



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Evaluación del suministro potencial de astillas para uso energético en la Reserva Costera Valdiviana, comuna de Corral, región de Los Ríos.

Patrocinante: Sr. Rodrigo Labbé

Proyecto del Trabajo de Titulación presentado como parte de los requisitos para optar al título de **Ingeniero Forestal**

MATÍAS NICOLÁS JOFRÉ BRIONES

VALDIVIA

2021

	Índice de materias	Página
	Calificación del Comité de Titulación	i
	Resumen	ii
1	INTRODUCCIÓN	1
2	ESTADO DEL ARTE	3
2.1	Biocombustible solido a partir de biomasa forestal	3
2.2	Astillas como fuente de biocombustible sólido	3
2.3	Contenido de humedad y secado natural de biomasa forestal	4
2.4	Impacto del aprovechamiento forestal sobre el ambiente físico	5
2.5	Astillado a orilla de camino y en central de biomasa	6
2.6	Aprovechamiento y transporte de astillas	7
3	MATERIAL Y MÉTODOS	8
3.1	Material	8
3.2	Métodos	8
3.2.1	Área de estudio	8
3.2.2	Análisis cartográfico para determinar la superficie potencialmente productiva	9
3.2.3	Definición de parámetros de calidad de astillas según uso energético	10
3.2.4	Suministro de biomasa	11
3.2.5	Estimación de costos de aprovechamiento y transporte	12
4	RESULTADOS	16
4.1	Superficie de plantaciones productiva bajo medidas de resguardo ambiental	16
4.2	Calidad y tipo de astilla a producir	18
4.3	Suministro potencial de astillas	18
4.4	Estimación de costos de aprovechamiento y transporte	21
4.4.1	Costos de aprovechamiento	21
4.4.2	Costos de transporte	22
5	DISCUSIÓN	24
6	CONCLUSIONES	25
7	REFERENCIAS	27
8	ANEXOS	31
1	Rendimiento de los equipos	31
2	Área de estudio	32

3	Ancho mínimo de la zona de protección de cursos y cuerpos de agua	33
4	Especificación de las propiedades de las astillas de madera y combustible triturado según la norma UNE-EN ISO 17225-4: 2014	34
5	Ruta óptima	35
6	Mapa de pendientes	36
7	Costos de cosecha	37
8	Distancias totales desde cada unidad de cosecha	38
9	Costos de transporte para los diferentes tipos de camiones según las diferentes rutas de recorrido	39

Calificación del Comité de Titulación

	Nota
Patrocinante: Sr. Rodrigo Labbé Peña	6,5
Informante: Sr. Marco Contreras Salgado	6,6
Informante: Sr. Francisco Torres Bruna	5,9

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.



Sr. Rodrigo Labbé

Resumen

Según FAO 2016, existen ejemplos que indican que el manejo sostenible de plantaciones a pequeña escala es compatible con la conservación de zonas con alto valor ecológico. La Reserva Costera Valdiviana tiene como fin la protección de más de 50 mil hectáreas de bosque templado y húmedo en la región de Los Ríos. Al interior de la reserva existen 3.000 hectáreas de plantaciones. El predio Venecia tiene 617 hectáreas de plantaciones de *E. globulus*. Estas plantaciones podrían ser utilizadas para el suministro de astillas a una planta de energía térmica o eléctrica, contribuyendo al desarrollo económico local, y al uso y fomento de energías renovables. El objetivo del estudio fue estimar el potencial de producción de astillas en el predio Venecia considerando medidas de resguardo ambiental, y calcular el costo de suministro de astillas a una potencial planta de bioenergía ubicada en la ciudad de La Unión. Se cuantificó la superficie productiva considerando restricciones de resguardo ambiental, se definieron parámetros de calidad de astilla, se estimó la producción anual de astillas y residuos, y se estimaron costos de suministro para dos escenarios logísticos plausibles de implementar. La superficie con potencial productivo es de 423,3 ha, descontando zonas de protección de cursos de agua y bosque nativo. Se estima que es posible alcanzar una astilla con un contenido de humedad igual o inferior a 35%. El rendimiento promedio por hectárea de astillas es de 120,5 Mg ha⁻¹ (biomasa fustal) y 98,6 Mg ha⁻¹ de residuos. El potencial productivo sostenible de astillas es de 4.160 Mg año⁻¹, equivalente a una superficie de cosecha promedio anual de 34,5 ha. El costo de suministro de astillas puesto en planta es de 28.671 \$ Mg⁻¹ para el escenario de astillado a orilla de camino y 29.067 \$ Mg⁻¹ para el astillado en central de biomasa.

1 INTRODUCCIÓN

El mayor desafío a nivel global en el sector energía para mitigar los efectos negativos del cambio climático es reducir la huella de carbono asociado a la producción de energía. La biomasa tiene una importancia estratégica como fuente de energía renovable en el centro-sur de Chile, es un recurso abundante, y su uso sostenible contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles importados. Además, el uso de biomasa aporta a la economía local mediante la generación de empleos para la recolección, transporte y manejo de la materia prima, la operación de la planta de energía y para la distribución de la energía (térmica y eléctrica) hacia los usuarios.

En el año 2014, la comuna de Valdivia fue declarada zona saturada por material particulado respirable y material particulado fino, siendo la combustión residencial la principal fuente de estas emisiones. El 92% de las viviendas utilizan biomasa como leña para calefacción, cocinas y calderas, estimándose en el año 2016, un consumo promedio de leña por vivienda dentro del radio de la comuna de 10,1 metros cúbicos.

Los altos niveles de contaminación atmosférica debido a las emisiones de material particulado producto del uso de leña húmeda (al quemar madera húmeda, esta no logra calentar suficiente el ambiente, por lo que se debe quemar más cantidades y, en consecuencia, se contamina mucho más) y en calefactores ineficientes, hacen necesario un cambio tecnológico hacia sistemas modernos de calefacción (astillas y pellets de madera) caracterizados por una alta eficiencia en la combustión y mínimas emisiones.

Las astillas son utilizadas como combustible en sistemas de calefacción de mediana y gran escala, en sistemas de cogeneración de energía térmica y eléctrica, y plantas eléctricas, para consumo residencial, comercial e industrial. Para que estas plantas puedan ser viables económicamente en el tiempo y competitivo respecto a combustibles alternativos (electricidad, gas y petróleo), se requiere de una cadena de suministro estable y segura, que permita sostener proyectos de energía en el largo plazo. Esta cadena de suministro incluye las etapas de cosecha (aprovechamiento), procesado (astillado), transporte y almacenamiento. Cada una de las etapas es crítica dado diferentes dificultades técnicas asociadas a las características de la biomasa (forma irregular, alto contenido de agua y baja densidad aparente), condiciones del bosque (pendiente, dimensiones y densidad de los árboles) y requerimientos de resguardo ambiental (protección de cursos de agua, protección del suelo, la flora y la fauna).

Existen ejemplos en el mundo que indican que el manejo sostenible de plantaciones a pequeña escala es compatible con la conservación de zonas con alto valor ecológico. La Reserva Costera Valdiviana (RCV) es una reserva natural que fue inaugurada el 22 de marzo del 2005 y tiene como fin la protección de más de 50 mil hectáreas (ha) de bosque templado y húmedo en la región de Los Ríos. Al interior de la reserva existen alrededor de 3.000 ha de plantaciones exóticas distribuidas en 2 predios, Chaihuín y Venecia. El predio Venecia se encuentra en el sur de la reserva y cuenta con 617 ha de plantaciones de *Eucalyptus globulus Labill* establecidas en el año 1991. Uno de los principales objetivos de la reserva es poder aprovechar estas plantaciones de manera sostenible para sustituirlos por bosque nativo de alto valor de conservación, es por esto, que surge la intención de realizar este proyecto, ya que estas plantaciones podrían ser utilizadas para el suministro de astillas a una planta de energía térmica o eléctrica, mediante el desarrollo de una cadena de suministro estable en el mediano y largo plazo, para sistemas modernos de calefacción de mediana y gran escala, generando un impacto positivo en la comunidad, contribuyendo al desarrollo económico local, y al uso y fomento de energías renovables, además, un proyecto de estas características a través de una planta piloto, posee un alto valor demostrativo que puede ser replicable en otras zonas de la región.

El objetivo general del proyecto es determinar el potencial de suministro de astillas para el abastecimiento de una planta de bioenergía en la comuna de La Unión, a partir del patrimonio de plantaciones de *E. globulus* establecidas en el predio Venecia, en el interior de la RCV.

Los objetivos específicos son:

- (1) Cuantificar e identificar espacialmente la superficie de plantaciones con uso productivo, considerando restricciones de resguardo hídrico, protección del suelo, de la flora y fauna.
- (2) Estimar la calidad de astilla posible de obtener según la norma internacional de astillas para uso energético vigente ISO 17225-4.
- (3) Cuantificar la disponibilidad de astillas y la producción asociada de residuos, en el área con uso potencial productivo.
- (4) Estimar el costo de aprovechamiento y transporte de la astilla bajo dos escenarios de cadenas de suministro que son posibles de implementar en el área de estudio, y determinar la superficie anual de cosecha sostenible.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Biocombustible sólido a partir de biomasa forestal

En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de esta (Bertrán y Morales 2008). En el marco forestal, este recurso energético es la fracción biodegradable de los productos y residuos generados en el aprovechamiento de los bosques, que pueden provenir de podas, raleos, cosechas, residuos madereros industriales y desde bosques establecidos con fines energéticos (Chile forestal 2009). Esta fuente de energía es particularmente atractiva debido a su aporte en la reducción de emisión de gases de efecto invernadero y del volumen de desechos en vertederos (residuos que se obtienen después de las podas, productos de carpintería, papelería, etc.), además contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles importados como el petróleo, gas y carbón (PUCh 2011, UACH 2018).

Según la agencia internacional de energía IEA (2020), la generación de electricidad a partir de biocombustibles sólidos creció de 94.3 TWh a 186.4 TWh entre 1990 y 2019, un crecimiento anual promedio de 2.4% y representó el 6,3% de la generación de electricidad renovable en 2019 en los países que conforman la OCDE (Organización para la cooperación y desarrollo económico). Los países con mayor participación en la generación de electricidad a partir de biocombustibles sólidos son Finlandia (17,4%), Estonia (16,6%), Luxemburgo (15,5%) y Dinamarca (14,6%).

En Chile, los biocombustibles son utilizados para producir energía eléctrica y térmica para consumo propio e inyectar excedentes a la red de distribución, mediante plantas de cogeneración eléctrica, plantas de celulosa y crecientemente en otros procesos industriales como procesos termoquímicos, mecánicos, químicos y biológicos (CNE 2007).

2.2 Astillas como fuente de biocombustible sólido

Egger *et al.* 2013, señalan que las astillas proceden de los aserraderos, de la madera que no es adecuada para aserrar o de los propietarios de bosques, y han sido utilizadas para la producción de calor durante décadas a través de equipos ineficientes. Sin embargo, los equipamientos modernos permiten un funcionamiento automático con un bajo nivel de emisiones y una combustión libre de CO₂. A diferencia del pellet que son utilizadas en calefacción de pequeña escala, las astillas son el combustible para

sistemas de calefacción de mediana y gran escala, como sistemas de calefacción central (edificios), distrital (diferentes edificaciones), plantas de cogeneración (energía eléctrica y térmica) y plantas eléctricas (sistemas mayores a 100 kW de potencia) (Alakangas y Virkkunen 2007). Egger *et al.* 2013, señalan que un sistema moderno de astillas de 50 kW requiere unos 20 minutos de operaciones y trabajos de mantenimiento por semana, mientras que un sistema de 500 kW requiere un aproximado de 45 minutos. Durante los últimos 30 años, la eficiencia (fracción de calor que se convierte en trabajo) promedio de las calderas de biomasa ha aumentado de un 55% a más del 90% (basado en el poder calorífico inferior) y las emisiones promedio de monóxido de carbono han disminuido de 15.000 mg m⁻³ a menos de 50 mg m⁻³ (Schwarz *et al.* 2011).

