el volumen que ocupa la biomasa en su origen, ya sea generando fardos que llegan a pesar 500 kg, o picando el residuo con maquinarias de gran porte, con muy altos niveles de producción, lo que permite bajar los costos y mantener un sistema eficiente en el uso de los recursos.

En el uso de maquinaria posibilita el empleo de varios métodos: primer raleo de árbol entero, raleo combinando rollo con biomasa, raleo o tala rasa astillado en la vía de saca y transporte a cancha, y el armado y sacado de paquetes de rama.

7.1.1 Primer raleo de árbol entero

En este tipo de raleo se realizan los siguientes pasos:

1. Corte y agrupado.
2. Carga de transporte con *forwarder* en la vía de saca.
3. Chipeado a camión en planchada.
4. Transporte a fábrica.

7.1.2 Raleo combinando rollo con biomasa

Este tipo de raleo utiliza maquinaria para realizar cuatros pasos:

1. Cabezal para procesar y clasificar la materia prima.
2. *Forwarder* para cargar y transportar en la vía de saca.
3. Astillado a camión en planchada.
4. Transporte a fábrica.

7.1.3 Raleo o tala rasa astillado en la vía de saca y transporte a cancha

Por su parte, este raleo incorpora otras maquinarias y otros procedimientos:

1. Cabezal procesador que deja el material en la vía de saca.
2. Con *forwarder* se carga y saca a planchada.
3. La chipeadora móvil acumula y saca a contenedor en cancha.
4. El camión con dispositivo Rolloff carga el contenedor y lo transporta a fábrica.
5. El camión descarga en la fábrica y devuelve contenedor.

7.1.4 Armado y sacado de paquetes de rama

Este proceso incluye los siguientes pasos:

1. El cabezal procesador deja el material en la vía de saca.
2. El *forwarder* comprime y empaqueta ramas.
3. El *forwarder* saca a planchada, los paquetes se olean.
4. El camión transporta los paquetes a fábrica.

7.2 Tecnología local

Los sistemas de elaboración y extracción disponibles en la zona de estudio permiten realizar las actividades necesarias para utilizar los residuos forestales, principalmente los obtenidos después de los raleos, ya sean precomerciales o comerciales, y los que resultan de la tala rasa.

7.2.1 Podas

El material residual que resulta de las podas, en plantaciones realizadas con fines madereros, es decir, densidades mayores a las que se utilizan para los sistemas silvopastoriles, es considerado, dentro del estudio de impacto ambiental, como aporte de nutrientes al suelo. Además, y principalmente en las plantaciones de las diferentes especies de eucalipto y sus cruzamientos, dicho material es casi despreciable y de muy baja resistencia a la cosecha, con la maquinaria disponible hoy día en la región, las ramas se rompen al cargar con la pluma, ya sea la enfardadora como un *forwarder*.

Las podas de pino aportan un volumen mayor de material leñoso, en relación con la del eucalipto, pero sigue siendo bajo. Considerando los bajos volúmenes de los residuos de las podas y la probabilidad de roturas y desperdicio en la cosecha, se resuelve dejar fuera de las consideraciones de este estudio los residuos obtenidos mediante las podas de los montes forestales. Al momento de la confección del presente trabajo, no se encontraron estudios que estimen el volumen de residuos en las podas.

7.2.2 Raleos

Las plantaciones comerciales en las zonas de estudio tienen como destino principal la industria de aserrado, combinando cada vez más los trabajos silviculturales que permitan

maximizar los diámetros y la calidad del fuste cosechado. Mediante las podas se logra madera libre de nudos y mediante los raleos se incrementa el crecimiento diamétrico individual. La intensidad de los raleos depende de la densidad inicial de la que parte la plantación, de la especie, del objetivo comercial y del mercado destino más cercano.

En muchas zonas, principalmente en montes de pino, se realiza un raleo que no tiene destino comercial, el cual se denomina precomercial o muerto. El volumen de biomasa que representa este raleo depende específicamente de las densidades iniciales y finales de cada monte. En términos generales, se puede estimar un rendimiento de entre 10 y 15 t/ha. Este volumen de biomasa se puede aprovechar para la generación de energía. Si el monte se elabora con un pequeño cosechador, los árboles cosechados pueden ser apilados en pequeños montículos, lo que mejora la eficiencia de la cosecha y la extracción. Si la cosecha es manual, la distribución de las plantas se encuentra más desparramada, y enlentece los movimientos de la cosecha.

El método comúnmente aplicado para la cosecha del raleo es el que utiliza un *forwarder* y se extraen los árboles directamente al lateral del camino para su reprocesado. En estos casos, y sobre todo si se utiliza un cosechador mecánico, se puede incorporar una enfardadora, que aún no se usa en la zona, aunque sí en otros países. Esto permite la compactación del material y su posterior atado, y mejora notablemente el peso específico del material, con la consiguiente mejora en la eficiencia de la extracción. Asimismo, permite ser cargado directamente al camión para su traslado a la industria. De esta forma, se reduce el costo de flete y también el costo del chipeado, ya que la industria cuenta con equipos de mayor capacidad productiva y con motorización eléctrica mucho más económica y con menor costo de mantenimiento que las motorizadas con motores a combustión.

7.2.3 Tala rasa

La distribución de la biomasa residual en un lote forestal depende básicamente de la tecnología utilizada para la cosecha del monte. Esto incluye el apeo, la elaboración, la extracción y la carga en el camión. Para establecer las principales características de los métodos de cosecha se separan en tres segmentos:

1. Apeo y elaboración manual
2. Semimecanizada
3. Mecanizada

En el primer caso, el apeo y la elaboración (o trozado) se realizan con motosierristas, que trabajan en grupos, y se dividen las tareas del apeado, del desrame y del trozado del fuste en las distintas categorías de venta. El material residual del desrame y descope se dispone en escolleras a lo largo de la fila, separadas cada cuatro o cinco filas, según el tamaño de la cancha de elaboración. Dadas las zonas de influencia del estudio y su objetivo, las especies forestales bajo análisis son *Eucalyptus* y *Pinus*, que representan la mayor superficie forestada. En los casos de plantaciones de *Eucalyptus*, a diferencia del manejo utilizado en otras zonas, donde se aprovecha el rebrote de esta especie, el que se utiliza en estas zonas es de replantado, dadas las mejoras tecnológicas y productivas que se generan entre los turnos de corta.

Para la extracción del material residual dispuesto en escolleras, existen dos opciones:

1. Grúa forestal con acoplado, o *forwarder*; el material cargado es trasladado hasta el lateral del lote, donde se encuentra la planchada de carga de rollo y donde se acumula en pilas grandes para mejorar la eficiencia del chipeado. Este material no se puede cargar directo en el camión dado que su cubicación es muy baja y el costo del flete se incrementa demasiado.
2. Enfardadora con grúa forestal. El costo de inversión requiere de grandes volúmenes de biomasa residual y aprovechamiento de raleos no comerciales para justificar la utilización de esta maquinaria. Por el momento, no existen experiencias en la zona que permitan evaluar los costos de esta opción.

El segundo caso mantiene el apeo y el desrame en forma manual y la extracción se realiza por *skidders*, saca el fuste entero a la planchada y realiza la elaboración en forma mecanizada o también con motosierristas. Cualquiera sea la forma, el resultado es que la biomasa residual compuesta por las ramas y el descope permanece en el lote, y los despuntes o material defectuoso se acumulan en la planchada misma. A diferencia del caso anterior, hay un porcentaje importante que hay que extraer del lote, en distancias muy cortas de la vía de saca, 50 a 60 metros de recorrido, se puede utilizar una grúa trineumática, pero la capacidad de carga es muy baja. En distancias mayores se utilizará un *forwarder* o un tractor agrícola con grúa forestal y acoplado.

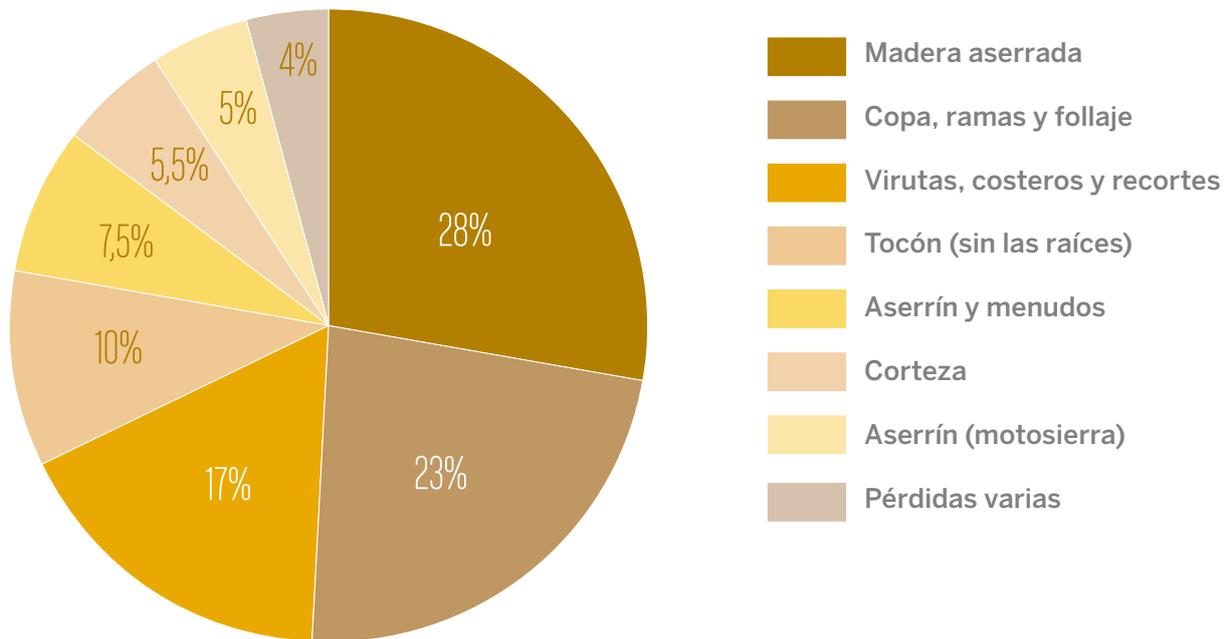
El último caso también tiene dos opciones diferentes de aprovechamiento de la tala rasa, por un lado, se realiza el apeo con una máquina con cabezal cosechador (*feller*), y el árbol se extrae entero, mediante un *skidder*, hasta la planchada (sistema *full tree*), donde se elabora mediante un cabezal procesador. En este caso, el material residual se acumula todo en la planchada al borde del camino. El procesador desrama, corta y descarta las medidas fuera de rango y el descope. De esta manera, no se debe realizar ninguna extracción, ya que el material remanente en el lote es bajo y permanecerá allí para su descomposición. Sí se debe realizar un trabajo de acopio del material para que sea eficiente la utilización de la chipera en cada sector estacionario. Por el otro lado, la segunda opción de la cosecha mecanizada es semejante a la tala rasa manual, ya que el procesador realiza todos los procesos dentro del lote, armando escolleras con todo el material residual. En este caso, la diferencia que existe con el anterior es que la utilización del cabezal cosechador genera mayor volumen residual, dado que, por el sistema de corte y mecanizado, resulta difícil aprovechar los diámetros pequeños. Esta mayor disponibilidad de biomasa residual permite inferir que, en un futuro, esta sería la combinación de aprovechamiento que permitiría la incorporación del proceso de enfardado de las ramas y descopes.