Debido a su gran variedad de orígenes, la calidad de la astilla puede variar ampliamente (Ortiz 2006). La norma UNE-EN17225-4 determina las clases de calidad de los combustibles y las especificaciones de astillas de madera clasificadas, estableciendo requisitos para diferentes usos energéticos, donde los parámetros críticos para su producción son: el contenido de humedad, distribución granulométrica, contenido de cenizas y poder calorífico (Burgos 2010). El contenido de humedad de la biomasa presenta una gran variedad, desde un 5 a un 100% o más (calculado en base seca), por lo que en muchos casos es necesario un secado previo a su utilización. Los valores recomendados para una combustión eficiente varían entre el 20 y 30%, valores del 60% producen combustiones inestables y por encima del 85% todo el calor generable se invierte en secar la madera (Ortiz 1996). Palmer *et al.* (2011) señalan, que, si el combustible no posee un contenido de humedad mínimo requerido por la caldera, puede ocurrir una gasificación y oxidación incompleta y producir humo blanco. El contenido de humedad afecta el funcionamiento del equipo, en la cantidad de calor disponible y las emisiones generadas (Ortiz 2006).

2.3 Contenido de humedad y secado natural de la biomasa forestal

El contenido de humedad influye directamente en los costos de transporte (representa el 50% del costo de suministro de biomasa), este detalle es de gran importancia, ya que es el que limita al negocio de la biomasa, es por esto, que las compañías buscan reducir el contenido de humedad, con el fin de disminuir el costo de transporte y aumentar el poder energético de la biomasa (Tomczak *et al.* 2020). Los autores evaluaron el efecto del secado natural de rollizos de pinos silvestres en Polonia. Los resultados indican que cortar la madera en segmentos cortos y almacenarla en una pila parece tener efectos positivos sobre el rendimiento del secado. Además, señalan que después de tres meses, el contenido de humedad

inicial por encima del 50% puede caer entre 27% y 35% (calculado en base húmeda), lo que hace que los troncos sean un excelente combustible.

El secado natural de biomasa en la provincia de Valdivia presenta un fuerte componente estacional, relacionado principalmente con la alta concentración de precipitaciones en la temporada de invierno. El ensayo realizado por Labbé *et al.* 2018, evaluó el efecto de distintos tratamientos (con y sin cobertor) viables de ser aplicados operacionalmente en el proceso de secado natural de biomasa forestal, para ello, utilizaron árboles completos apilados fuera del dosel, de la especie *A. melanoxylon* con diámetros de 3 a 12 cm. El contenido de humedad inicial de la biomasa medidas a inicio del verano fue de $42,8\% \pm 2,5\%$ (calculado en base húmeda) y el contenido de humedad medido después de 40 días, resultó en $25,6\% \pm 0,76\%$ a final del verano para las pilas de árboles sin cobertor. Además, señalan que el secado natural es un método factible en las condiciones climáticas de la provincia de Valdivia, y que el cobertor permite que el contenido de humedad no aumente en la época invernal, por debajo del 25% antes de la siguiente temporada de verano.

Bown y Lasserre (2015), desarrollaron un modelo de secado al aire para troncos apilados de *E. globulus* y *E. nitens* en Concepción, Chile. Los autores, estimaron el contenido de humedad de pilas de troncos de 1.4 m de ancho, 1 m de alto, y 2.44 a 3.5 m de largo, en 3 diferentes tratamientos. Los resultados concluyen que los registros de secado más rápido se obtienen cuando los troncos se apilan a finales de primavera o a principios de verano, que, a fines de verano o a principios de otoño, ya que la humedad relativa del aire y la temperatura, son los principales impulsores de la pérdida del contenido de humedad. Por otra parte, señalan que el proceso de descortezado reduciría los tiempos de secado de 22 a 17 días en la especie *E. globulus*, logrando una reducción del 20% del contenido de humedad para pilas recién cosechadas o apiladas en enero.

2.4 Impacto del aprovechamiento forestal sobre el ambiente físico

El ambiente físico comprende los componentes geomorfológicos, clima, suelo, agua y aire, algunos autores incluyen el paisaje, aunque este puede ser considerado parte del ambiente sociocultural (MOPU 1982, Estevan 1980). Gayoso y Iroumé (1995) concluyen que los principales impactos negativos de las plantaciones forestales sobre el ambiente físico son generados por las acciones de preparación de sitio, construcción de caminos, madereo terrestre y en menor medida por el propio crecimiento de los árboles. Los subcomponentes suelo y agua son los más afectados. Sobre el suelo se identifica un aumento de la compactación, agotamiento de nutrientes, remoción y erosión. Sobre el agua, se denota la alteración

del balance hídrico como consecuencia de la modificación de los niveles de interceptación, evapotranspiración, escorrentía y de la calidad físico-químico de las aguas. CONAF (2017) a través del protocolo de plantaciones forestales, establece medidas con el propósito de proteger, conservar y manejar sustentablemente los recursos suelo y agua, de tal forma de aminorar los procesos de erosión, compactación y degradación de suelos, reducir los procesos de sedimentación y turbidez a nivel de las cuencas hidrográficas, mejorar la calidad de las aguas y regular el flujo de los caudales en los cursos y cuerpos hídricos delimitando zonas de protección.

2.5 Astillado a orilla de camino y en central de biomasa

Al igual que el procesado en la cosecha de productos tradicionales, en general, el astillado se realiza en tres lugares; en el interior del bosque, a orilla de camino o en una cancha de madereo, y en una central de biomasa (Alakangas y Virkkunen 2007).

En el astillado a orilla de camino, los árboles completos son transportados a orilla de camino, para que después de un período de exposición en terreno disminuyan su contenido de humedad, reduzcan el nivel de impurezas y permiten que pierdan sus ramas finas y hojas. Posterior a esto son descortezados (siempre y cuando las astillas tienen como destino final la industria de la celulosa. Para el caso de energía, el astillado puede ser de árbol completo), trozados, astillados e introducidos directamente al contenedor del camión para ser llevados a la central térmica. El costo de producción por este método incluye el costo de cosecha, astillado, transporte y almacenamiento (Gayoso y Labbé 2018). Los mismos autores, señalan que, en el astillado en central de biomasa, los residuos son transportados a una central de biomasa, donde se realiza el astillado y almacenamiento intermedio de las astillas. El escenario de astillado en central de biomasa se utiliza cuando la topografía, red de caminos o el tamaño del área de recolección no permite que astilladoras móviles accedan al rodal u operen en forma rentable por el costo de traslado. Por el lado de la demanda, este escenario es ineludible cuando la planta de bioenergía no cuenta con el suficiente espacio para almacenar el biocombustible sólido, demandando un sitio de almacenamiento externo. A diferencia del método de astillado en bosque, este incluye además el costo de carguío y transporte intermedio metro ruma, el costo de descarga en la central de biomasa, almacenamiento (6 meses aproximados). Por último, se realiza en paralelo el astillado y carguío al camión para su transporte final hacia la planta de bioenergía.

Existen aspectos críticos relacionados con las características del rodal, el bosque y la coordinación en la cadena de suministro que inciden en la productividad y costos de suministro de astillas. Las etapas

de producción tienen diferentes dificultades técnicas asociadas a las características de la biomasa, para el caso de la astilla el elevado contenido de humedad y baja densidad aparente (en el caso de utilizar arboles completos y metro ruma, la forma es regular), condiciones del bosque (pendiente, dimensiones y densidad de los árboles) y requerimientos de resguardo ambiental (protección de cursos de agua, protección de zonas de alta pendiente y de zonas adyacentes de alto valor de conservación) (Labbé y Vera 2017).

2.6 Aprovechamiento y transporte de astillas

Principalmente, las astillas se transportan a través de un remolque de tractor o camión. El volumen de las astillas producidas por hora depende de la materia prima y de la maquinaria. Si la astilladora se alimenta manualmente (ejemplo: troza de 10 cm de diámetro y de 5 m de longitud), se puede lograr una capacidad de salida de aproximadamente 10 a 15 m³ hr⁻¹. Si se utilizan astilladoras de alta capacidad con una grúa, se puede alcanzar una capacidad de 50 a 200 m³ hr⁻¹ Egger *et al.* (2013). En Alta Austria, los anteriores autores, determinan los costos de producción de astillas de madera por la capacidad de salida, por ejemplo: para una astilladora en un remolque de tractor con alimentación manual, los costos medios de astillado y salida son entre 4-5 euros m³ (9-15 m³ hr⁻¹), para una astilladora de gran eficiencia con grúa, el costo medio de astillado y salida son entre 2-6 € m³ (30-60 m³ hr⁻¹).

Nicklitschek *et al.* (2018) estimaron costos de suministro por tonelada de astillas asumiendo un contenido de humedad de 30 % (base húmeda), utilizando datos de costo y precios obtenidos de productores y comercializadores de metro ruma de *E. nitens* en la región de Los Ríos. Los costos de la astilla para un escenario logístico de astillado en central de biomasa fueron de 52.213 USD Ton⁻¹. El costo incluye el precio del metro ruma puesto en predio, costos de carguío, transporte de metro ruma, descarga en central de biomasa, deposito intermedio, astillado, transporte de astillas y descarga en la planta de bioenergía, más costo de administración (25% costo de producción). Otro estudio realizado por Gayoso y Labbé (2018), estimaron costos de suministro de astillas para ambos métodos, donde los costos en el astillado a orilla de camino sin contar el costo de transporte fueron de 39,1 USD Ton⁻¹ 30%, mientras que para el método de astillado en central de biomasa el costo total fue de 41,7 USD Ton⁻¹ 30%.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Material

En este estudio se utilizó una base de datos en formato *Geodatabase* para la estimación de la superficie actual de plantaciones de *E. globulus* generado por la RCV para estudios anteriores. Junto a ello, se solicitó información cartográfica del área de estudio, principalmente de las coberturas de uso de suelo, pendientes, cursos de agua, curvas de nivel y caminos interiores. Además de información de inventarios forestales preexistentes, ya que no fue posible tomar datos en terreno producto de las restricciones de movimiento asociado a la pandemia.

Se consultó de manera general al coordinador de conservación de la RCV los aspectos a considerar al momento del aprovechamiento, ya sea relacionada a la comunidad o a los objetivos de conservación de la reserva.

Se utilizó la norma internacional UNE-EN ISO17225-4 para identificar los parámetros críticos de calidad de astillas para uso energético. Esta información fue considerada en el diseño de la cadena de suministro y en la estimación de costos. Finalmente, se precisó el uso de literatura correspondiente al suministro y transporte de astillas a través de la metodología de astillado a orilla de camino y en central de biomasa en Europa y en Chile, además de estudios de productividad en faenas forestales en la región de Los Ríos, para obtener el rendimiento ($\text{m}^3 \text{hrpl}^{-1}$) de los equipos utilizados como supuestos en los costos de cosecha (anexo 1).

3.2 Métodos

3.2.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a La Reserva Costera Valdiviana ubicada en la Cordillera Pelada, región de Los Ríos y es un área protegida privada con más de 50.000 ha de superficie y se caracteriza por su abundante diversidad biológica y cultural. Al interior de la reserva existe un patrimonio de 3.000 ha de plantaciones de *E. globulus* distribuidas en 2 predios, Chaihuín (2.383 ha) y Venecia (617 ha), este último, se ubica en la zona sur de la reserva (anexo 2) en los $40^{\circ}12'57.62''\text{S} - 73^{\circ}41'21.25''\text{O}$.

Se contemplaba al comienzo del proyecto la evaluación de las 3.000 ha de plantaciones de *E. globulus* localizadas en ambos predios, Chaihuín y Venecia, pero posterior a una consulta a personal de

la reserva ¹, se acordó focalizar la evaluación en las plantaciones del predio Venecia. En el predio Chaihuín existen rutas que son utilizadas por la comunidad y estas se oponen al tránsito de camiones, dado que podrían tener un efecto negativo en los caminos, sobre todo en la ruta T-450, que conecta la administración de la RCV Sector Chaihuín con las localidades de San Carlos, Huape y Huiro, y el área urbana de Corral.

Esta zona presenta un clima oceánico con influencia mediterránea, el régimen de precipitaciones anuales varía entre 2.350 y 4.000 mm según la zona geográfica, siendo mayor en las zonas mas altas, con una temperatura promedio anual de 12,0° C (Di Castri y Hajek 1976). Los suelos en los que se sitúa la RCV pertenecen a las series Hueicolla y La Pelada, son de origen metamórficos, derivados de micaesquistos, con grandes variaciones de espesor (moderadamente profundos a muy delgados), de textura arcillosa, fuertemente ácidos y susceptibles a erosión (CIREN 2003).