En forma resumida, las tecnologías más eficientes para el aprovechamiento de la biomasa residual dependen, más allá de los mecanismos de cosecha que se utilicen, de la ubicación y distribución del material remanente. Para unificar los criterios aplicados para el análisis de los costos, en este trabajo se tomarán tres situaciones de distribución:

1. Material residual dentro del lote armado en escolleras.
2. Material de descope y desrame dentro del lote, rollos defectuosos y despuntes en planchada de carga.
3. Todo el material residual en planchada de carga.

En el caso del residuo forestal en particular, según la FAO (1991), se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, solo se aprovecha comercialmente alrededor del 28%. Se estima que un 38% es dejado en el campo, en las ramas, despunte y tocón (Gráfico 2), y el restante 34% no es aprovechado en la industria de la madera en forma de costaneros, recortes, corteza y aserrín.

Gráfico 2. Proporciones del árbol elaborado



Fuente: Elaborado por el autor sobre la base de FAO (1991).

8. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

8.1 Aprovechamiento en tala rasa

El aprovechamiento de los residuos de montes forestales en tala rasa, con destino a bioenergía, puede realizarse utilizando varios sistemas y maquinarias diferentes.

La tecnología para aplicar en la extracción de la biomasa residual y su rendimiento volumétrico están, en mayor medida, relacionados con los métodos y las máquinas utilizados en la elaboración y tala rasa del monte forestal. Los métodos de cosecha determinan, principalmente, la distribución de la biomasa residual –dentro o fuera del lote–. Las máquinas implicadas en la tarea influyen en el volumen del material residual, a mayor mecanización, es esperable mayor volumen de residuos, en general, más concentrados en el lote de cosecha.

Los cabezales procesadores, que se incorporaron a la producción forestal en las últimas décadas en la Argentina, permitieron una mayor productividad y reducción del uso de mano de obra. A su vez, disminuyeron el aprovechamiento del material fino y los árboles con horquetas u otros defectos, y dejaron mayor volumen de material residual.

Por su parte, Egnell y Björheden (2012) argumentan que la forma más efectiva de aumentar la extracción de residuos en la tala rasa de un monte forestal, en el futuro, será racionalizar el manejo y así reducir los costos de producción. Es importante definir previamente el objetivo de cosecha, las técnicas y maquinarias que se utilizarán y los posibles mercados de destino. Dicha racionalización hace énfasis en la utilización de los recursos productivos y en el cuidado del medio ambiente. En la programación previa se deben integrar todas las tareas, desde el sistema de tala rasa que se plantea, junto con los destinos objetivos de la madera, como así también el método de extracción de la biomasa residual. Por ejemplo, si la cosecha es mecanizada, se debe estudiar la relación en el aprovechamiento de rollos finos y el material residual (la copa), frente a la productividad del cabezal. Puede ser más rentable que las últimas trozas de rollo fino se dejen como material residual, lo que mejora la productividad del cabezal, y después determina también una mejora de la productividad en el manejo y triturado de la biomasa, por mayor volumen de producto por copa. A su vez, se debe contemplar el uso de la maquinaria y las pasadas por los caminos de saca, para evitar que se repitan pasadas de distintas máquinas sobre la misma cancha en forma innecesaria.

Esto permitiría el aprovechamiento del residuo de manera económicamente viable en montes forestales, los cuales previamente eran considerados no rentables, y, de esa forma, aumentaría la oferta de biomasa disponible.

En este mismo sentido, Björheden (1997) había planteado la importancia de integrar la extracción de biomasa residual, en tala rasa, con los sistemas y tecnologías aplicadas a la elaboración y extracción. Esto conlleva un cambio cultural en la forma de pensar el aprovechamiento de los montes forestales, por lo que podría conducir a la posibilidad de desarrollar sistemas de cosecha completamente nuevos.

En Suecia, Junginger *et al.* (2005) evaluaron las posibles formas de reducir los costos del manejo de la biomasa forestal y obtuvieron mejoras significativas en la eficiencia del manejo de biomasa al mejorar los sistemas en la extracción y la trituration, principalmente a través de: el aprendizaje práctico, la mejora de los equipos y los cambios en la organización.

La dificultad más importante de la extracción de los residuos forestales es la baja densidad específica que tiene el material. En el proceso de extracción de la biomasa, la carga de las ramas y despuntes dentro del lote presentan uno de los puntos críticos, por la dificultad de levantar el material y lograr una productividad razonable. El factor que mejor explica esto es la baja densidad y el grado de distribución del material en el lote. La tecnología está evolucionando en este sentido, para lograr reducir la densidad, con equipos que, por ejemplo, pueden compactar la carga, logrando extraer mayor cantidad de biomasa (Press Colector de John Deere o Continental Biomass Industries Brush Transport System).

La biomasa también puede ser extraída directamente en forma de chip, combinando varios procesos a la vez. La integración de las actividades forestales en su conjunto permitirá reducir los costos y asegurar la calidad de la biomasa en el destino. El equipo más completo en este sentido es el Valmet 801 Combi Bioenergy, está compuesto de un cabezal procesador y una chipera, con un contenedor de chip de 27 m³. De esta forma, mientras se realiza la cosecha y clasificación de rollos, directamente los despuntes o rollos finos se trituran en el mismo momento. Una vez completo el contenedor, se puede descargar en un camión al borde del lote, o a un acoplado chipero para que se encargue de la extracción.

En términos generales, la biomasa forestal en su origen tiene una baja relación peso/volumen. En forma de despuntes, ramas y material de descarte, presenta una densidad de hasta 100 kg/m³. Si se acondiciona el material, por ejemplo, reduciendo el tamaño en forma de chip, la densidad aumenta al doble, entre 300 y 450 kg/m³. Los equipos de alta tecnología que enrollan y atan el material en forma de fardos logran incrementar la densidad hasta casi 700 kg/m³ (Rummer, Len, y O'Brien, 2004). Estos valores de densidades cercanas al rollo de madera permiten reducir los costos de extracción y transporte de la biomasa residual forestal.

En la Argentina, los avances tecnológicos y las mejoras en la eficiencia de extracción de biomasa han sido casi nulos, ya que la biomasa forestal como combustible tuvo, y aún tiene, un bajo valor de venta.

8.2 Esquemas de extracción propuestos

El objetivo de este trabajo es lograr estimar los costos de extracción, acondicionamiento y entrega en destino del material residual que se genera durante los trabajos silviculturales y de aprovechamiento en bosques implantados. En función de los distintos sistemas de elaboración utilizados en la Argentina, y en particular en las zonas bajo estudio en este caso, se definen tres modelos distintos (Gráfico 3).

En los tres primeros casos se propone la utilización de maquinarias y tecnologías existentes en el país. La cuarta propuesta incluye maquinaria que aún no se encuentra dis-

Gráfico 3. Modelos propuestos

1	<ul style="list-style-type: none"> • Extracción de biomasa residual a borde del lote • Chipeado sobre piso en plataforma de carga • Carga a camión 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Forwarder</i> • Chipera móvil • Pala frontal
2	<ul style="list-style-type: none"> • Extracción de biomasa residual a borde del lote • Reacomodo y apilado de la biomasa residual • Chipeado sobre piso en plataforma de carga • Carga a camión 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Forwarder</i> • Guía trineumática • Chipera móvil • Pala frontal
3	<ul style="list-style-type: none"> • Reacomodo y apilado de la biomasa residual • Chipeado sobre piso en plataforma de carga • Carga a camión 	<ul style="list-style-type: none"> • Guía trineumática • Chipera móvil • Pala frontal
4	<ul style="list-style-type: none"> • Enfardado de biomasa residual en el lote • Extracción de fardos a borde del lote • Carga a camión 	<ul style="list-style-type: none"> • Enfardadora • <i>Forwarder</i> • Pala frontal

Fuente: Elaborado por el autor.

ponible en la Argentina, ni se encontraron en las recorridas contratistas que tuvieran experiencia en su utilización. En Brasil se está comenzando a integrar esta tecnología, pero es ampliamente incorporada en el manejo forestal en los países desarrollados en la utilización de biomasa para generación.