3.2.2 Análisis cartográfico para determinar la superficie potencialmente productiva

Se identificaron los rodales aprovechables de la RCV, a través de la base de datos consultada en el material y se delimitaron zonas de protección correspondientes a restricciones ambientales estipuladas en el protocolo de plantaciones forestales de CONAF (2017), las cuales incluyeron delimitación de cursos y cuerpos de aguas estableciendo un ancho mínimo de protección según el criterio que se indica en el anexo 3, zonas de protección del suelo en pendientes mayores a 60% y plantaciones adyacentes a bosque nativo de alto valor de conservación, las cuales quedan excluidas de la producción. El criterio técnico para el descuento de estas zonas de protección fue una franja de 20 m de ancho para la totalidad de la plantación. Las zonas de protección fueron excluidas de la cosecha y la determinación de la superficie potencialmente productiva se determinó descontando todas estas zonas de la superficie aprovechable inicial a través del *software* libre Quantum GIS 3.10.8.

¹ Francisco Torres, Coordinador de conservación de la Reserva Costera Valdiviana, comunicación personal.

3.2.3 Definición de parámetros de calidad de astillas para uso energético

Cada biomasa posee propiedades concretas que son las que determinan su comportamiento como biocombustible en el proceso de combustión. Al momento de estipular los niveles de calidad las astillas de madera, lo hacemos en función de los parámetros de calidad establecidos por las normas UNE-EN ISO 17225-4, siendo la versión oficial, en español, de la norma europea EN-ISO 17225-4:2014, que a su vez adopta la norma internacional ISO 17225-4:2014, para diferentes usos energéticos: A1 (calefacción de pequeña escala a través de estufas, producto de excelente calidad), A2 (calefacción de mayor escala a través de calderas, producto de calidad intermedia) y B (suministro de planta de energía, producto de menor calidad). En el cuadro 1, se mencionan los parámetros de calidad relevantes y se determinan valores considerados críticos para la elaboración de la astilla.

Cuadro 1. Requerimientos de calidad de astillas de madera para su combustión según norma UNE-EN ISO 17225-4.

Clase de propiedad	Unidades	Categoría de astillas (UNE-EN ISO 17225-4)		
		A1	A2	B
Método de análisis		A1	A2	B
Humedad, M	% en recepción	<u>M10</u> <10%	<u>M35</u>	A especificar
UNE-EN ISO 18134-1	% base húmeda	<u>M25</u>	<35%	>35%
UNE-EN ISO 18134-2		<25%		
Cenizas, A	% base seca	<u>A1.0</u>	<u>A1.5</u>	<u>A3.0</u>
UNE-EN ISO 18122		<1.0%	<1.5%	<3.0%
Poder Calorífico Neto, Q	a humedad de recepción (MJ/Kg)	A especificar	A especificar	A especificar
EN 14198				

**A especificar: depende de la especie.*

La categoría de astillas utilizada se basó en la imposibilidad de obtener un contenido de humedad inferior a 25% mediante secado natural en terreno (Bown y Lasserre 2015, Labbé *et al.* 2018) y la distribución granulométrica se ajustó en función del anexo 4, definiéndose elementos finos, medianos,

gruesos y largos. En función de los valores límites de los parámetros críticos (porcentaje de humedad, contenido de cenizas, poder calorífico y distribución granulométrica) y tipo de planta a suministrar, se determinó que es posible obtener una astilla calidad A2.

3.2.4 Suministro de biomasa

No fue posible realizar una campaña de terreno para ejecutar un inventario forestal debido a la contingencia nacional que sacudió al mundo producto del COVID-19 y sus respectivos protocolos de prevención. Por este motivo se utilizó información de inventario de las plantaciones facilitados por la RCV (realizado el año 2004), los que abarcan datos obtenidos en 10 rodales de un total de 11 (99 % de la superficie con potencial productivo). Al rodal sin información se le imputaron los datos de inventario del rodal más cercano.

A partir de la superficie productiva determinada en 3.2.2, se estimó la biomasa fustal y la biomasa total (Mg ha^{-1}), a través de las funciones [1] y [2] ajustadas por Garcinuño (1995), para *E. globulus* en la comuna de Corral.

$$\text{Biomasa total (Mg arb}^{-1}\text{)} = 0,369636 + 0,027242 \times (\text{Dap}^2 \times \text{Htot}) \quad [1]$$

$$\text{Biomasa fustal (Mg arb}^{-1}\text{)} = -0,898021 + 0,015111 \times (\text{Dap}^2 \times \text{Htot}) \quad [2]$$

Después, se calculó el incremento medio anual fustal (IMA_F) y el incremento medio anual total de biomasa (IMA_T) ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) de cada rodal identificado en las coberturas espaciales. Posteriormente, se estimó el potencial productivo en energía (GJ ha^{-1}) multiplicando la biomasa fustal por el poder calorífico inferior (PCI_H), [3] considerando un porcentaje de humedad del 35%. El poder calorífico superior (PCI_0), fue estimado por Burgos *et al.* (2015) y corresponde a $19,0 \text{ MJ kg}^{-1}$.

$$\text{PCI}_H = \frac{\text{PCI}_0 \times (100 - H) - 2,44 \times H}{100} \quad [3]$$

La cantidad de residuos orgánicos (porción no astillable del árbol) que quedaran a orilla de camino se estimó restando la biomasa fustal a la biomasa total. Finalmente, la superficie anual de cosecha sostenible fue calculada como el cociente entre la biomasa disponible anualmente (Mg año^{-1}) y el rendimiento promedio por ha (Mg ha^{-1}), este último calculado como el promedio ponderado de los rodales.

3.2.5 Estimación de costos de aprovechamiento y transporte

Se estimaron costos de producción de astillas para dos escenarios de cadenas de suministros plausibles de implementar en el área de estudio; astillado a orilla de camino (figura 1) y astillado en central de biomasa (figura 2). Se asumió un método de cosecha de árbol completo para ambos escenarios logísticos. Este es uno de los métodos más utilizados en las zonas de producción de biomasa en el mundo (Ghaffariyan *et al.* 2017), este consiste en el volteo y madereo del árbol completo hasta orilla de camino o cancha de acopio, y en este sitio se realiza el procesamiento del árbol (despunte, desrame, astillado o trozado) dependiendo el escenario logístico.

En el primer escenario, la biomasa es transportada directamente a la planta de calefacción, por lo que incluye los costos del volteo, extracción, desrame y despunte, astillado a orilla de camino y el transporte final. En el segundo escenario, la biomasa es transportada a un punto centralizado ubicado en la periferia de la ciudad de La Unión (central de biomasa) donde se llevará a cabo el astillado. Por lo que incluye el costo de volteo, extracción, desrame y despunte, trozado, carga de metro ruma, transporte intermedio, descarga, almacenamiento y astillado en la central de biomasa, y el transporte de astillas hasta la planta de energía ubicada en el centro de la ciudad de La Unión.

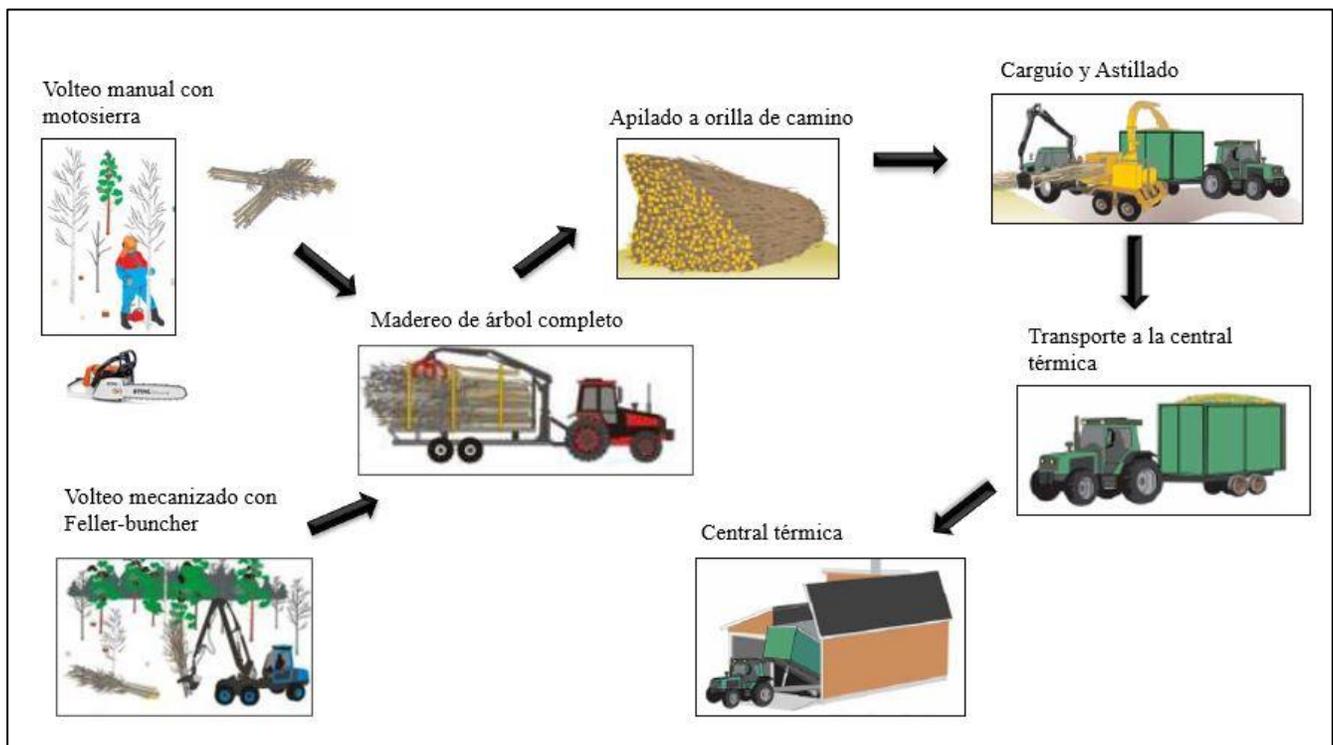


Figura 1. Cadena de suministro del método astillado a orilla de camino. **Fuente:** Modificado de Alakangas y Virkkunen (2007).

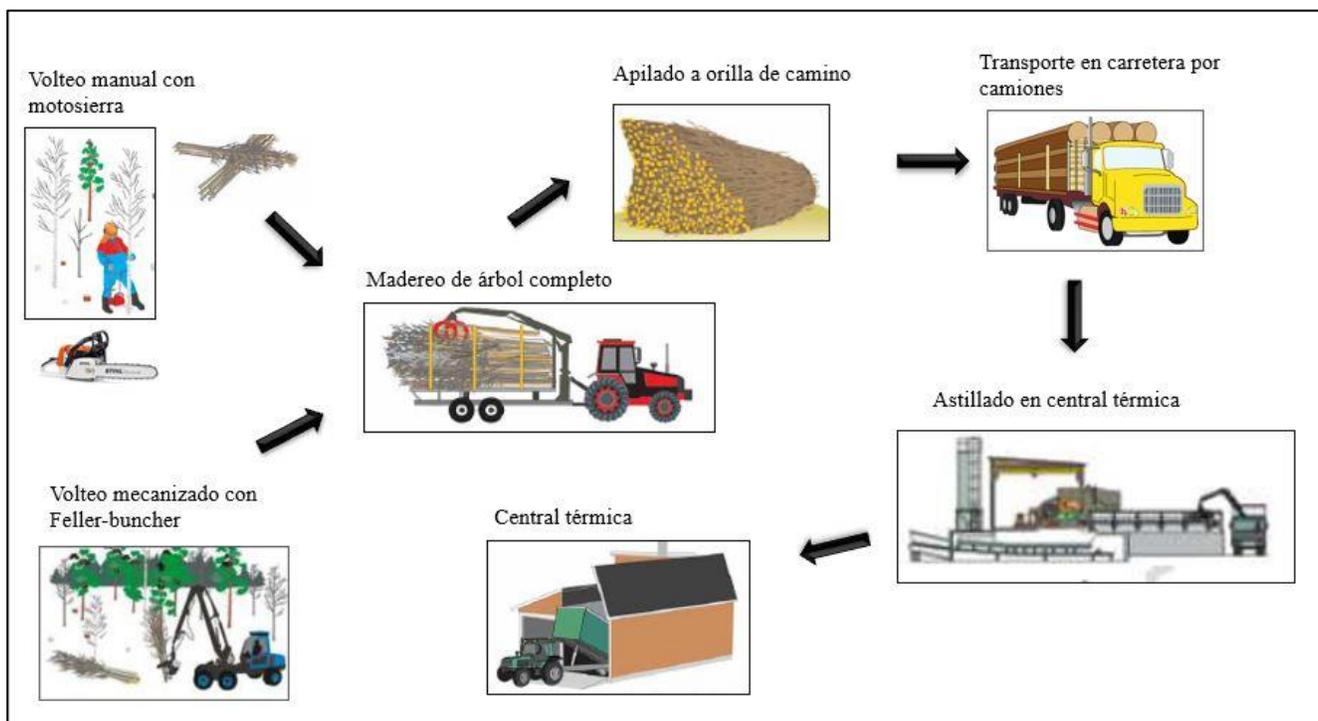


Figura 2. Cadena de suministro del método astillado en central de biomasa. **Fuente:** Modificado de Alakangas y Virkkunen (2007).

Los equipos seleccionados en cada proceso por escenario logístico están representados en el cuadro 2.

Cuadro 2. Sistema de aprovechamiento de biomasa considerada para el suministro de astillas según escenario logístico.

Proceso	Astillado a orilla de camino	Astillado en central de biomasa
Volteo	Motosierra 1,5 Hp (Stihl 017)	Motosierra 1,5 Hp (Stihl 017)
Extracción	Skidder John Deere con huinche	Skidder John Deere con huinche
Despunte y desrame	Hacha Michigan Hm-3-1/2f	Hacha Michigan Hm-3-1/2f
Trozado	-	Motosierra 1,5 Hp (Stihl 017)
Astillado	Astilladora FARMÍ 380 HFC + Tractor John Deere	-
Transporte de trozas	-	Camión SCANIA P40020
Transporte de astillas	Camión Peerless piso móvil	-
Astillado	-	Astillador fijo*
Transporte de la astilla	-	Camión Peerless piso móvil

*Fuente: Nicklitschek *et al.* (2018).

En función de los equipos seleccionados para cada proceso, se procedió a calcular los costos de cosecha a través de la metodología de Ackerman *et al.* (2014). Todos los costos se indican en moneda

nacional (CLP), para ello, se utilizó el valor del dólar en \$797 para la conversión de unidades. Para cada equipo se asumió un valor de reventa del 20% del precio de compra. Se consideró una tasa de interés del 12% de la inversión más un 6% correspondiente a impuestos y seguros; con 250 jornadas de trabajo al año. El costo de los accesorios incluye elementos complementarios a los equipos y la indumentaria de seguridad de los trabajadores. El costo de mano de obra se determinó a partir de los honorarios de cada operador más un 20% por concepto de pago de leyes sociales. El consumo de combustible y lubricante se determinó a través de la ficha técnica de cada equipo. Con esta información, se calcularon los costos horarios de la siguiente manera:

1. Costos fijos:

a. Depreciación =
$$\frac{(Inversión\ inicial - Valor\ de\ reventa)}{Vida\ útil\ (años)}$$

b. Inversión media anual (IMA) =
$$\left(\frac{((Inversión\ inicial - Reventa) * (Vida\ útil\ (años) + 1))}{(2 * Vida\ útil\ (años))} \right) + Reventa$$

c. Interés, impuestos y seguros (IIS) = (Tasa de interés + Impuestos + Seguros) * IMA

2. Costos variables:

a. Combustibles = (L hr⁻¹) * Valor de combustible promedio del año 2020

b. Lubricante = Combustible anual * Coeficiente de lubricante

c. Reparación y mantenimiento = Depreciación * Coeficiente de mantención

d. Neumáticos =
$$\frac{(N^{\circ}\ de\ neumáticos * Costos\ de\ neumáticos)}{Vida\ útil\ (hr)}$$

e. Cadenas y cuchillos = Precio de ambos accesorios

3. Costos de mano de obra:

a. Sueldos = Remuneración del operador mensual * 1,2

b. Costos fungibles = Implementación de los operadores al mes

4. Costos de producción (m³ hr⁻¹) =
$$\frac{Costo\ del\ equipo\ (hr)}{(Rendimiento\ del\ sistema\ (hr) * Productividad)}$$

Todos los costos de aprovechamiento fueron calculados por hora de trabajo planificado (CLP hpl⁻¹). El costo por tonelada (CLP Mg⁻¹), resultó del cociente entre el costo por hora de trabajo planificado (CLP hpl⁻¹) y la productividad en toneladas de biomasa por hora de trabajo planificado (Mg hpl⁻¹).

Para estimar los costos de transporte primero se procedió a crear la ruta óptima en Google My Maps desde el centro de la ciudad de La Unión (planta de energía) y la central de biomasa (3 km de distancia del centro de la ciudad) hasta el punto B (inicio del camino interior principal) (anexo 5), luego se calculó la distancia del punto B al centro de cada unidad de cosecha (oferta de biomasa) considerando la red de caminos existentes a través de Google Earth. El costo de transporte de astillas se determinó a

través de la metodología BIOTRANS (Biomass Transportation model) de Sang-Kyun Hang (2011), mediante la productividad y capacidad de carga de dos camiones. Se consideró un camión de carga de 90 m³ estéreos para el escenario de astillado a orilla de camino y dos camiones para el escenario de astillado en central de biomasa, un camión con carro para llevar las trozas desde el punto de oferta hasta la central de biomasa de 49 m³ estéreos y otro camión chipero de 90 m³ estéreos (el mismo que se utilizó para el primer escenario) para transportar las astillas de la central de biomasa hasta la planta de energía.

Para cada camión se asumió un valor de reventa del 20% del precio de compra. Se considero una tasa de interés del 12% de la inversión promedio anual más un 6% correspondiente a impuestos y seguros; con 250 jornadas de trabajo al año. La tasa de uso correspondió a un 85% y los gastos generales a un 20%. La capacidad de carga de cada camión fue calculada multiplicando el volumen de carga del camión (m³) por la densidad a granel (kg m⁻³) del formato de la biomasa (astilla y rollizo). El costo de mano de obra se asumió en 7.173 CLP hr⁻¹ por conductor. El consumo de combustible se asumió en 0,3 (L km⁻¹) y el consumo de lubricante resultado del 10% del consumo y costo del combustible. Con estos datos, se calcularon los costos de transporte de la siguiente forma:

1. Distancia de transporte (km):

a. Por vuelta = Viaje de ida (km) + Viaje de regreso por autopista (km) + Aparcamiento y garaje (km).

2. Tiempo de transporte (hr):

a. Por vuelta = $\left(\frac{(\text{Distancia de ida por asfalto (km)} + \text{Distancia de regreso por asfalto (km)})}{\text{Velocidad en asfalto (km hr}^{-1})} \right) +$
 $\left(\frac{(\text{Distancia de ida por ripio (km)} + \text{Distancia de regreso por ripio (km)})}{\text{Velocidad en ripio (km hr}^{-1})} \right) +$
 $\left(\frac{(\text{Distancia de ida por camino interior (km)} + \text{Distancia de regreso por camino interior (km)})}{\text{Velocidad en el camino interior (km hr}^{-1})} \right)$

3. Tiempo de carga (hr):

a. Por camión = $\frac{\text{Productividad de carga (min silo}^{-1})}{60}$

b. Por Tonelada = $\left(\frac{\text{Productividad de carga (min silo}^{-1})}{60} \right) / 1$

4. Tiempo de descarga (hr):

a. Por día = $\frac{(\text{Productividad de descarga (min m}^{-3}) * \text{Capacidad del silo (m}^3))}{60}$

b. Por Tonelada = $\left(\frac{(\text{Productividad de descarga (min m}^{-3}) * \text{Capacidad del silo (m}^3))}{\text{Número de entregas a granel}} \right) / 60$

5. Otros tiempos (hr):

a. Por día = $\frac{((\text{Tiempo de transporte} + \text{Tiempo de carga} + \text{Tiempo de descarga}) * 0,25)}{0,75}$

- b. Por tonelada = $((Tiempo\ de\ transporte + Tiempo\ de\ carga + Tiempo\ de\ descarga) * (1 - Tasa\ de\ utilización))$
6. Productividad (Mg vuelta⁻¹):
- a. Por día = $Capacidad\ del\ silo\ (m^3) * (\frac{Densidad\ aparente\ (kg\ m^{-1})}{1000})$
7. Costos fijos:
- a. Depreciación =
$$\frac{(Inversión\ total\ sin\ accesorios - (Inversión\ total\ sin\ accesorios * Valor\ de\ reventa))}{(Vida\ útil\ (km) / Ruta\ de\ viaje\ total\ (km))}$$
- b. Inversión media anual (IMA) =
$$\frac{(((Inversión\ total\ sin\ acc - (Inversión\ total\ sin\ acc * Valor\ de\ reventa)) * (1 + (Vida\ útil / Ruta\ de\ viaje\ Total\ (km))))}{(2 * (Vida\ útil\ (km) / Ruta\ de\ viaje\ Total\ (km)))) - (Inversión\ total * valor\ de\ reventa)}$$
- c. Interés anual = IMA * Tasa de interés
- d. Impuestos y seguros = IMA * Impuestos y seguros
8. Costos variables:
- a. Combustibles = (Ruta de viaje Total (km) * Consumo medio de combustible) * Costo diésel
- b. Lubricante = Combustible * Consumo de lubricante
- c. Accesorios = $(\frac{Ruta\ de\ viaje\ Total\ (km)}{Vida\ útil\ del\ neumático\ (km)}) * (Número\ total\ de\ neumáticos * Valor\ unitario)$
- d. Reparación y mantenimiento = Ruta de viaje Total (km) * Reparación y mantenimiento
9. Costos de mano de obra = Tiempo total (hr) * Salario laboral (hr)
10. Overhead (%) = (Costos fijos + Costos variables + Costos de mano de obra) * 0,20
11. Costo de transporte total = (Costos fijos + Costos variables + Costos de mano de obra + Overhead)

4 RESULTADOS

4.1 Superficie de plantaciones productiva bajo medidas de resguardo ambiental

Se identificaron 11 rodales con potencial productivo en el predio Venecia (figura 3), con una superficie total de 617 ha, donde la superficie con potencial productivo tras el descuento de las zonas de protección de resguardo ambiental fue de 423,3 ha (69 % del total).