El primer caso está basado en sistemas de cosecha manuales o con procesador en campo, deja todo el material residual dentro de las canchas de elaboración. En este se contempla la extracción de las ramas, despuntes y descartes al borde del lote, realizando grandes pilas donde posteriormente se acondicionarán mediante una chipeadora para incrementar la densidad y posibilitar el transporte hacia la planta de generación, a costos de mercado.

El segundo caso se propone para cuando se utiliza el sistema de cosecha por fuste entero, en el que los despuntes y ramas quedan en el lote, y los descartes y finos quedan al borde del camino, donde el procesador, corta y clasifica los rollos. Para este estudio se estimó que aproximadamente un 70% del total del material permanece dentro del lote y el 30% restante se genera en la planchada al borde de este. En esta situación, se debe extraer el material residual y reacomodar el material que va quedando en las planchadas de reproceso. Una vez acumulado en grandes montañas, es procesado como en el caso anterior y transportado hasta el destino. Cabe aclarar que en el presente trabajo se realiza el cálculo de los costos de este caso, solo para aquellos establecimientos en que se haya trabajado con este sistema y existe un gran *stock* de material en esta condición. En función del desarrollo de los costos, no es un sistema eficiente para realizar el aprovechamiento de la biomasa de campo, dado que la que se deja adentro del lote debe ser sacada afuera.

En un proyecto integral, donde se realiza la cosecha de un monte y se establece realizar el aprovechamiento de la biomasa residual, se deben tener en cuenta todos los procesos en su conjunto y este sistema no tiene sentido. El concepto para destacar es que se busca maximizar la productividad de cada maquinaria, reducir el impacto en el medio ambiente, por excesiva circulación de las herramientas, y reducir los costos, unificando tareas, disminuyendo distancias de traslado, etcétera.

En aquellos establecimientos que se utiliza el sistema de cosecha denominado *full tree*, en el cual es cortado el árbol entero y extraído sin desramar mediante *skidders*, en general, resulta más eficiente la utilización de *skidders* por sobre las grúas trineumáticas, por el tamaño del árbol y su capacidad de extracción de los primeros. De esta forma, la mayoría del material residual es generado en la planchada de corte y en el clasificado de rollos al borde del lote, por ser este el punto de procesamiento del árbol. Este esquema es considerado para el tercer modelo, para el cual solo se contempla el reapilado del material, para su posterior chipeado y traslado.

Teniendo en cuenta la importancia de la biomasa forestal y su potencial contribución en la oferta para el desarrollo de la bioenergía, se propone una cuarta opción, que contempla procesos y maquinaria de los cuales no se tiene conocimientos previos localmente, ni tampoco se encontró material que estime los rendimientos y costos a nivel local. Por lo tanto, se utilizó la bibliografía existente de rendimientos en países europeos, en particular de Finlandia, Suecia y España, y se estimaron los rendimientos y costos operativos. El proceso se puede aplicar a cualquier sistema de cosecha de tala rasa, así como también para la cosecha de los raleos considerados precomerciales y comerciales. El manejo en los casos de raleo será considerado más adelante. Este proceso consta de un *forwarder* con un equipo que compacta y ata la biomasa residual, el cual va instalado en la parte de carga. El resultado que se obtiene son fardos en forma de rollos, con diámetros de 50 a 60 cm, 3,5 m de largo y un peso de 400 a 500 kg. El traslado a planta de destino se realiza con un equipo forestal normal y se procesa directamente en destino. Esto permite reducir los costos de flete y los de acondicionamiento.

Este último modelo se estudió para presentar una opción que, a futuro, podría facilitar la incorporación de montes forestales más alejados de los centros de generación, ya que estos paquetes permiten disminuir considerablemente el costo del flete de camión, por mayor densidad y mayor disponibilidad de camión. Además, el costo de utilizar una chipeadora móvil, traccionada mediante un motor diésel, es mucho mayor al de una que es estacionaria, que tiene por fuerza motriz un motor eléctrico, siendo este uno de los principales costos de la operación.

8.3 Aprovechamiento de raleo

El presente trabajo considera el aprovechamiento de la biomasa residual, en aquellos montes forestales en los que se realizan los raleos precomerciales. En primer lugar, porque es en esos casos que el material cortado queda en el suelo y no se le puede dar ningún destino económicamente rentable. El otro aspecto por el que solo se tiene en cuenta este tipo de raleo es que el material residual en un segundo o tercer raleo, cuyo producto tiene destino comercial, es muy bajo. Y no es objetivo de este trabajo considerar el material que actualmente ya tiene un uso comercial. Cabe aclarar que la realización de este tipo de raleo, y principalmente en las plantaciones de *Eucalyptus*, no se está llevando a cabo en forma generalizada. En algunos casos se reemplaza por una menor densidad inicial, y,

de esta manera, se convierte el primer raleo en comercial. El mejoramiento genético obtenido y las prácticas de clonaciones permiten obtener ejemplares más parejos en forma y crecimiento, por lo que tampoco es necesaria la selección de los mejores ejemplares. En aquellas especies que no responden favorablemente en la forma a las bajas densidades, muchas veces se utiliza una pequeña disminución en la densidad inicial y se retrasa más de lo conveniente el primer raleo, para obtener algún material comercial y justificar económicamente la intervención.

En consecuencia, es un trabajo silvicultural que, en la actualidad, no siempre se realiza en los períodos de crecimiento óptimos. Es de esperar que, de lograrse un mercado que pueda aprovechar esta biomasa potencial, se utilice esta posibilidad de liberación de recursos para el monte y de selección de árboles con mejores cualidades comerciales. Esto toma mayor importancia en los montes forestales de pino, que responden a las menores densidades con una mayor ramificación, disminuyendo la calidad de madera para aserradero.

El raleo precomercial en la Argentina se realiza en gran parte en forma manual, volteando con motosierra los árboles seleccionados. Estos quedan tirados en el campo, dado que no tienen valor comercial. Es importante considerar que se debe lograr realizar un cambio paradigmático en los trabajos silviculturales del raleo precomercial. La elaboración debe ser realizada de manera tal que permita el ingreso del *forwarder* y facilitar la cosecha.

Como en el caso de la tala rasa, también en este se aplica el primer modelo de cosecha de biomasa residual. El *forwarder* ingresa al monte a levantar los árboles tumbados, los que deberían ser volteados de manera tal que se deje una cancha de saca libre. Luego son descargados a borde de camino para realizar la acción de chipeado. En comparación con la tala rasa, el material del raleo precomercial se puede encontrar más disperso en el lote, por lo que la productividad del *forwarder* es esperable que disminuya entre un 10 y un 15%. Esto incrementaría los costos variables de esta operación sensiblemente. Por otro lado, al ser árboles enteros, es esperable que la chipeada sea más eficiente, por tener más material triturable por unidad. Esto incluye a la grúa que alimenta a la chipera. En este caso, los costos variables de esta operación serían menores. En este contexto se estima que el costo final del modelo 1 no variaría.

Sin embargo, principalmente, hay que tener en cuenta que el mercado de la biomasa en la Argentina no se encuentra aún maduro, por lo que no existe en el presente una tipificación por calidad de biomasa. Esto implica que no se forman diferenciales de precio por calidad u origen, entonces el precio del chip de biomasa residual en el mercado será el mismo para todos los sistemas de extracción. Por esto, es relevante determinar, en el contexto del trabajo actual, si el aprovechamiento de la biomasa de un raleo precomercial es factible en el rango de precios que resulten de este estudio. En ese sentido, para las estimaciones realizadas, el raleo precomercial es totalmente aprovechable dentro de los valores del modelo 1.

Se debe tener en cuenta que existe un subsidio para el primer raleo (Ley 25080), que permite recuperar el costo de las tareas de elaboración. No se encontraron antecedentes en la combinación de la realización del primer raleo y su aprovechamiento con destino a biomasa, y si puede tener algún impacto en el cobro de dicho subsidio.

9. CÁLCULO DE COSTOS DIRECTOS

Los costos de obtener una tonelada de biomasa apta para generación sobre camión en la planta de destino fueron estimados para cada uno de los cuatro modelos propuestos. Los precios de las máquinas están tomados en dólares americanos, con una cotización de 20 \$/USD al momento del cierre de este trabajo. Todos los costos se pasaron a esa moneda. En primer lugar, se determinaron los costos fijos anualizados de cada máquina en forma individual. Luego se establecieron los costos variables por unidad horaria, fijando como uso anual para todas las máquinas 1 900 horas. Las amortizaciones se calcularon en función del uso, a valor constante, dado que se deprecia primero por uso que por obsolescencia.

En la Cuadro 3, se presentan los valores y costos resumidos de cada una de las herramientas necesarias para la extracción y acondicionamiento de la biomasa residual. En el Anexo se incluyen todos los cálculos realizados.

9.1 Costo desagregado por modelo

En los modelos propuestos, cada máquina realiza la actividad en forma aislada, y están estimados y considerados los tiempos de cada una de ellas. Los rendimientos de cada tarea fueron estimados en función del conocimiento de los contratistas sobre cada máquina, e intentando extrapolarlos a las condiciones nuevas. No se realizaron mediciones de tiempos ni capacidades de cargas de las diferentes herramientas, dado que en el presente trabajo se estudia la factibilidad del proyecto. Para obtener más información, será necesario la realización de pruebas de cada máquina en las distintas condiciones propuestas para establecer rendimientos más ajustados.

La unidad de medida que se utilizó de referencia para poder sumar y comparar los resultados de cada modelo fue el costo en USD/t. Para definir la tonelada de madera, se tomó como supuesto que la extracción y chipeado se realizan dentro de las primeras semanas de elaboración del monte, cuando aún conserva una humedad del orden del 45-50% (en base húmeda).

En esta primera etapa se calculan los costos de cada uno de los modelos, para luego poder hacer una comparación entre todos ellos. Luego, se plantearán tres distancias distintas para definir los costos de flete.

En el primer modelo propuesto se realiza la extracción con el *forwarder*, siendo el factor limitante en la productividad, la baja densidad de la biomasa. La biomasa residual se apila

Cuadro 3. Identificación de costos por maquinaria

Parámetros	Unidad de medida	Forwarder	Grúa trineumática	Grúa forestal chipera	Grúa forestal cosechadora	Grúa forestal cargadora	Chipera	Cargadora frontal	Enfardadora
Precio de compra	USD	250 000	150 000	130 000	130 000	130 000	110 000	60 000	350 000
Valor residual	USD	50 000	30 000	26 000	26 000	26 000	22 000	12 000	70 000
Tiempo de uso	años	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	4,2	5,3	7,9
Costos fijos									
Depreciación	USD/año	25 333	15 200	13 173	13 173	13 173	20 900	9 120	35 467
Interés	USD/año	15 000	9 000	7 800	7 800	7 800	6 600	3 600	21 000
Seguro + administrativos	USD/año	420	420	420	420	420	420	420	500
Costos laborales									
Trabajo efectivo anual	Horas	1 900	1 900	1 900	1 900	1 900	1 900	1 900	1 900
Salario del trabajador	USD/h	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	-	10,6	10,6
Costos salariales	%	60	60	60	60	60	60	60	60
Costos salario anual	USD/año	20 200	20 200	20 200	20 200	20 200	-	20 200	20 200
Costos operativos									
Precio de combustible	USD/l	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Costo de combustible	USD/h	19,9	11,2	13,7	13,7	13,7	26,7	8,7	19,9
Aceite y lubricantes	USD/h	1 680	0,945	1,155	1,2	1,2	2,258	0,735	1,680
Servicio y mantenimiento	USD/h	37,5	22,5	19,5	19,5	19,5	16,5	9,0	17,5
Rendimiento maquinaria	t/h	6,0	10,0	6,0	10,0	30,0	6,0	15,0	5,0
Costo por hora	USD/h	91	58	56	56	56	60	36	80
Costo específico	USD/t	15,2	5,8	9,4	5,6	1,9	10,0	2,4	15,9

Fuente: Elaborado por el autor.

en grandes montones, intentando acumular la mayor cantidad posible. Esta tarea tiene un costo estimado de 15,2 USD/t, como se muestra en el Gráfico 4. Luego, se utiliza una grúa forestal para abastecer la chipera con biomasa. El volumen acumulado en una pila favorece altamente la productividad en este caso, dado que el punto crítico en esta acción es el traslado de la grúa cada vez que debe cambiar de pila de chipeado. El costo de esta etapa se estima en 9,4 USD/t. El siguiente costo es el de acondicionar el tamaño de la biomasa residual para su traslado en camión a mayores distancias. La productividad de esta tarea depende, principalmente, del tamaño de la biomasa disponible y del tamaño de la pila, dado que a menores diámetros, menor densidad de la biomasa y se genera menor cantidad de chip por cada pasada. Este valor es de 10 USD/t. La carga del camión chipero, que traslada la biomasa acondicionada a la industria, se realiza mediante una cargadora frontal, cuyo costo total es de 2,4 USD/t. Esto suma un costo total estimable de 37 USD/t de chip cargado sobre camión.

El segundo modelo propuesto se establece sobre la base de una conjunción del modelo uno y del modelo tres. Dado que gran parte del material permanece dentro del lote, se considera que el 70% de la tonelada extraída salió del lote y el 30% restante es material que quedó en la planchada de procesamiento del fuste. Para simular esta variación, se tomó el 70% del costo del *forwarder* extrayendo la biomasa y un 30% del valor de la grúa trineumática, realizando el apilado del material de la planchada. Sumando los porcentuales de cada uno totaliza 12,3 USD/t. La grúa para alimentar la chipera y la chipeada misma suman 19,4 USD/t y la carga del camión suma otros 2,4 USD/t. Esto implica un costo estimado de 34,1 USD/t de chip cargado sobre camión.

Gráfico 4. Costos de extracción por modelo

	1	2	3	4
Grúa trineumática / enfardadora (USD/t)		30% 1,7	5,8	Enfardadora 15,9
<i>Forwarder</i> (USD/t)	15,2	70% 10,6		
Grúa forestal (USD/t)	9,4	9,4	9,4	Cosecha 6,0
Chipera (USD/t)	10	10	10	En planta 6,0
Cargadora frontal (USD/t)	2,4	2,4	2,4	Grúa carga 1,9
Total sobre camión (USD/t)	37	34,2	27,6	29,8

Fuente: Elaborado por el autor.

El tercer modelo de extracción de biomasa se condice con el sistema de cosecha denominado *full tree* en el cual, como se mencionó, la mayor parte de la biomasa residual es extraída a la planchada de procesamiento del rollo. En este caso no se requiere de un *forwarder* para la extracción y se utiliza una grúa trineumática para juntar y apilar la biomasa. Esto posee un costo estimable en 5,8 USD/t. Para alimentar la chipera, el costo estimado de la grúa forestal es de 9,4 USD/t. La tarea de chipear y la carga a camión suman 12,4 USD/t. El costo total del modelo propuesto es de 27,6 USD/t de chips puesto sobre camión.

Por último, el cuarto modelo propuesto no depende del método utilizado para la cosecha, ya que la enfardadora forestal levanta la biomasa residual del suelo y la prepara para ser cargada por una grúa forestal con acoplado playo. El costo por tonelada transportada de esta grúa es menor al costo de la grúa que alimenta a la chipera, ya que el rendimiento por hora de cosecha es mayor (10 t/h), dado que el compactado de la biomasa aumenta mucho la densidad y, en consecuencia, las toneladas de biomasa que traslada en cada viaje. Lo mismo se contempló con el costo de la grúa forestal para la carga del camión, considerando 30 t/h, dado que se estima que es la capacidad de carga de un camión por hora. El costo de la enfardadora se calcula en 15,9 USD/t. El trabajo realizado por la grúa, cosechando los rollos enfardados, y extrayéndolos a la planchada se valorizó en 6 USD/t. La carga de los rollos de biomasa enfardados, a un camión forestal, tiene un costo de 1,9 USD/t. En este caso, el chipeado de la biomasa se realiza en la industria destino, lo que reduce su costo. Por su parte, el chipeado en planta representa 6 USD/t. Para comparar con los otros resultados, se suma este costo en este primer subtotal, así se deja inicialmente fuera el flete y se consideran solo los costos hasta la transformación. De esta manera, el costo total estimado para el cuarto modelo es de 29,8 USD/t, contemplando la biomasa cargada en fardos sobre camión y chipeada en destino.

9.2 Flujo financiero

Hasta ahora se calcularon los costos de las diferentes operaciones para determinar el costo final de cada modelo. Estos cálculos representan tanto los costos fijos como variables, directos e indirectos de cada modelo. Sin embargo, no tienen en cuenta los montos que se deben invertir en maquinaria, ni los impuestos que conllevan los esquemas de producción propuestos. Con el objetivo de determinar el valor para cada proyecto con su rentabilidad necesaria, se define realizar el estudio financiero de cada modelo. De esta forma, pueden ser considerados en cualquier empresa de contratistas forestales, representados realmente como un negocio rentable y comparable entre sí.

El flujo de fondos se calculó para cada modelo propuesto, utilizando los costos operativos de cada máquina, los que se presentan en el Gráfico 5. El ingreso se determinó a partir del volumen de venta anual, tomando la productividad de la máquina que resulte limitante como parámetro de productividad.

Para obtener el valor de la biomasa residual acondicionada, que permite asegurar que el proyecto sea rentable, se definió utilizar la tasa interna de retorno (TIR). Se calcula sobre los flujos finales durante 8 años. Como criterio se adoptó el precio de venta de la biomasa que logre una TIR del 15%, en cada modelo. Dicho valor será considerado como el precio de mercado para la biomasa a partir del cual un contratista puede decidir invertir en las maquinarias, afrontar los gastos y obtener una rentabilidad para cada modelo.

Cada modelo se tomó como un proyecto por separado e independiente. Los gastos operativos se consideran con dedicación exclusiva al modelo. Esto, en condiciones norma-

les de una empresa de servicios forestales, no necesariamente es así, ya que en muchos casos se puede optimizar los recursos utilizándolos en diferentes tareas, que no están presentes en los modelos.

En este punto se verifican claramente los sobrecostos que están presentes en el segundo modelo, ya que requiere de una inversión inicial alta, y hace un uso ineficiente de la grúa trineumática. En muchos casos este modelo igualmente se podría utilizar a menores costos, teniendo el contratista una grúa y aprovechando los momentos ociosos para juntar el material desparramado en planchada.

9.3 Cálculo del flujo de fondos

El objetivo del cálculo del flujo de fondos es identificar los resultados económicos a lo largo del tiempo y la exposición financiera que se genera. Esta metodología permite calcular la TIR, obteniendo la rentabilidad del proyecto. Para hacer una secuencia de acuerdo con los números propuestos, se realizó el cálculo en un período de 8 años, tiempo en el que se deprecia la maquinaria. Se consideran 8 horas diarias y 20 días por mes, o sea 160 horas mensuales. El precio de venta considerado es el que se obtiene para cada modelo, como costo de la biomasa residual antes de llevar a la industria de destino.