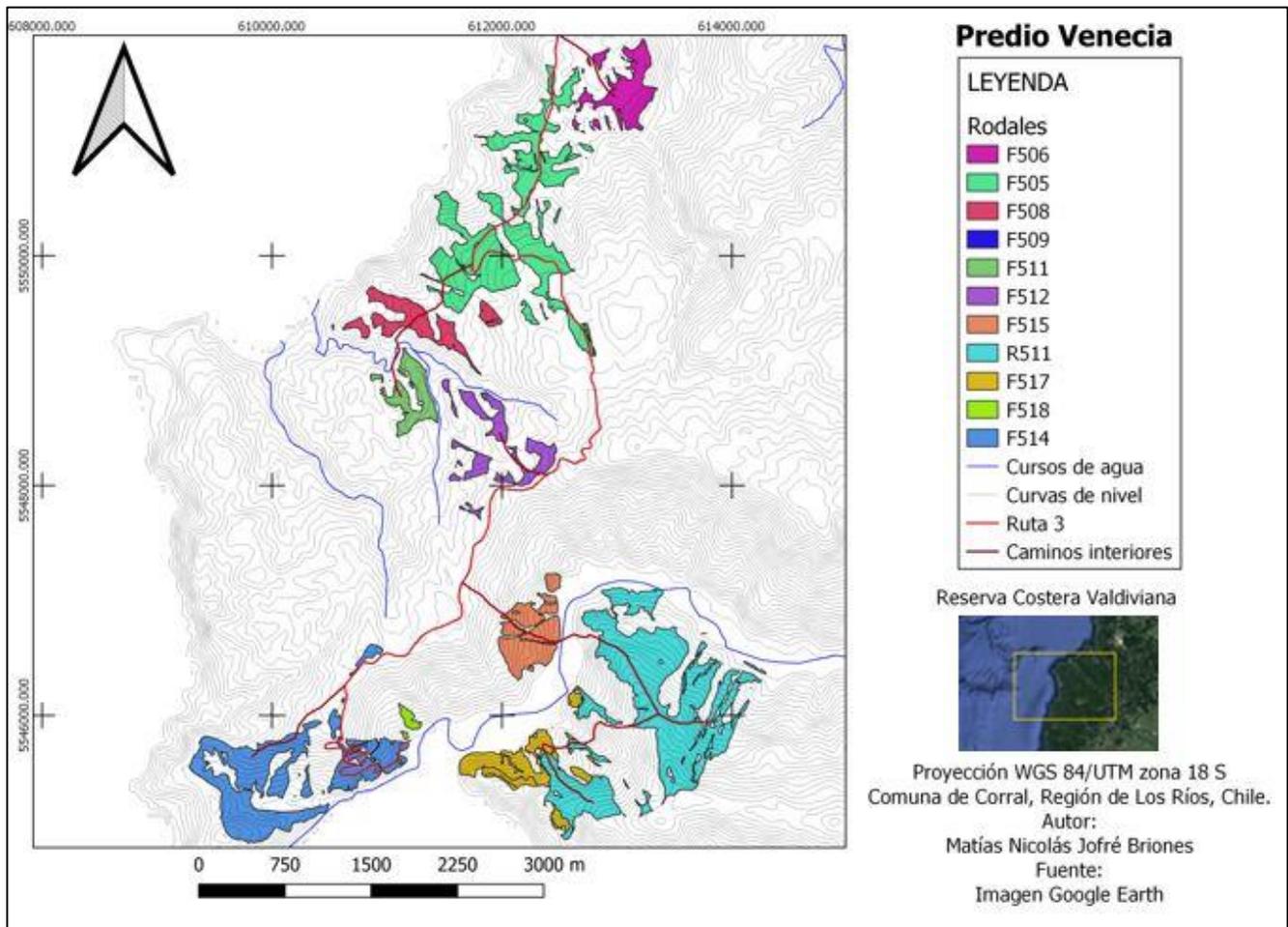


Figura 3. Plantaciones productivas de *E.globulus* tras el descuento de las zonas de protección, distribuidas en 11 rodales en el predio Venecia de la Reserva Costera Valdiviana.

Las plantaciones aprovechables tenían un rango de edad de 10 a 13 años. La topografía en general no presentaba zonas de altas pendientes en donde se encontraban las plantaciones, predominando rangos de pendientes de 0 a 25% en la gran mayoría de la superficie aprovechable (anexo 6), por lo que no fue necesario establecer zonas de protección por alta pendiente (> 60 %). El curso de agua existente pertenece al río Chaihuín (no se presentaron otros cursos de agua en la zona de estudio), y el descuento resulto en 2 ha de plantaciones.

Colindante a las plantaciones, se identificaron en el catastro de uso de suelos de la región de Los Ríos (IDE MINAGRI 2017) especies nativas de alto valor de conservación pertenecientes en su gran mayoría al tipo forestal Siempreverde y en minoría al Coihue-Raulí-Tepa. El descuento de plantaciones aprovechables para la protección del bosque nativo fue de 191,7 ha.

El criterio técnico utilizado en el descuento de las zonas de protección para bosque nativo y cursos de agua correspondió a una franja de 20 m de ancho, correspondiente al área aledaña del río Chaihuín, y el bosque nativo. En esta franja de protección se prohíbe la destrucción, corta, eliminación de especies nativas, el levantamiento de estructuras o vías de saca, el ingreso de maquinarias o equipos y el depósito de residuos de cosecha.

4.2 Calidad y tipo de astilla a producir

Los requerimientos de calidad de astillas de madera para energía según la norma internacional vigente UNE-EN ISO 17225-4, considera como factor crítico el contenido de humedad. Este factor, tiene consecuencia en la eficiencia de la combustión y en el costo de transporte, y depende de la humedad relativa del aire y la temperatura del sitio donde crecen los árboles. Otros factores que también considera la norma de calidad corresponden al contenido de cenizas y al tamaño máximo y mínimo de la astilla. El contenido de cenizas depende de la especie y de la temperatura durante la combustión, y el tamaño de la astilla depende del equipo para astillar.

Dos estudios de secado natural de biomasa disponibles para el centro sur de Chile, uno realizado en *E. globulus*, Concepción (Bown y Lasserre 2015) y otro en *A. melanoxylon* en la provincia de Valdivia (Labbé *et al.* 2018), determinaron que el contenido de humedad inicial de los árboles recién volteados es cercano al 50 % y que es posible alcanzar un contenido de humedad cercano al 30 %, luego de apilar durante dos meses la biomasa fuera del dosel en la estación de verano, y que es necesario el uso de cobertor, para mantener este contenido de humedad en la época invernal. En base a estos antecedentes parece razonable asumir que es posible alcanzar una astilla de calidad A2 (cuadro 1), con un contenido de humedad igual o inferior a un 35 %.

4.3 Suministro potencial de astillas

El Índice de sitio para *Eucalyptus sp.* varía de 34 a 46 m en los rodales. La menor productividad de los rodales se explica por una baja densidad y un bajo diámetro medio cuadrático (cuadro 3). El rendimiento promedio de la superficie con potencial productivo considerada correspondió a 120,5 Mg ha⁻¹ de biomasa fustal y 219,1 Mg ha⁻¹ de biomasa total (fuste y copa). La diferencia entre la biomasa total y la biomasa fustal determina la cantidad de residuos que queda en el terreno posterior a la cosecha (98,6 Mg ha⁻¹). La biomasa de copas corresponde a los componentes de la biomasa área hojas y ramas.

Considerando el incremento medio anual en biomasa fustal y la superficie productiva total de 413,3 ha, el crecimiento anual de la biomasa fustal corresponde a 4.159,7 Mg año⁻¹ y que corresponde a la máxima cantidad de biomasa fustal que se puede extraer en forma sostenible anualmente. Considerando que el poder calorífico inferior (PCI_H) para la especie *E. globulus* calculado para un contenido de humedad del 35 % es de 12,6 Mj kg, el equivalente en energía correspondió a 1.232,3 Gj año⁻¹. Por último, para lograr el rendimiento sostenible del rodal, se debe considerar una superficie de cosecha máxima de 34,5 ha al año, equivalente a una proyección de 12 años de aprovechamiento.

Cuadro 3. Tabla de rodal y su potencial productivo de biomasa para cada rodal.

ID	Rodal	Edad (años)	Densidad (arb ha ⁻¹)	DMC (cm)	Altura media (m)	IS (m)	Biomasa fustal (Mg ha ⁻¹)	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)	IMA_F (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Superficie (ha)	Crecimiento anual (Mg año ⁻¹)
1	f505	12	1171	21	22	39	154,7	281,2	12,9	91,9	1185,5
2	f506	11	720	24	26	46	149	270	13,5	20,9	282,2
3	r511	13	893	21	22	37	130,1	236,4	10	130	1300
4	f517	13	800	21	23	37	121,9	221,3	9,4	25,2	236,9
5	f511	10	840	21	23	45	116	210,8	11,6	14	162,4
6	f508	11	760	21	23	41	105	190,8	9,5	21	199,5
7	f514	13	867	20	21	34	98,5	179,4	7,6	72,2	548,7
8	f509	11	745	19	20	39	77,4	141	6,7	0	0,3
9	expino	11	680	19	22	44	72,6	132,3	6,6	2,2	14,5
10	f515	12	767	18	19	38	63	115	5,2	26,2	136,2
11	f512	10	693	18	16	37	47,8	87,6	4,8	19,5	93,6

Donde:

DMC: Diámetro medio cuadrático

IS: Índice de sitio

IMA_F: Incremento medio anual de la biomasa fustal

4.4 Estimación de costos de aprovechamiento y transporte

4.4.1 Costos de aprovechamiento

El costo de aprovechamiento fue calculado en toneladas de astillas con un contenido de humedad del 35% (calidad A2), para una planta de energía con una potencia menor a 5 MWh (según potencial de suministro de energía anual estimado). Esta planta podría suministrar calor y electricidad a hospitales, colegios y edificaciones cercanas. Alakangas y Virkkunen (2007), señalan que las astillas con un porcentaje de humedad menor al 35%, permiten una combustión eficiente y evitan fallas en la caldera.

Debido a que el costo horario de los equipos (anexo 7) se encuentran expresados en unidad de volumen (m^3), fue necesario realizar el cálculo de la densidad a granel ($kg\ m^{-3}$) considerando factores de equivalencia desde metro cubico estéreo (o a granel) a metro cubico sólido de biomasa (cuadro 4), para expresar los costos en términos de toneladas de astillas (Mg).

Cuadro 4. Factores de equivalencia utilizados para el cálculo de la densidad a granel.

Formato biomasa	Factor de conversión	Referencia
m^3 sólido/ m^3 a granel rollizo	1,7	IBOS-UACH (2012)
m^3 sólido/ m^3 a granel astilla	3,0	Francescato <i>et al.</i> (2012)

La densidad a granel se calculó considerando la densidad de *E. globulus* ($500\ kg\ m^{-3}$) y el contenido de humedad del 35% (cuadro 5).

Cuadro 5. Densidad a granel en función de la densidad de la madera.

Formato	<i>Eucalytus globulus</i>
Densidad a granel rollizo ($kg\ m^{-3}$) *	463,4
Densidad a granel astillas ($kg\ m^{-3}$)	256,4

*Fuente: Burgos *et al.* (2015)

El costo de aprovechamiento fue calculado para astillas provenientes de árboles completos y metro ruma de *E. globulus* para dos escenarios de cadena de suministro, astillado a orilla de camino y astillado en central de biomasa (cuadro 6).

Cuadro 6. Costo de cosecha ($\$ \text{Mg}^{-1}_{35\%}$) para ambos escenarios de cadena de suministro provenientes del predio Venecia de la RCV.

Actividad	Astillado a orilla de camino $\$ \text{Mg}^{-1}$	Astillado en central de biomasa $\$ \text{Mg}^{-1}$
Volteo	3.999	3.999
Extracción	5.001	5.001
Desrame y despunte	553	553
Trozado	-	2.173
Astillado a orilla de camino/central de biomasa	7.247	4.922*
Carga de metro ruma	-	1.548*
Total	16.800	18.196

*Fuente: Nicklitschek *et al.* (2018). Precios actualizados con el IPC interanual de diciembre del 2020.

El astillado en la central de biomasa tiene un costo mayor en comparación al astillado a orilla de camino producto de la mayor cantidad de actividades que se realizan en este método (trozado y carga de metro ruma), agregando un valor de $3.721 \text{ \$ Mg}^{-1}$ a la faena de aprovechamiento.

4.4.2 Costos de transporte

La distancia de la central de biomasa hasta el punto B (inicio del camino interior principal), resultó en 74 km, mientras que para la planta de energía fue de 77 km. Las unidades de cosecha resultaron en 14 y las distancias desde el centro de cada unidad de cosecha hasta el punto B van desde los 2 hasta los 25 km (anexo 8). Estas distancias, fueron corregidas multiplicando por un factor de 1,5 equivalente a las distancias que se pierden por las curvas de los caminos interiores.

El costo total promedio de transporte con el método de astillado a orilla de camino fue de $11.871 \pm 1.370 \text{ \$ Mg}^{-1}$, mientras que con el método de astillado en central de biomasa fue de $10.871 \pm 1.177 \text{ \$ Mg}^{-1}$ (cuadro 7) y fueron calculado desde el centro de cada unidad de cosecha hasta el destino final (planta de energía) (anexo 9). La capacidad de carga del camión chipero correspondió a 23,1 Mg y la del camión con carro a 22,7 Mg.

Cuadro 7. Costo de transporte total (\$ Mg⁻¹) para ambos escenarios de cadena de suministro considerando la distancia de cada unidad de cosecha hasta la planta de energía.