Se calculan los ingresos brutos (IIBB) y los impuestos a los cheques y débitos (CyD), estimados en el 5% de los ingresos. El ingreso neto resulta de descontar al ingreso los IIBB y el impuesto a CyD. Al restarle al ingreso neto los costos operativos, se obtienen los beneficios antes de intereses, impuestos y las amortizaciones, (EBITDA, por sus siglas en inglés, *earnings before interest, taxes, depreciation and amortization*). La inversión total en maquinarias se amortiza en forma contable en cinco años, y permite determinar el im-

Gráfico 5. Costos operativos de cada máquina

	<i>Forwarder</i>	Grúa forestal	Chipera	Grúa forestal extracción	Enfardadora	Cargadora frontal
Costo gasoil	19,9 USD/t	13,7 USD/t	26,7 USD/t	13,7 USD/t	19,9 USD/t	8,7 USD/t
Mantenimiento	39,2 USD/t	20,7 USD/t	18,8 USD/t	22,9 USD/t	19,2 USD/t	9,7 USD/t
Costo M. O.	10,6 USD/t	10,6 USD/t	0 USD/t	10,6 USD/t	10,6 USD/t	10,6 USD/t
Total costo operativo	69,7 USD/t	45 USD/t	45,5 USD/t	47,2 USD/t	49,7 USD/t	29,0 USD/t

Fuente: Elaborado por el autor.

puesto a las ganancias a pagar. Si se le resta el impuesto al EBITDA, se obtiene el resultado neto. Finalmente, para determinar el flujo anual, se le resta al resultado neto las inversiones realizadas. Sobre este flujo anual, extendido en el tiempo (en este caso se plantean 8 años) se calcula la TIR. Cabe aclarar que en ningún caso se consideró la exposición financiera por el impuesto al valor agregado (IVA).

El desarrollo del flujo de fondos se realizó para cada uno de los modelos propuestos. En todos los casos se utilizó el costo puesto sobre camión, sin flete a planta. En el cuarto modelo, el valor considerado es el del rollo enfardado cargado sobre camión, ya que el proceso de chipeado ocurre en planta y no influye en el flujo de fondos de la empresa proveedora del servicio forestal. Fijando como objetivo una TIR del 15%, se calculó el valor por tonelada de venta de la biomasa donde se verifica esa tasa interna. Las planillas de los flujos de fondos para cada modelo se adjuntan en el Anexo. El resultado de estos flujos se ven en el Cuadro 4. Como se planteó anteriormente, el segundo modelo tiene un costo elevado, proporcional, muy por encima de los otros tres modelos, ya que requiere de una inversión mayor, y tiene mayores costos operativos por la baja eficiencia en el uso de los recursos que presenta.

El modelo 4, que tiene el costo más bajo en el Cuadro 4, no incluye el valor del acondicionamiento de la biomasa, ya que este proceso se realizará en la industria destino. Se excluyó el valor, porque el cálculo del flujo de fondos se realizó desde el punto de vista del contratista y la inversión que requiere para cada modelo. Posterior a este cálculo, y ya es-

Cuadro 4. Valor de biomasa por modelo

MAQUINARIA		Modelo 1 (USD/t)	Modelo 2 (USD/t)	Modelo 3 (USD/t)	Modelo 4 (USD/t)
Grúa trineumática			1,7	5,8	
Forwarder		15,2	10,6		
Grúa forestal cosechando					6,0
Grúa forestal cargando					1,9
Grúa forestal chipeando		9,4	9,4	9,4	
Enfardadora					15,9
Cargadora frontal		2,4	2,4	2,4	
Chipera		10,0	10,0	10,0	
SUBTOTAL		37,0	34,2	27,6	23,8
VALOR TIR 15%		44,1	55,0	37,9	32,2
Chipera de planta					6,0
Flete 10 km	4,0	4,0 t	4,0	4,0	2,8
Flete 30 km	5,5	5,5	5,5	5,5	3,9
Flete 60 km	7,0	7,0	7,0	7,0	4,9
Distancia de flete TIR 15% (sin valor madera)	10 km	48,1	59,0	41,9	41,0
	30 km	49,6	60,5	43,4	42,1
	60 km	51,1	62,0	44,9	43,1
Valor madera	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Fuente: Elaborado por el autor.

timando el valor final del producto, además del flete, se le sumarán los 6 USD/t que representan el costo de chipeado en la planta destino.

En esta primera etapa de estudio y en función de los valores de biomasa obtenidos por modelo, se establecerá el modelo 3 como referencia para los análisis posteriores. A modo de ejemplo de sensibilidad del cálculo de la TIR, se presentan en el Gráfico 6 las variaciones de la tasa en función del valor (USD/t) del chip de biomasa. Allí se destaca la tasa del 15% que se fijó como objetivo para definir el precio, el que resulta en 37,9 USD/t de biomasa acondicionada. Se puede observar que por debajo de los 34 USD/t de precio de venta de la biomasa, el proyecto tiene un flujo económico negativo, o sea, no se cubren los costos durante su desarrollo.

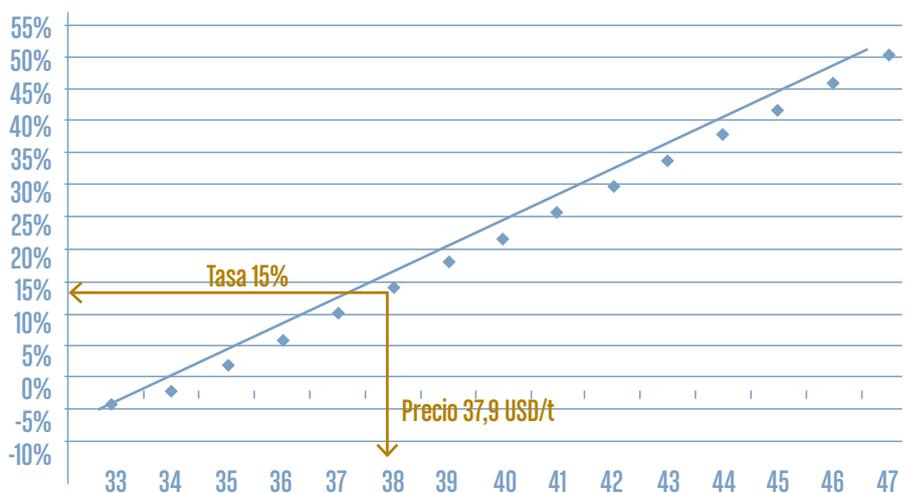
9.4 Fletes a destino

Para estimar los costos del flete, se consideraron las tres opciones de distancias antes definidas. Para los tres primeros modelos se utilizó como base un camión del tipo chipero. En el costo del flete del cuarto modelo, se consideró la utilización de un camión forestal playo, dado que los rollos enfardados de biomasa se pueden cortar a los largos de los rollos de madera. Esto disminuye el costo del flete al estar transportando mayor carga por viaje y utilizar un tipo de transporte que presenta mayor disponibilidad.

En el Gráfico 7, se ven reflejados los costos del flete. El valor de la primera fila muestra el resultando del costo de extracción y preparación con carga. En negro, están los costos del flete estimados por cada distancia propuesta, y los totales en destino por cada tramo están en blanco.

El costo estimado del camión chipero para los viajes cortos, de 10 km, es de 4 USD/t. Por lo tanto, el monto final de la tonelada de biomasa acondicionada trasladada a la industria destino totaliza 48,1 USD/t para el modelo 1, 59,0 USD/t para el modelo 2 y 41,9 USD/t para el modelo 3. En el caso de los fletes para distancias de 30 km, cuyo costo es de 5,5 USD/t, los totales para el primer modelo son 49,6 USD/t; 60,5 USD/t para el segundo mo-

Gráfico 6. Variación de la TIR en el modelo 3



Fuente: Elaborado por el autor.

Gráfico 7. Costos de flete por modelo

	1	2	3	4
Total sobre camión (USD/t)	44,1	55,0 USD/t	37,9 USD/t	32,2
Chipera en planta (USD/t)				6,0
Distancia 10 Km (4 USD/t)	48,1	59,0	41,9	(2,8 USD/t) 41,0
Distancia 30 Km (5,5 USD/t)	49,6	60,5	43,4	(3,9 USD/t) 42,1
Distancia 60 Km (7 USD/t)	51,1	62,0	44,9	(4,9 USD/t) 43,1
Valor madera en pie (USD/t)	5	5	5	5

Fuente: Elaborado por el autor.

delo y 43,4 USD/t en el tercer modelo. En el traslado de la biomasa a 60 km, el costo es de 7 USD/t y los costos finales suman 51,1 USD/t para el primer modelo, 62,0 USD/t para el segundo y 44,9 USD/t para el tercer modelo.

El costo del camión utilizado en el cuarto modelo es de 2,8 USD/t para las distancias de 10 km, 3,9 USD/t para las distancias de 30 km y 4,9 USD/t para distancias de 60 km. Los costos finales para el cuarto modelo, según cada distancia son: 41,0 USD/t, 42,1 USD/t y 43,1 USD/t para las distancias de 10 km, 30 km y 60 km, respectivamente.

Por último, se introduce el concepto del costo de la madera en pie, a modo de discusión, considerando atribuirle un valor económico a la biomasa residual en campo. Hasta el momento, no se establece una disminución en la productividad a futuro de los campos forestales. Si a causa de la extracción de biomasa se determina que es necesaria una fertilización para conservar la rentabilidad futura del bosque implantado, es menester que el valor considerado para la madera supere el costo de fertilización extra, para compensar el gasto y retribuir al productor el beneficio de la producción. En el Cuadro 4, se propone un valor de 5 USD/t de biomasa forestal cosechada. Este valor no está incluido en el costo final de ninguno de los modelos. Deberá ser sumado al final.

Es importante no perder de vista que no hay experiencias en la Argentina de la utilización de la biomasa residual a largo plazo, por lo que se debe rever continuamente si se presentan daños ambientales. En el caso de existir, se debe evaluar cómo mitigar el impacto y analizar sus costos. En función de este análisis, se puede determinar el valor de la madera.

10. SECADO DE LA BIOMASA RESIDUAL

El secado natural se basa en aprovechar las condiciones ambientales favorables para facilitar la deshidratación de los residuos. En el caso de los residuos forestales procedentes de la tala rasa de montes implantados, existen dos posibilidades: realizar el secado directamente en el monte o realizar el secado después de haberlos acondicionado. En ambos casos, la disminución en el contenido de humedad incrementa la energía calórica disponible de la biomasa, disminuye el riesgo de incendio por fermentación y simplifica el almacenado posterior en planta.