Unidades de cosecha	Distancia hasta la planta de energía (km)	Astillado a orilla de camino	Astillado en central de biomasa
		\$ Mg ⁻¹	\$ Mg ⁻¹
1	80,4	9.386	8.738
2	82,7	9.655	8.968
3	86,6	10.108	9.358
4	92,2	10.761	9.918
5	99,0	11.546	10.592
6	100,5	11.722	10.744
7	106,1	12.376	11.305
8	107,8	12.574	11.475
9	108,7	12.671	11.559
10	109,8	12.806	11.674
11	110,9	12.926	11.777
12	113,4	13.223	12.032
13	112,8	13.156	11.975
14	113,9	13.286	12.086

Los costos de transporte aumentan proporcionalmente al aumento de la distancia de cada unidad de cosecha. El costo total promedio del camión con carro resulto en 9.003,9 \$ Mg⁻¹ (significativamente bajo en comparación al camión chipero del primer escenario), pero al agregar el costo fijo del camión chipero (1.867,6 \$ Mg⁻¹) que va desde la central de biomasa hasta la planta de energía, el costo total aumenta considerablemente.

El costo equivalente a toneladas por kilómetro fue de 116,6 ± 0,04 \$ Mg⁻¹ km⁻¹ para el camión chipero del primer escenario, mientras que en el escenario de astillado en central de biomasa fue de 91 ± 1,16 \$ Mg km⁻¹ para el camión con carro y de 730,1 ± 1,2 \$ Mg km⁻¹ para el camión chipero. Estos costos se explican por la mayor inversión inicial que se realiza en el camión chipero, sin embargo, el costo por tonelada es más bajo en el camión chipero porque tiene una capacidad de carga más alta.

Por tanto, si utilizamos el costo total promedio de transporte más los costos totales de aprovechamiento, el costo total de suministro de astillas corresponde a 28.671 \$ Mg⁻¹ (rango de variación según costos de transporte) para el escenario de astillado a orilla de camino y de 29.067 \$ Mg⁻¹ (rango de variación según costos de transporte) para el escenario de astillado en central de biomasa.

5 DISCUSIÓN

Este estudio se refiere al aprovechamiento de biomasa a través de dos escenarios de cadenas de suministro plausibles a implementar en la RCV para suministrar a una planta de energía localizada en el centro de la ciudad de La Unión. El aprovechamiento se llevó a cabo en plantaciones de *E. globulus* caracterizadas por una mediana densidad, alrededor de 600-1200 árboles por hectárea, con diámetros medios de 18 a 24 cm, adyacente a bosque nativo de alto valor de conservación, predominante el bosque adulto del tipo forestal Siempreverde. Para asegurar la compatibilidad de la actividad productiva con los objetivos de conservación de la RCV, es necesario sacrificar una gran superficie (193,7 ha) para asegurar que no existan impactos asociados a la cosecha.

El secado natural permite lograr el tipo de calidad de astilla deseado (A2), considerando como factor crítico el contenido de humedad por su consecuencia en la combustión y en el costo de transporte (Bown y Lasserre 2015, Labbé *et al.* 2018, Tomczak *et al.* 2020), a su vez, se espera que el contenido de ceniza sea menor a 1,5%, y que el tamaño de la astilla presente una distribución granulométrica de calidad P45 (anexo 4), donde su distribución de elementos sea la siguiente: finos (menor de 3,15 mm: máximo un 25%), medianos (entre 3,15 y 45mm: mínimo un 75%), gruesos (mayor de 63mm): máximo un 6%) y largos (máximo 350 mm) (UNE-EN ISO 17225-4).

El suministro potencial de biomasa coincidió con resultados de otros autores considerando plantaciones de *E. globulus* en la región de Los Ríos (Gutiérrez 2014, UACH 2018). Si bien, la oferta estimada de biomasa forestal del predio Venecia es alta, es esperable que en el corto plazo si exista competencia por astillas en la planta de calefacción, ya que esta preferirá proveedores cercanos, priorizando a aquellos dentro de un radio de transporte de 50 km (Nicklitschek *et al.* 2018). Por otra parte, los residuos equivalentes a la biomasa de copas se deberán manejar adecuadamente en el terreno, con el fin de reponer los elementos nutritivos y materia orgánica extraídos durante la cosecha (Gerding 1991, Hunter 2001).

Los costos obtenidos en ambos escenarios de aprovechamiento son coincidentes con lo reportado por otros autores para ambos escenarios de cadena de suministro (Nicklitschek *et al.* 2018, Gayoso y Labbé 2018), sin embargo, en el caso de Europa (Egger *et al.* 2013) no se logra coincidir los resultados, ya que difieren en el costo de mano de obra (siendo mucho mayor en Europa que en Chile), y en la mayor productividad de sus equipos. Los resultados indican que el costo de cosecha en el escenario de astillado en central de biomasa es mayor que en el escenario de astillado a orilla de camino, debido a la mayor cantidad de actividades que presenta (Alakangas y Virkkunen 2007), sin embargo, los costos de

transporte para este escenario son menores, con una diferencia de 1.000 \$ Mg⁻¹, lo que influye en el costo total de aprovechamiento, ya que el costo de transporte como señala Tomczak *et al.* 2020, es el que limita al negocio de la biomasa. Para el caso de estudio, los costos de transporte coinciden con los resultados de Zamora *et al.* 2015, para una distancia similar (100 km).

Si bien, la disponibilidad de biomasa no es un mayor problema a la hora de abastecer a la planta de energía, la principal limitación de este proyecto se da en la restricción de caminos entre el sector de Chaihuín y el área urbana de Corral, lo que resulta que la biomasa sea llevada a la ciudad de La Unión en lugar de Corral o a sectores aledaños a la RCV, aumentando la distancia entre la oferta de biomasa (bosque) y la demanda de suministro (planta de energía), así también, el costo de transporte. Así mismo, el diseño de la cadena de suministro se realizó en función de obtener una productividad sostenible en el tiempo, adecuándose a las condiciones de las comunidades y la protección del bosque nativo. Es importante señalar que el suministro sostenible de combustible anual calculado en este estudio considera una producción de pequeña escala, con faenas de cosecha anual de 34,5 ha, lo que reduce el riesgo de impactos en el paisaje. Por lo tanto, los resultados logrados entregan una primera evaluación sobre el potencial energético del predio Venecia, bajo dos escenarios que son susceptibles de ser utilizados por pequeños y medianos propietarios forestales en el centro-sur de Chile (Gayoso y Labbé 2018, Labbé y Vera 2017). Asumiendo el menor costo de transporte, junto con la ventaja de almacenar astillas durante la época invernal (añadiendo un costo de almacenamiento), la mejor alternativa consistiría en el astillado en la central de biomasa. Sin embargo, el menor costo de cosecha se alcanza con el escenario de astillado a orilla de camino, dado que no es necesario incurrir en un gasto asociado a la instalación de la central de biomasa. Este escenario logístico es el más utilizado en países como Italia, Suecia y Austria (Francescato *et al.* 2009, Ericsson y Werner 2016).

6 CONCLUSIONES

Las plantaciones de *E.globulus* con uso productivo considerando restricciones de resguardo hídrico, protección del suelo, de la flora y la fauna fueron de 423,3 ha, distribuidas en 11 rodales en el predio Venecia.

Los parámetros de calidad de astillas definidos fueron de tipo A2, donde el valor crítico fue el contenido de humedad, siendo inferior al 35%. Este contenido de humedad es posible alcanzarlo a través de un secado natural en terreno, apilando la biomasa fuera de dosel durante la estación de verano.

La disponibilidad de biomasa fustal para la producción de astillas correspondió a $4.159,7 \text{ Mg año}^{-1}$, equivalente a una superficie de cosecha anual de 34,5 hectáreas. Una faena de esta escala implica la gestión de $98,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ de residuos de cosecha que son dejadas en el sitio.

El costo de suministro de biomasa de astillas para el escenario de astillado a orilla de camino resultó en $28.671 \text{ \$ Mg}^{-1}$ y para el escenario de astillado en central de biomasa fue de $29.067 \text{ \$ Mg}^{-1}$, por tanto, considerando el menor costo de suministro, la mejor alternativa consistiría en el astillado a orilla de camino. No obstante, dado que la diferencia de costos es baja, la selección del escenario logístico deberá depender de las condiciones operativas de los rodales en producción.

7 REFERENCIAS

- Ackerman P, H Belbo, L Eliasson, A de Jong, A Lazdin, J Lyons. 2014. The COST model for calculation of forest operations cost. *International Journal of Forest Engineering* 25 (1): 75-81 p.
- Alakangas E, M Virkkunen. 2007. Biomass fuel supply chains for solid biofuels from small to large scale. Fact sheets of the EUBIONET II project (EIE/04/065/S07.38628). Intelligent Energy for Europe and Finnish Ministry of Employment and the Economy. Disponible en [http://www.biomassstradecentreii.eu/data/upload/D5_5_Biomass_supply_chains_eubionet_1_\(1\).pdf](http://www.biomassstradecentreii.eu/data/upload/D5_5_Biomass_supply_chains_eubionet_1_(1).pdf)
- Bertrán J, E Morales. 2008. Potencial de generación de energía por residuos del manejo forestal en Chile. Comisión Nacional de Energía (CNE). Santiago, Chile. 56 p.
- Bown H, JP Lasserre. 2015. An air-drying model for piled logs of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in Chile. *New Zealand Journal of Forestry Science* 45 (17): 9 p.
- Burgos F. 2010. La Biomasa como Fuente de Energía Sustentable. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 69 p.
- Burgos F, C Guineo, C Rocha, S Pelz, J Steinbrink. 2015. Energetic and Physical Characterization of Southern-Chilean Forest. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 7 p.
- Carey P, F Sotomayor, P Valenzuela. 2006. Evaluación técnica de un sistema tradicional de cosecha en plantaciones de *Eucalyptus globulus* de corta rotación en Valdivia, Chile. *Bosque* 27 (3): 5 p.
- CIREN. Publicación CIREN N° 123. 2003. Estudio Agrológico X Región. Descripciones de suelos. Materiales y símbolos. Santiago, Chile. 412 p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 2017. Protocolo de plantaciones forestales (Informe de Gestión del Consejo de Política Forestal). Santiago, Chile. 25p.
- CNE (Comisión Nacional de Energía de Chile). 2007. Comisión Nacional de Energía, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Instituto Forestal. Residuos de la industria primaria de la madera. Disponibilidad para uso energético. Santiago, Chile. 120 p.
- Chile Forestal. 2009. Especial Bioenergía. Revista N° 339.
- Di Castri F, E Hajek. 1976. Bioclimatología de Chile. Santiago, Chile. Editorial Universidad Católica de Chile. 128 p
- Egger C, C Öhlinger, B Auinger, B Brandstätter, N Richler, G Dell. 2013. Biomass heating in Upper Austria Green energy, green jobs. edit. por OO Energiesparverband. Linz, Austria. 40 p.

- Ericsson K, S Werner. 2016. The introduction and expansion of biomass use in Swedish district heating systems. *Biomass and Bioenergy* 94: 57-65 p.
- Estevan M. 1980. Las evaluaciones de impacto ambiental. Cuadernos del Centro Internacional de Formación en Ciencias Ambientales (CIFCA). Madrid, España. 100 p.
- Francescato V, E Antonini, L Zuccoli. 2012. Manual de combustibles de madera. Producción, requisitos de calidad y comercialización. En colaboración con Christian Metschina, Christian Schnedl, Krajnc Nike, Kajetan Kosciak, Piort Gradziuk, Gianfranco Nocentini und Stefano Stranieri. Valladolid, España. AVEBIOM.
- Francescato V, L Zuccoli, C Metschina, C Schnedl, N Krajnc, K Kosciak, G Nocentini, S Stranieri. 2009. Wood fuels handbook. AIEL - Italian Agriforestry Energy Association. 79 p.
- Garcinuño J. 1995. Biomasa aérea en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* Lab. en la costa de Valdivia, X Región. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia, Chile. 76 p.
- Gayoso J, A Iroume. 1995. Impactos del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. Universidad Austral de Chile, Valdivia. *Bosque* 16(2): 3-12 p.
- Gayoso J, R Labbé. 2018. Estudio de valorización energética de Biomasa Forestal en la Región de Los Ríos. Valdivia, Chile. 22 p.
- Ghaffariyan M, M Brown, M Acuna, J Sessions, T Gallagher, M Kühmaier, R Spinelli, R Visser, G Devlin, L Eliasson, J Laitila, R Laina, M Iwarsson, G Egnell. 2017. An international review of the most productive and cost effective forest biomass recovery technologies and supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74: 145-158 p. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117302174>
- Gerding V. 1991. *Pinus radiata*-Plantagen in Zentralchile: Standortfaktoren der Produktivität und Nährstoffverteilung in Beständen. Tesis Dr. Göttingen, Alemania. Forstwissenschaftlichen Fachbereichs. Universidad Georg August-Göttingen. 182 p.
- Gutiérrez D. 2014. Análisis de la situación actual y futura del consumo de biomasa forestal para generación en Chile. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia, Chile. 74 p.
- Hunter I. 2001. Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia sissoo*) as affected by irrigation and fertiliser, at 3 years of age, in southern India. *Forest Ecology and Management* 144: 189-199 p.