La humedad de la madera recién cortada oscila entre 55 y 60% y se reduce, por oreo natural, siguiendo una curva hiperbólica según Huelmo, 2016. En el mismo trabajo, Prando plantea que la madera estacionada reduce su humedad en los primeros dos meses, llega al 40%; en cinco meses alcanza el 30%; en ocho meses, el 25% y en doce meses, el 20%. El secado natural se estabiliza en valores que dependen de la humedad relativa ambiental.

La humedad promedio que se logra en la práctica se estima que es de 25% (más de seis meses de estacionamiento). Para asegurar un mejor secado al aire libre, Huelmo (2016) recomienda un estibado en pilas no mayores a 1,50 m de altura, con calles en dirección a los vientos dominantes y en terreno con buena escorrentía superficial. Hay que tener en cuenta que tampoco debería ser demasiado prolongado el tiempo de estibado, ya que aumentaría los riesgos de volver a humedecer (sobre todo en otoño e invierno) y de provocar pérdidas de biomasa por la degradación biológica de los residuos forestales.

El objetivo de obtener un buen secado es lograr una buena calidad de combustible biomásico, con mayor concentración de energía, y disminuir la extracción de nutrientes del bosque implantado, promoviendo la caída de las hojas o acículas, según sea el caso. En los países nórdicos, se suele realizar un apilado de la biomasa residual en grandes pilas que se cubren con un *film* de papel encerado para evitar que penetre el agua de la lluvia.

11. BIOMASA EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA

En términos generales, se analizó, hasta ahora, la biomasa forestal como un producto residual obtenido en un proceso productivo, en este caso un raleo o una tala rasa. El cambio de concepto, es decir, el de estudiar la biomasa por su energía, implica considerar el producto residual de origen forestal como un combustible renovable. Este cambio de enfoque debe ser parte de un cambio cultural, ya que involucra toda la cadena forestal desde su origen. El análisis desde este punto de vista conlleva evaluar las características de la biomasa que influyen en las cualidades como combustible, esto es:

1. Poder calorífico (varía según la especie).
2. Humedad.
3. Proporciones de madera, corteza, hojas.

El poder calorífico de un combustible expresa la cantidad de energía liberada durante la combustión completa de una unidad de masa del combustible.

Por definición, se denomina poder calorífico inferior (PCI) a la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión, ya que no se produce cambio de fase y se expulsa como vapor.

La humedad en la madera se expresa como porcentaje y se puede calcular en función del peso seco de la madera o en función del peso húmedo. El contenido de humedad en la madera cambia su poder calorífico, lo reduce (Gráfico 9).

La composición de la madera cambia el porcentaje de cenizas, la madera sólida sin corteza presenta menor porcentaje de cenizas, la corteza y las hojas, por el contrario, aumentan la proporción de estas. Las cenizas pueden fusionarse y generar escoria en las parillas de quemado, disminuyendo el flujo de aire primario y generando problemas en la combustión. En este sentido, las cenizas de la madera y de la corteza tienen mayores temperaturas de fusión (más de 1 300 °C). Las hojas y los tallos verdes generan cenizas cuya temperatura de fusión es menor (AVEBIOM, 2008). En función de esto, es importante lograr apilar correctamente la biomasa ya que el secado y la defoliación que se obtenga en ese primer período de estivado influirá considerablemente en la mejor calidad y en el incrementando del poder calorífico que posea el combustible.

A efectos prácticos se usarán los siguientes valores medios (AVEBIOM, 2008) para combustibles de madera (H es la humedad basada en al peso húmedo).

- PCI pellets (H 10%) = 17 MJ/kg = 4 000 kcal/kg.
- PCI madera (H 20%) = 15 MJ/kg = 3 600 kcal/kg.
- PCI chips (H 30%) = 12 MJ/kg = 2 900 kcal/kg.
- PCI chips (H 40%) = 11 MJ/kg = 2 600 kcal/kg.

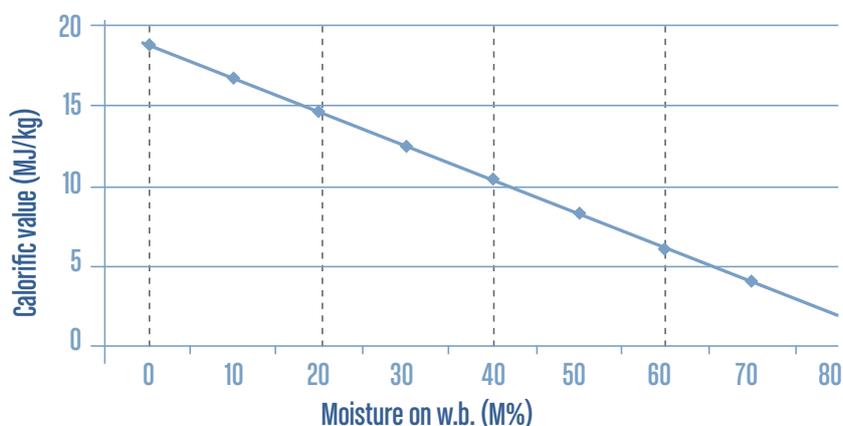
En términos generales, la biomasa posee una menor capacidad calorífica cuando se la compara con otros combustibles que provienen de restos fósiles. En el Gráfico 10 se presenta una comparación entre la energía que poseen combustibles fósiles de uso corriente y combustibles de madera con distintos grados de humedad.

Claramente, la entrega de energía por unidad de peso es ampliamente mayor en los combustibles fósiles. Además, si se consideran también la facilidad en el manejo y el acopio de estos combustibles, queda claro el porqué está tan desarrollado su uso masivo en procesos de generación térmica.

Al momento de la realización de este informe, el valor que los usuarios pagan por los combustibles fósiles se encuentra en ascenso, no así los valores en el mercado forestal. Por lo tanto, si se realiza una comparación del valor de los combustibles en función de la energía, se verifica (Gráfico 11) que los combustibles fósiles, a pesar de tener una mayor concentración energética, su costo por unidad de energía es muy superior. Para realizar esta comparación se consideraron dos combustibles de madera. En primer lugar, se contempló el chip que se comercializa actualmente en el mercado, estimando la humedad en el 30% y utilizando el precio que paga una empresa en Piray, Misiones a una distancia intermedia (Cuadro 5. Planilla de cálculos de energía del Anexo). En segundo lugar, se incorporó el chip que resultaría de la aplicación del modelo 3 a una distancia de 30 km identificándolo como un valor medio del chip de biomasa residual y considerando un 40% de humedad relativa (HR) como base para el estudio comparativo.

Como se aprecia en la comparación de los costos por unidad energética, el valor de los combustibles de madera es muy inferior al de los combustibles fósiles. En este contexto, el costo de obtener una tonelada de biomasa como combustible, según el modelo 3 propuesto, sigue siendo inferior a los otros combustibles fósiles, a pesar de considerar un contenido de humedad alto.

Gráfico 8. PCI en función del porcentaje de humedad



Fuente: AVEBIOM (2008).

11. Biomasa en función de la energía

Gráfico 9. Energía en función del combustible

COMBUSTIBLE	ENERGÍA (kcal/kg)	ENERGÍA (MBTU/t)
Fueloil	9 600	38
GLP	11 000	43
Carbón	6 500	25
Pellets 10% H	4 000	16
Madera 20% H	3 600	14
Chips 30% H	2 900	11
Chips 40% H	2 600	10

Nota: 1 MJ/kg=0,95 MBTU/t

Fuente: Elaborado por el autor sobre la base AVEBIOM, 2008.

Gráfico 10. Precio de combustibles por venta y por energía

COMBUSTIBLE	VALOR MERCADO (USD/t)	ENERGÍA (MBTU/t)	VALOR POR ENERGÍA (USD/MBTU)
Fueloil	350	38	9,2
GLP	600	43	14
GN	430	37	12
Chips 30% H	14	11	1,3
Chips 40% H (Modelo 3)	43,4	10	4,3

Fuente: Elaborado por el autor (cotización del dólar: \$20).

12. CONCLUSIONES

El aprovechamiento de la biomasa residual en bosques implantados ya sea en raleo o en tala rasa, en cualquiera de los cuatro métodos propuestos, presenta un costo muy superior al valor que actualmente tiene el chip con destino en las plantas industriales que lo consumen en los procesos de generación de energía térmica o como materia prima.

Una empresa (costos diciembre 2017) paga por la tonelada de chip con destino a combustible para su planta eléctrica en Piray, Misiones, cargada sobre camión y sin flete, 9 USD/t. Este valor es comparable con los 37,9 USD/t que se necesitan para extraer una tonelada de biomasa residual, en el modelo 3, sin considerar el valor de la madera en pie. Este valor que tiene el mercado está sustentado por dos factores. Por un lado, se encuentra la gran oferta, ya que los aserraderos tienen un desperdicio alto y en muchos casos no lo reutilizan. Además, existe la prohibición de la quema de los residuos, por lo que se vuelca toda esta oferta al mercado. En muchos casos, los aserraderos venden el material triturado que proviene directo de la línea de producción como insumo para la industria celulósica y del tablero de partículas. Este producto, que debe ser libre de corteza y residuos, presenta un mayor valor en el mercado, por lo que el material que no pueden ubicar en esa industria, por ejemplo, los costaneros, lo trituran y cargan en camión, y los consideran como los únicos costos. Dado que, en este circuito, realmente es considerado como un residuo, es una forma económica de tener una disposición final asegurada.

Por otro lado, también se encuentra la demanda de producto denominado “chip leña” que no está desarrollado, ya que son pocas las industrias que lo adquieren en el mercado mayorista. Lo que implica que es fundamental la realización de nuevos proyectos que utilicen la biomasa en sus procesos, para que se incremente su demanda.

El proceso antes descrito es de implementación paulatina, ya que los proyectos de esta índole son costosos y requieren de una planificación exhaustiva. En el noreste de la provincia de Corrientes, en la ciudad de Virasoro, están construyendo una usina eléctrica de 40 MW de potencia y también está aprobada la construcción de una segunda de tamaño similar. En la localidad de Santo Tomé, se está proyectando realizar una central de 15 MW. Este proyecto se adjudicó en el RenovAr 2.0. Dichos proyectos permitirán en las distintas zonas aumentar la demanda de biomasa y, a mediano plazo, incrementar sus valores.

Los valores que en la actualidad se evidencian en el mercado de la biomasa, partiendo casi exclusivamente de biomasa de origen de la industria forestal, se encuentran muy por debajo de los costos de los modelos propuestos en este trabajo. Esto determina que los modelos, bajo el paradigma actual del uso de la biomasa, no son económicamente rentables. Esta afirmación se evidencia claramente en las localidades visitadas, dado que casi

no hay utilización de biomasa residual. De los dos emprendimientos que se relevaron en la recorrida, ambos en Misiones, uno pertenece a una planta industrial, y el otro, a un emprendedor. En el caso de la planta industrial, esta aprovecha los residuos de su cosecha para la fabricación de pellets. Por su parte, el emprendedor acondicionaba biomasa residual en las limpiezas de campo. Esta empresa no pudo realizar más esa actividad porque no logró producirla a los valores del mercado, lo que la tornó inviable económicamente para su uso comercial.

Estos dos casos son un ejemplo que muestra que existe interés por parte de los productores, de las empresas de servicios y de las industrias en la utilización de la biomasa residual. En muchos casos, han realizado inversiones en maquinaria que luego no pudieron seguir utilizando porque no cubrían los costos, por el valor de la biomasa en el mercado actual. Como consecuencia, las limpiezas de campo se realizan con quemas controladas, que liberan CO₂ a la atmósfera, y se pierde la posibilidad de utilizar ese residuo energético, por una cuestión de costos.

Esta descripción demuestra que, si se logra cambiar el concepto cultural a partir del cual se considere que la biomasa es un combustible de origen orgánico y no un subproducto o residuo de un proceso productivo, se podría considerar a la biomasa como un combustible renovable. Con este cambio, el mercado posee valores mucho mayores, por lo cual, la biomasa forestal es altamente competitiva, ya sea por valor como por calidad de combustible. De esta forma, el aprovechamiento de la biomasa residual de campo sería completamente factible, logrando generar energía renovable a menores costos y disminuyendo el aporte de CO₂ a la atmósfera. Si a esto se le suman mejoras en infraestructura, como por ejemplo en caminos, y el logro de reducciones en los costos relativos salariales y de los impuestos, se alcanzaría una mejor competitividad del residuo biomásico.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Schwarz, G.** 2014. *Una Argentina competitiva, productiva y federal*. Buenos Aires. Instituto de Estudios sobre la Realidad Argentina y Latinoamericana (IERAL) de Fundación Mediterránea (disponible en: http://www.ieral.org/images_db/noticias_archivos/2832-Cadena%20forestaindustrial.pdf).
- AVEBIOM.** 2008. *Manual de combustibles de madera*. Valladolid (España).
- Björheden, R.** 1997. *Studies of large scale forest fuel supply systems*. Uppsala (Suecia). Swedish University of Agricultural Sciences.
- Castro Gil, M., y C. Sánchez Naranjo.** 1997. *Biocombustibles*. Madrid. PROGENSA.
- Consejo Federal de Inversiones.** 2015. *Actualización del inventario de plantaciones forestales de la provincia de Corrientes*.
- Egnell, G. y R. Björheden.** 2012. "Options for increasing biomass output from long-rotation Forestry" (disponible en: <https://doi.org/10.1002/wene.25>).
- FAO.** 1991. *Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales*. Roma (disponible en: <http://www.fao.org/3/T0269S/T0269S00.htm>)
- Griffa, B., L. Marcó y E. Goldstein.** 2017. "Producir electricidad con biomasa: beneficios, experiencias y actualidad en Argentina", en *RFCE* N. 19, págs. 67-79 (disponible en <http://dx.doi.org/10.30972/rfce.0192858>).
- Grupo Tragsa.** 2017. *Especial biomasa. La cadena monte-energía: una nueva oportunidad de desarrollo*. Madrid (disponible en <https://www.tragsa.es/es/comunicacion/noticias/Documents/ESPECIAL%20BIOMASA%2007.pdf>).
- Huelmo, D.** 2016. *Biomasa: definición y características* (disponible en <https://docplayer.es/25868498-Biomasa-definicion-y-caracteristicas.html>).
- Junginger, M., A. Faaij, R. Björheden, W.C. Turkenburg.** 2005. "Technological learning and cost reductions in wood fuel supply chains in Sweden", en *Biomass and Bioenergy* Vol. 29 N° 6, págs. 399-418.
- Loaiza Navarro, M.** 2015. *Modelo de generación de energía a partir de biomasa forestal*. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Santiago de Chile. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Moya, R. y C. Tenorio.** 2012. *Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno-celulósicos producidos en Costa Rica*. Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Moya, R. y C. Tenorio.** 2013. *Parámetros energéticos de residuos de 10 especies forestales de rápido crecimiento*. Documento I. Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- NEA Corrientes Forestal.** <http://neacorrientesforestal.blogspot.com.ar/p/boletines-de-precios.html>

NEA Misiones Forestal. <http://neamisionesforestal.blogspot.com.ar/p/precios-forestales.html>

Nilsson, B. 2016. "Extraction of logging residues for bioenergy", en *Linnaeus University Dissertations* N.º 270.

OLADE. (S/fecha). *Oferta de energía* (disponible en <http://www.olade.org/sites/default/files/PGIE%20SESION%2006%20Oferta%20le%C3%B1a.pdf>).

Ortiz, L., A. Tejada y A. Vázquez. 2003. "Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte III: Producción de elementos densificados", en *Revista CIS-Madera*, págs. 17-32.

Rummer, B., D. Len, y O. O'Brien, O. 2004. *Forest residues bundling project. New technology for residue removal.* Alabama (EE. UU.) (disponible en https://www.fs.fed.us/woodybiomass/strategy/bundling/documents/bundler_report_final.pdf).

Uasuf, J. y A. Hilbert. 2013. *El uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina.* Buenos Aires. INTA (disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_uso_de_biomasa_forestal_para_bioenergia.pdf).

Unión Europea. 2003. "Directiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo" en *Diario Oficial de la Unión Europea*, 17 de mayo de 2003 (disponible en <http://www.ebb-eu.org/legis/OJ%20promotion%20ES.pdf>).

ANEXO



Cuadro 5. Planilla de cálculos de energía

Poder calorífico inferior (valores medios)					
Combustibles	MJ/kg	MBTU/t	\$/t	\$/MBTU	USD/MBTU
Fueloil	40	38	7 000	184,2	184,2
GLP	46	43	12 000	279,1	279,1
Carbón	27	25			
Pellets	17	16			
Madera 20% H	15	14			
Chip 30% H	12	11	280,0	25,5	25,5
Chip modelo 3 40% H	11	10	43,4	4,3	4,3

Fuente: Elaborado por el autor.

Cuadro 6. Planilla de cálculos costos de maquinaria

Maquinaria	Potencia	V. adquisición	Vida útil	Consumo	Gasto gasoil	Mantenim.	Amort. + Int. + Seg.	Costo MO	Costo total	t/h	t/día	USD/tn
	HP	USD		l/h	USD/h		USD/h	USD/h	USD/h	USD/h	t/día	USD/tn
Grúa trineumática	90	150 000	15 000	9,72	11,18	23,45	12,96	10,63	58,21	10	80,0	5,8
Forwarder	160	250 000	15 000	17,28	19,87	39,18	21,45	10,63	91,13	6	48,0	15,2
Grúa forestal cosechando	110	145 000	15 000	11,88	13,66	22,91	12,53	10,63	59,73	10	0,0	6,0
Grúa forestal cargando	110	130 000	15 000	11,88	13,66	20,66	11,26	10,63	56,21	30	0,0	1,9
Grúa forestal chipeando	110	130 000	15 000	11,88	13,66	20,66	11,26	10,63	56,21	6	0,0	9,4
Enfardadora	160	350 000	15 000	17,28	19,87	19,18	29,98	10,63	79,67	5	0,0	15,9
Cargadora frontal	70	60 000	10 000	7,56	8,69	9,74	6,92	10,63	35,98	15	0,0	2,4
Chipera	215	110 000	8 000	23,22	26,70	18,76	14,69	-	60,16	6	0,0	10,0
Cotización del dólar: \$20.											Jornada (horas)	8

Fuente: Elaborado por el autor.