- IBOS-UACH (Instituto de Silvicultura de la Universidad Austral de Chile, CL). 2012. Estimación y caracterización de desechos de cosecha en bosque nativo y plantaciones forestales. Informe de cumplimiento de resultados, Proyecto Fondef D08I1056 (Fortalecimiento del sector energético a partir de fuentes renovables mediante el desarrollo de modelos de disponibilidad, gestión y transformación de biomasa forestal para plantas de cogeneración). Valdivia, Chile.
- IEA (International Energy Agency). 2020. Renewables Information. *Renewables Information: Overview*. 30 p.
- IDE MINAGRI (Infraestructura de datos espaciales del ministerio Ministerio de Agricultura Ganadería, CL). 2017. Catastro y Actualización de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra. Consultado 21 may. 2020. Disponible en <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/>.
- Labbé R, C Vera. 2017. Modernizando el negocio de la leña: asociatividad, valor agregado y eficiencia energética. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 30 p.
- Labbé R, P Carey, G Trincado, O Thiers. 2018. Natural drying of forest biomass: Effect of stack height and cover in the province of Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia, Chile. *Bosque* 39(3): 449-456 p.
- MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo). 1982. Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. Madrid, España. 572 p.
- Nicklitschek M, R Labbé, J Guerrero. 2018. Calefacción central y agua caliente sanitaria con astillas ¿Es conveniente sustituir las calderas a diésel, gas y leña en los edificios de Valdivia? “Modernizando el negocio de la leña: asociatividad, valor agregado y eficiencia energética”, 17pdt – 73465. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 37p.
- UNE-EN ISO 17225-4 (2014). Especificaciones y clases de combustibles. Parte 4: Astillas de madera para uso no industrial.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2016. Casos ejemplares de manejo forestal sostenible en Chile, Costa Rica, Guatemala y Uruguay. Santiago de Chile. 246 p.
- Ortiz L. 1996. Aprovechamiento energético de la Biomasa Forestal.
- Ortiz L. 2006. Xiloenergética I
- Palma I, T Troncoso. 2001. Asignación óptima de equipos en faenas de cosecha forestal. *Bosque* 22(1): 65-73 p.

- Palmer D, I Tubby, G Hogan, W Rolls. 2011. Biomass heating: a guide to small log and wood pelletsystems. Biomass Energy Centre, Forest Research, Farnham. 12 p.
- PUCh (Pontificia Universidad Católica de Chile, CL). 2011. Energía de biomasa forestal, lecciones internacionales y su potencial en Chile. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Santiago, Chile. 30 p.
- Sang-Kyun Han. 2011. Managing Woody Biomass Transportation for Improved Biomass Economics. Doctor of Philosophy in Forest Engineering. Oregon State University. 191 p.
- Schwarz M, L Lasselsberger, W Haslinger. 2011. Determination of annual efficiency and emission factors of small-scale biomass boiler. *Bioenergy GmbH. Wieselburg*. Disponible en https://www.best-research.eu/files/publications/pdf/Schwarz_etal_-_Annual_Efficiency.pdf
- Tomczak K, T Jelonek, A Tomczak. 2020. Effect of Natural Drying Methods on Moisture Content and Mass Change of Scots Pine Roundwood. Department of Forest Utilization, Faculty of Forestry, Poznań University of Life Sciences. 13 p.
- UACH (Universidad Austral de Chile, CL). 2018. Estudio de Valorización Energética de Biomasa Forestal en la Región de Los Ríos. 367 p.
- Zamora R, K Boston, J Sessions. 2015. Economic Optimization of Forest Biomass Processing and Transport in the Pacific Northwest USA. *Forest. Science* 61(2): 220–234 p.

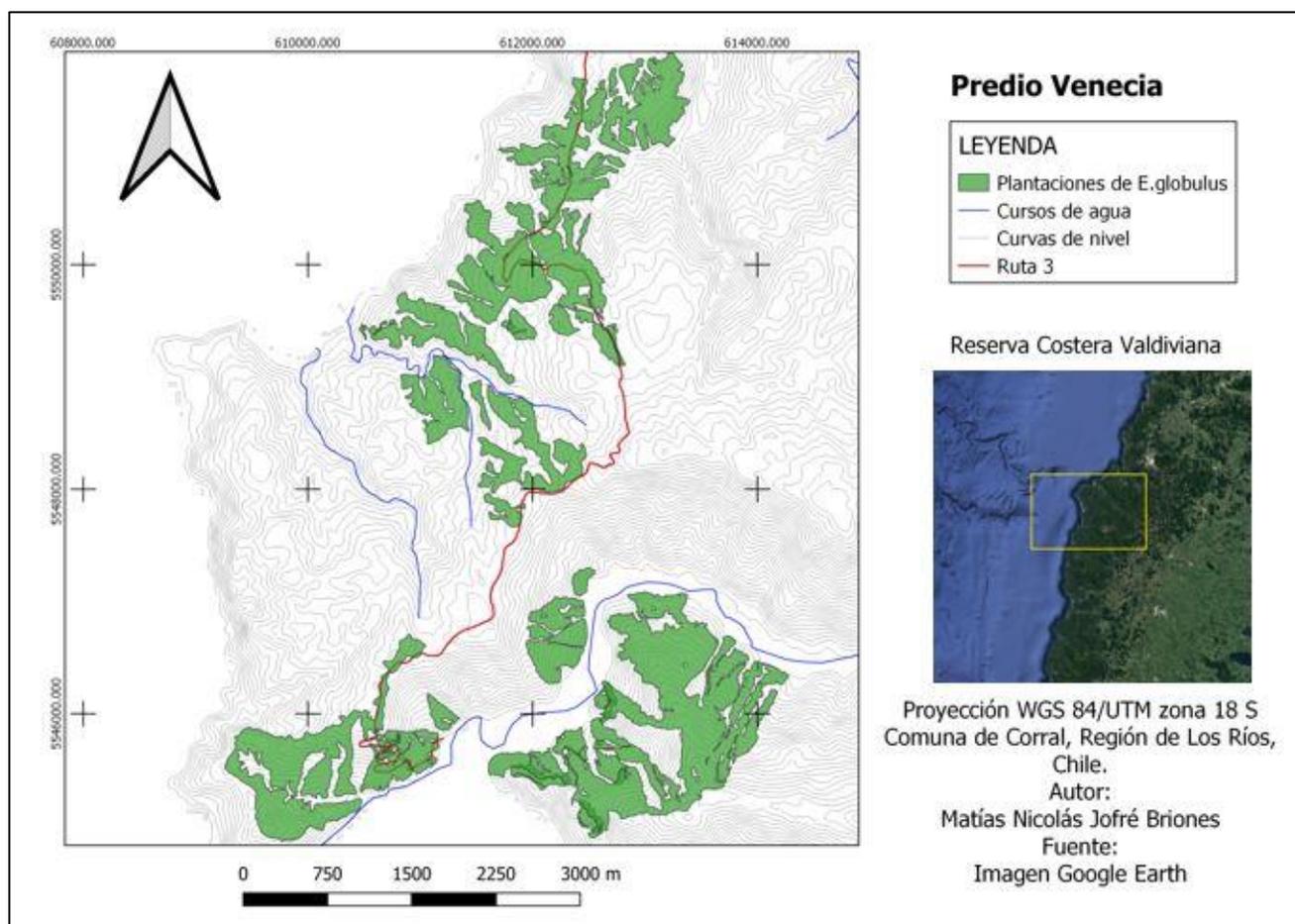
8 ANEXOS

Anexo 1. Rendimiento de los equipos.

Rendimiento de los equipos seleccionado en cada actividad para ambos escenarios de cadena de suministro. El astillado a orilla de camino comprende las actividades de volteo, extracción, desrame y despunte, y astillado. El escenario de astillado en central de biomasa incluye las actividades de volteo, extracción, desrame y despunte, y trozado.

Actividad	Equipos	Rendimiento m ³ hrpl ⁻¹	Fuente
Volteo	Motosierra 1,5 Hp (Stihl 017)	7,1	Carey <i>et al.</i> 2006
Extracción	Skkider con huinche	25	Palma y Troncoso 2001
Desrame y despunte	Hachas de mango recto	20,9	Carey <i>et al.</i> 2006
Trozado	Motosierra 1,5 Hp (Stihl 017)	9,2	Carey <i>et al.</i> 2006
Astillado a orilla de camino	Astilladora FARMÍ 380 HFC + Tractor	65	http://www.baygar.com/pdf/1399476444_S3Ox.pdf

Anexo 2. Área de estudio.



Plantaciones de *E. globulus* (617 ha) en el predio Venecia localizado en la Reserva Costera Valdiviana, comuna de Corral, región de Los Ríos.

Anexo 3. Ancho mínimo de la zona de protección de cursos y cuerpos de agua.

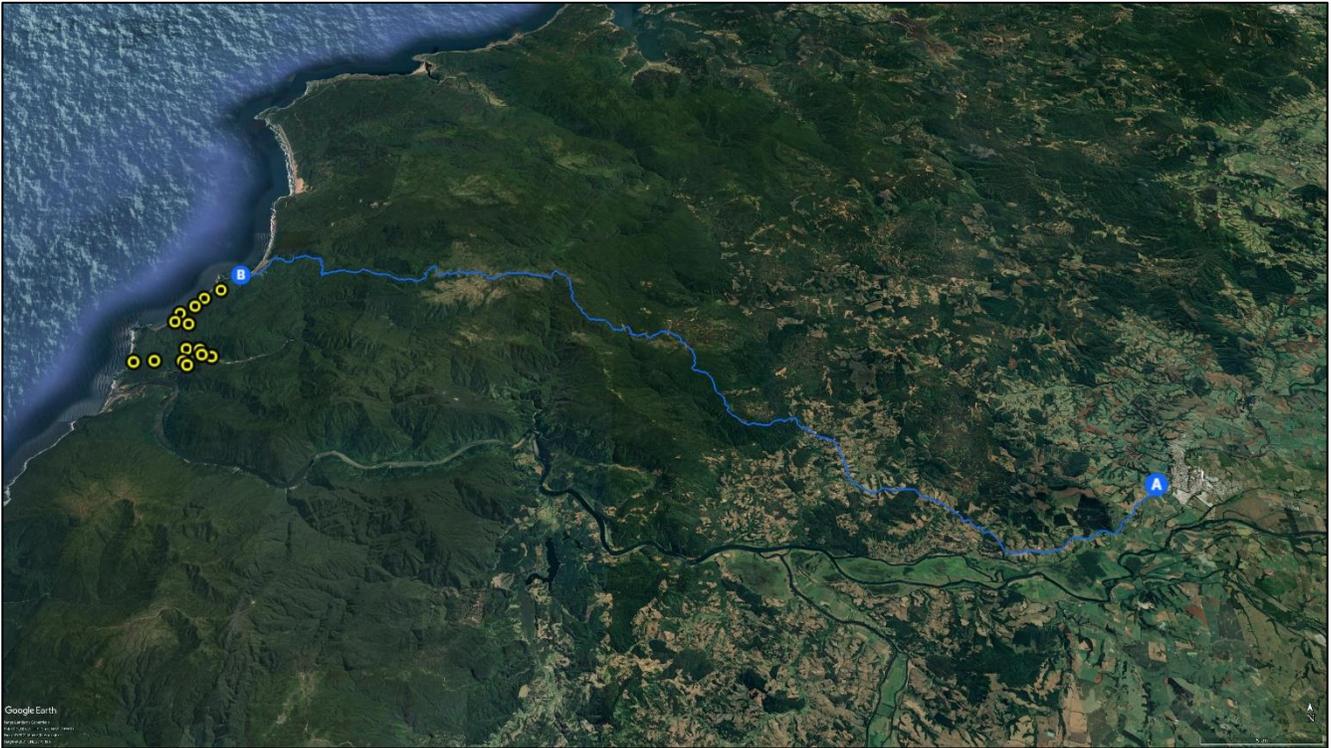
Categorías	Temporalidad		Pendiente		
	Permanente	Temporal	<30	30-45	>45
Cuerpos de agua	X	X	20	20	30
Manantiales. Ríos y esteros (sección de cauce >0,5 m2)	X	X	10	20	30
Esteros y cursos de agua (sección de cauce ≤0,5m2 y >0,2m2)	X	X	10	10	10
Quebrada con cauce (sección de cauce ≤0,2 m2)	X	-	5	10	10
	-	X	5	5	5
Humedales	X	X	10	10	10

Fuente: Cifras consensuadas por el Comité de Expertos de Protección de Suelos y Agua al 30/06/2017.