Cuadro 7. Cálculo de costos por maquinaria

	Grúa trineumática			Forwarder		Grúa forestal chipeando	
Costo fijo	44 820	23,6		60 953	32,1	41 593	21,9
Costo variable	35			59		34	
	58	6 USD/t		91	15 USD/t	56	9,4 USD/t
Costo mensual MO	1 683	USD		\$1 683	USD	1 683	USD
Costo anual	20 200	USD/h		20 200	USD/h	20 200	USD/h
Costo horario	11	USD		11	USD	11	USD
1 Depreciación anual	15 200	USD/h		25 333	USD/h	13 173	USD/h
Costo de adquisición	150 000	USD		250 000	USD	130 000	USD
Valor residual	30 000	USD		50 000	USD	26 000	USD
Años vida útil	7,9			7,9		7,9	
VU de trabajo	15 000	h		15 000	h	15 000	h
Utilidad anual	1 900	h/año		1 900	h/año	1 900	h/año
2 Intereses anuales	9 000	USD/año		15 000	USD/año	7 800	USD/año
Costo de adquisición	150 000	USD		250 000	USD	130 000	USD
Tasa interés	10	%		10	%	10	%
3 Seguros y tasas	0,22	USD/h		0,22	USD/h	0,22	USD/h
Gasto fijo anual	420	USD/año		420	USD/año	420	USD/año
Utilidad anual	1 900	h/año		1 900	h/año	1 900	h/año
4 Costo de reparación	23	USD/h		38	USD/h	20	USD/h
Costo de adquisición	150 000	USD		250 000	USD	130 000	USD
Factor de reparación	0,00015	1/h		0,00015	1/h	0,00015	1/h
5 Costos de lubricante	0,95	USD/h		1,7	USD/h	1,2	USD/h
Potencia de motor	90	Hp		160	Hp	110	Hp
Precio del lubricante	3,5	USD/l		3,5	USD/l	3,5	USD/l
6 Costo de combustible	11,2	USD/h		19,9	USD/h	13,7	USD/h
Consumo del combustible	9,72	l/h		17,28	l/h	11,88	l/h
Precio del combustible	1,2	USD/l		1,2	USD/l	1,2	USD/l
Consumo del combustible	9,72	l/h		17,28	l/h	11,88	l/h
Potencia de motor	90	Hp		160	Hp	110	Hp
Grado de esfuerzo	60	%		60	%	60	%
Consumo teórico	0,18	l/HP/h		0,18	l/HP/h	0,18	l/HP/h

	Grúa forestal cosechando		Enfardadora		Chipera		Cargadora frontal	
	44 013	23,2	77 167	40,6	27 920	14,7	33 340	23,2
	37	USD	39	USD	45	USD	18	USD
	60	6,0 USD/t	80	16 USD/t	60	10 USD/t	36	6,0 USD/t
	1 683	USD	1 683	USD	-	USD	1 683	USD
	20 200	USD/h	20 200	USD/h		USD/h	20 200	USD/h
	11	USD	11	USD	-	USD	11	USD
1	14 693	USD/h	35 467	USD/h	20 900	USD/h	9 120	USD/h
	145 000	USD	350 000	USD	110 000	USD	60 000	USD
	29 000	USD	70 000	USD	22 000	USD	12 000	USD
	7,9		7,9		4,2		5,3	
	15 000	h	15 000	h	8 000	h	10 000	h
	1 900	h/año	1 900	h/año	1 900	h/año	1 900	h/año
2	8 700	USD/año	21 000	USD/año	6 600	USD/año	3 600	USD/año
	145 000	USD	350 000	USD	110 000	USD	60 000	USD
	10	%	10	%	10	%	10	%
3	0,22	USD/h	0,26	USD/h	0,22	USD/h	0,22	USD/h
	420	USD/año	500	USD/año	420	USD/año	420	USD/año
	1 900	h/año	1 900	h/año	1 900	h/año	1 900	h/año
4	22	USD/h	18	USD/h	17	USD/h	9	USD/h
	145 000	USD	350 000	USD	110 000	USD	60 000	USD
	0,00015	1/h	0,00005	1/h	0,00015	1/h	0,00015	1/h
5	1,2	USD/h	1,7	USD/h	2	USD/h	1	USD/h
	110	Hp	160	Hp	215	Hp	70	Hp
	3,5	USD/l	3,5	USD/l	4	USD/l	4	USD/l
6	13,7	USD/h	19,9	USD/h	27	USD/h	9	USD/h
	11,88	l/h	17,28	l/h	23,22	l/h	7,56	l/h
	1,2	USD/l	1,2	USD/l	1	USD/l	1	USD/l
	11,88	l/h	17,28	l/h	23,22	l/h	7,56	l/h
	110	Hp	160	Hp	215	Hp	70	Hp
	60	%	60	%	60	%	60	%
	0,18	l/Hp/h	0,18	l/Hp/h	0,18	l/Hp/h	0,18	l/Hp/h

Fuente: Elaborado por el autor.

Cuadro 8. Cálculo de *cashflow*

Modelo 1	Total	Forwarder	Chipera	Cargadora	Grúa forestal
Inversión	550 000	250 000	110 000	60 000	130 000
Horas/mes	160	1 920	1 920	1 920	1 920
Ingreso	426 022	174 975	115 498	27 630	107 920
Costos operativos	363 174	133 792	87 284	55 796	86 301

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Precio	44,1 USD/t	Precio TIR 15%						
t/año	11 520							
Ingreso	508 032	508 032	508 032	508 032	508 032	508 032	508 032	508 032
IIBB+DC	25 402	25 402	25 402	25 402	25 402	25 402	25 402	25 402
Ingreso neto	482 630	482 630	482 630	482 630	482 630	482 630	482 630	482 630
Costo								
OP	363 174	363 174	363 174	363 174	363 174	363 174	363 174	363 174
EBITDA	119 456	119 456	119 456	119 456	119 456	119 456	119 456	119 456
Inversión	550 000							
Amortización contable	110 000	110 000	110 000	110 000	110 000		0	0
Resultado contable	9 456	9 456	9 456	9 456	9 456	119 456	119 456	119 456
IIGG	3 310	3 310	3 310	3 310	3 310	41 810	41 810	41 810
Resultado neto	116 147	116 147	116 147	116 147	116 147	77 647	77 647	77 647
Cash flow	433 853	65 506	65 506	65 506	65 506	77 647	77 647	77 647
TIR	14,9							

Modelo 2	Total	Forwarder	Chipera	Grúa trineumática	Cargadora	Grúa forestal
Inversión	700 000	250 000	150 000	110 000	60 000	130 000
Horas/mes	160	1 920	1 920	1 920	1 920	1 920
Costos operativos	450 063	133 792	86 889	87 284	55 796	86 301

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Precio	55,0 USD/t	Precio TIR 15%						
t/año	11.520							
Ingreso	633 600	633 600	633 600	633 600	633 600	633 600	633 600	633 600
IIBB+DC	31 680	31 680	31 680	31 680	31 680	31 680	31 680	31 680
Ingreso neto	601 920	601 920	601 920	601 920	601 920	601 920	601 920	601 920
Costo								
OP	450 063	450 063	450 063	450 063	450 063	450 063	450 063	450 063
EBITDA	151 857	151 857	151 857	151 857	151 857	151 857	151 857	151 857
Inversión	700 000							
Amortización contable	140 000	140 000	140 000	140 000	140 000		0	0
Resultado contable	11 857	11 857	11 857	11 857	11 857	151 857	151 857	151 857
IIGG	4 150	4 150	4 150	4 150	4 150	53 150	53 150	53 150
Resultado neto	147 707	147 707	147 707	147 707	147 707	98 707	98 707	98 707
Cash flow	552 293	147 707	147 707	147 707	147 707	98 707	98 707	98 707
TIR	15							

Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo

Modelo 3	Total	Forwarder	Chipera	Cargadora	Grúa forestal
Inversión	450 000	150 000	110 000	60 000	130 000
Horas/mes	160	1 920	1 920	1 920	1 920
Costos operativos	316 271	86 889	87 284	55 796	86 301

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Precio	37,9 USD/t	Precio TIR 15%						
t/año	11 520							
Ingreso	436 608	436 608	436 608	436 608	436 608	436 608	436 608	436 608
IIBB+DC	21 830	21 830	21 830	21 830	21 830	21 830	21 830	21 830
Ingreso neto	414 778	414 778	414 778	414 778	414 778	414 778	414 778	414 778
Costo								
OP	316 271	316 271	316 271	316 271	316 271	316 271	316 271	316 271
EBITDA	98 507	98 507	98 507	98 507	98 507	98 507	98 507	98 507
Inversión	450 000							
Amortización contable	90 000	90 000	90 000	90 000	90 000		0	0
Resultado contable	8 507	8 507	8 507	8 507	8 507	8 507	8 507	8 507
IIGG	2 977	2 977	2 977	2 977	2 977	34 477	34 477	34 477
Resultado neto	95 530	95 530	95 530	95 530	95 530	64 030	64 030	64 030
Cash flow	354 470	95 530	95 530	95 530	95 530	64 030	64 030	64 030
TIR	15,2							

Modelo 4	Total	Grúa forestal cosechando	Enfardadora	Chipera	Cargadora	Grúa forestal
Inversión	495 000	145 000	350 000	-	-	-
Horas/mes	160	1 920	1 920	0	0	0
Costos operativos	186 014	90 621	95 392	-	-	-

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Precio	37,9 USD/t	Precio TIR 15%						
t/año	9 600							
Ingreso	309 120	309 120	309 120	309 120	309 120	309 120	309 120	309 120
IIBB+DC	15 456	15 456	15 456	15 456	15 456	15 456	15 456	15 456
Ingreso neto	293 664	293 664	293 664	293 664	293 664	293 664	293 664	293 664
Costo								
OP	186 014	186 014	186 014	186 014	186 014	186 014	186 014	186 014
EBITDA	107 650	107 650	107 650	107 650	107 650	107 650	107 650	107 650
Inversión	495 000							
Amortización contable	99 000	99 000	99 000	99 000	99 000		0	0
Resultado contable	8 650	8 650	8 650	8 650	8 650	107 650	107 650	107 650
IIGG	3 028	3 028	3 028	3 028	3 028	37 678	37 678	37 678
Resultado neto	104 623	104 623	104 623	104 623	104 623	69 973	69 973	69 973
Cash flow	390 377	104 623	104 623	104 623	104 623	69 973	69 973	69 973
TIR	15							

Fuente: Elaborado por el autor.

Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo

COLECCIÓN
INFORMES
TÉCNICOS

N.º 7

Organización de las Naciones Unidas
para la Alimentación y la Agricultura (FAO)

www.fao.org

ISBN 978-92-5-132013-6



9 789251 320136

CA7225ES/1/12.19