Anexo 4. Especificación de las propiedades de las astillas de madera y combustible triturado según la norma UNE-EN ISO 17225-4: 2014.

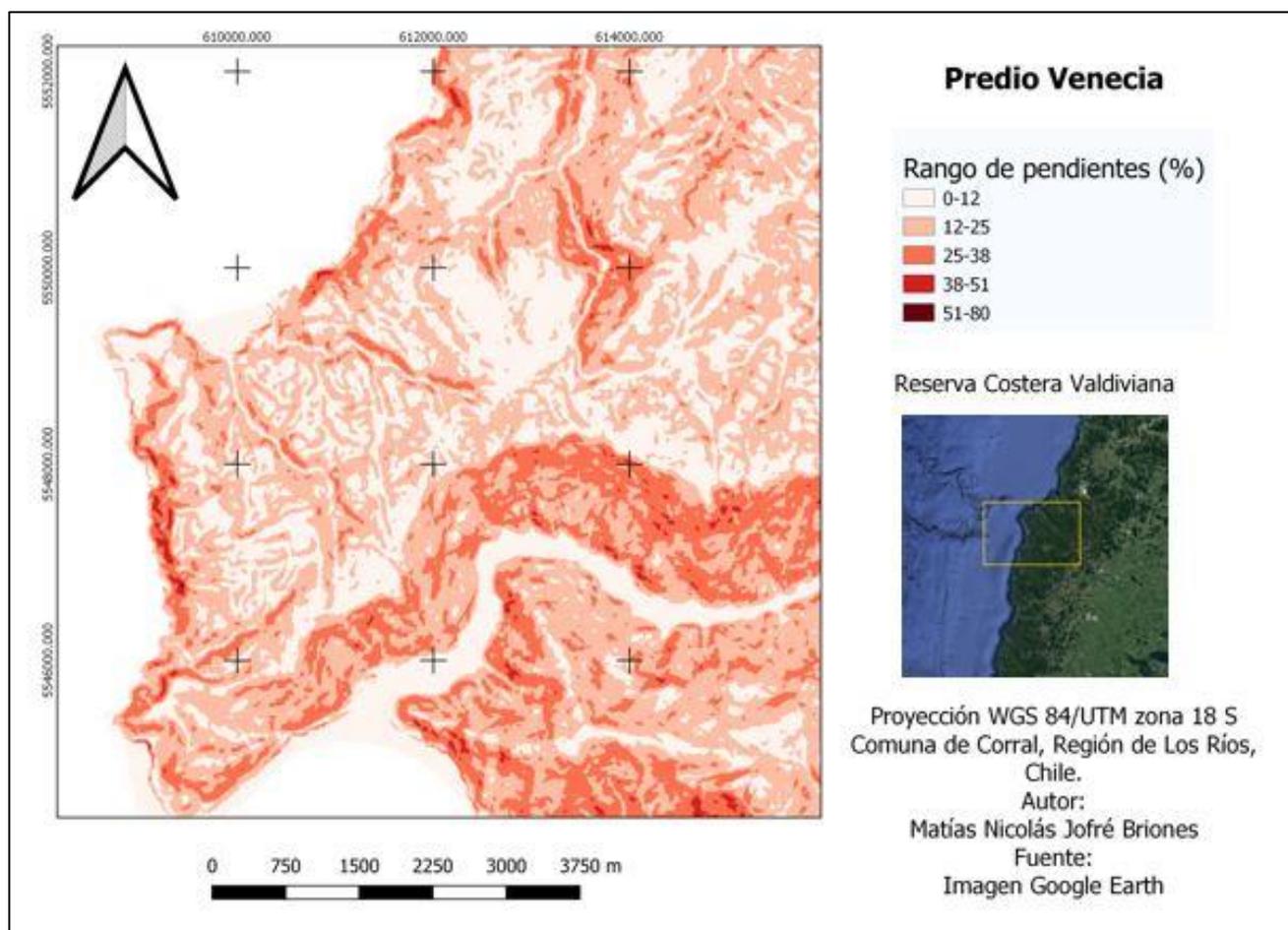
Dimensiones (mm) ISO17827-1				
Factor principal (Mínimo 60% en masa) mm		Fracción gruesa, % en masa. (Longitud de partícula mm)	Máxima longitud de partícula (mm)	Área de la sección transversal máxima de la fracción gruesa (cm ²)
P16S	3.15 mm < P ≤ 16 mm	≤ 6% > 31 mm	≤45	≤2 cm ²
P16	3,15 mm < P ≤ 16 mm	≤ 6% > 31 mm	≤150	≤2 cm ²
P31S	3,15 mm < P ≤ 31,5 mm	≤ 6% > 45 mm	≤150	≤4 cm ²
P31	3,15 mm < P ≤ 31,5 mm	≤ 6% > 45 mm	≤200	≤4 cm ²
P45S	3,15 mm < P ≤ 45 mm	≤ 6% > 63 mm	≤200	≤6 cm ²
P45	3,15 mm < P ≤ 45 mm	≤ 6% > 63 mm	≤350	≤6 cm ²
P63	3,15 mm < P ≤ 63 mm	≤ 6% > 100 mm	≤350	≤6 cm ²
P100	3,15 mm < P ≤ 100 mm	≤ 6% > 150 mm	≤350	No especificado
P200	3,15 mm < P ≤ 200 mm	≤ 6% > 250 mm	≤350	No especificado
P300	3,15 mm < P ≤ 300 mm	No especificado	No especificado	No especificado

Anexo 5. Ruta óptima.



Ruta óptima desde la central de biomasa A (a 3 km de la planta de energía ubicada al centro de la ciudad de La Unión) hasta el inicio del camino interior del predio Venecia B (Hueicolla). Los círculos amarillos indican las 14 unidades de cosechas definidas para el suministro de biomasa. **Fuente:** Google Earth.

Anexo 6. Mapa de pendientes.



Mapa de pendientes del predio Venecia en la Reserva Costera Valdiviana, comuna de Corral, región de Los Ríos.

Anexo 7. Costos de cosecha.

Costos de cosecha según diferentes actividades en el aprovechamiento de la biomasa. Los costos de volteo, extracción, desrame y despunte son los mismos para ambos escenarios de cadena de suministro. La actividad de astillado* es exclusiva para el escenario de astillado a orilla de camino y el trozado** para el escenario de astillado en central de biomasa.

Factor de costos	Actividades				
	Volteo	Extracción	Desrame y despunte	Trozado**	Astillado*
COSTOS FIJOS (CF)					
Inversión inicial (CLP)	680000	97.500.000	28.000	680000	57575575,0
Vida útil (hpl)	17.520	43.800	17.520	17.520	87600,0
Valor de reventa (CLP)	136000	19500000	5600	136000	11515115,0
Depreciación (CLP hpl ⁻¹)	136	7800	5,6	136	4606,0
Inversión media anual (CLP hpl ⁻¹)	272	33150	11,2	272	19575,7
Interés, impuesto y seguro (CLP hpl ⁻¹)	48,96	5967	2,016	48,96	3523,6
Total, Costos fijos (CF) (CLP hpl ⁻¹)	184,96	13767	7,616	184,96	8129,7
COSTOS VARIABLES (CV)					
Consumo de combustible (L hpl ⁻¹)	1	18	-	1	14
Costo combustible CLP (\$ L ⁻¹)	419,22	11016	-	419,22	8568,0
Consumo de lubricantes (L hpl ⁻¹)	0,3	0,3	-	0,3	
Costo lubricante (CLP l ⁻¹)	125,766	3304,8	-	125,766	2570,4
Mantenimiento y reparación (% de depreciación) *	20	20	-	20	20,0
Valor accesorio (CLP)	45300	200000	-	45300	245300,0
Vida útil (hpl)	2000	2000	2000	2000	2000
Reparación y mantenimiento (CLP hpl ⁻¹)	136	7800	-	136	4606,0
Combustible (CLP hpl ⁻¹)	419,22	11016	-	419,22	8568,0
Lubricante (CLP hpl ⁻¹)	125,766	3304,8	-	125,766	2570,4
Accesorios (CLP hpl ⁻¹)	22,65	200	-	22,65	312,0
Total, Costos Variables (CV) (CLP hpl ⁻¹)	703,636	22320,8	-	703,636	16056,4
COSTO MANO DE OBRA (MO)					
Mano de Obra (MO) (CLP hpl ⁻¹)	3744	4464	3744	3744	4464,0
COSTO HORARIO TOTAL (CF + CV + MO)					
(CLP hpl ⁻¹)	4632,596	40551,8	3751,6	4632,596	28650,1

Anexo 8. Distancias totales desde cada unidad de cosecha.

Distancias totales desde cada unidad de cosecha (figura 3) hasta el punto B (inicio del camino interior principal), sin el factor de corrección de curvas (1,5).

Unidades de cosecha	Distancia hasta el punto B (km)
1	2,28
2	3,82
3	6,42
4	10,16
5	14,66
6	15,67
7	19,42
8	20,55
9	21,11
10	21,88
11	22,57
12	24,27
13	23,89
14	24,63

Anexo 9. Costos de transporte para los diferentes tipos de camiones según las diferentes rutas de recorrido.

Factor de costos	Astillado a orilla de camino		Astillado en central de biomasa	
	Chipero		Camión y carro	Chipero
Ruta de viaje (km día-1)	201		195	6
Tiempo de ruta (hr día-1)	8		7	1
COSTOS FIJOS (CF)				
Inversión inicial (CLP)	180168226		79700000	180168226
Vida útil (km)	700000		700000	700000
Valor de reventa (CLP)	360336		159400	360336
Depreciación (CLP Mg ⁻¹)	1734		744	52
Inversión media anual (CLP Mg ⁻¹)	6905		3044	6064
Interés, impuestos y seguro (CLP Mg ⁻¹)	414		183	364
Total, Costos fijos (CF) (CLP Mg ⁻¹)	2977		1292	1143
COSTOS VARIABLES (CV)				
Consumo de combustible (L km ⁻¹)	0,3		0,3	0,3
Costo combustible CLP (\$ L ⁻¹)	614		614	614
Consumo de lubricantes (% del consumo y costo de combustible)	10%		10%	10%
Mantenimiento y reparación (% de depreciación) *	20%		20%	20%
Valor accesorio (CLP)	214536		214536	214536
Reparación y mantenimiento (CLP Mg ⁻¹)	1250		1232	37
Combustible (CLP Mg ⁻¹)	1604		1581	48
Lubricante (CLP Mg ⁻¹)	160		158	5
Accesorios (CLP Mg ⁻¹)	1246		790	37
Total, Costos Variables (CV) (CLP km-1)	4260		3761	127
COSTO MANO DE OBRA (MO)				
Mano de Obra (MO) (CLP Mg ⁻¹)	2532		2343	286
Overhead (20%)	1954		1479	311
COSTO TOTAL (CF + CV + MO+ Ov) (CLP Mg⁻¹)	11722		8876	1868