

Manejo del matorral norpatagónico y dendroenergía: potencialidad regional del residuo forestal

Trabajo Final

Requisito para acceder al título de Ingeniera Ambiental



Universidad Nacional de Río Negro, Sede Andina

Candidato: Cardoso Yamila Anahí
Carrera: Ingeniería Ambiental
Director: Dr. Ing. Oddi Facundo José
Co- director: Ing. Goldenberg Matías

Febrero, 2019

Resumen	3
Introducción	1
Antecedentes y justificación	3
Objetivos.....	5
Materiales y métodos	6
Caracterización energética.....	8
Cartografía: oferta potencial de residuos forestales, balance energético y evaluación monetaria	16
Resultados	22
Caracterización energética.....	22
Cartografía: oferta potencial de residuos forestales, balance energético y evaluación monetaria	28
Discusión	33
Caracterización energética.....	33
Cartografía: oferta potencial de residuos forestales, balance energético y evaluación monetaria	36
Conclusiones	39
Bibliografía	41

RESUMEN

La dendroenergía, energía generada mediante biomasa forestal, representa una de las alternativas para cubrir la demanda energética regional de Patagonia. Utilizada principalmente en los sectores rurales y barrios periféricos que no cuentan con acceso a gas o electricidad, esta alternativa cobra mayor importancia debido a las condiciones climáticas de la región. Las actividades silvícolas que se practican en los bosques nativos de Patagonia, dejan gran cantidad de residuos que pueden utilizarse como fuente de energía y su aprovechamiento podría promover la creación de empleo en zonas rurales, convirtiendo en recurso lo que usualmente se considera residuo. El objetivo general de este Trabajo Final fue evaluar a escala regional el potencial dendroenergético del matorral norpatagónico bajo manejo, ya que es un tipo forestal altamente productivo y el más cercano a los núcleos urbanos. Para alcanzar este objetivo, se determinaron las propiedades energéticas de las especies nativas más representativas del matorral: ñire (*Nothofagus antártica* (G. Forst.) Oerst), laura (*Schinus patagonicus* (Phil.) Johnst.), radial (*Lomatia hirsuta* (Lam.) Diels ex Macbr.), retamo (*Diostea juncea* (Gillies et Hook.) Miers) y notro (*Embothrium coccineum* (J. R. Forst. Et G. Forst). El muestreo de campo se llevó a cabo en un sitio cercano al paraje “El Foyel”, 73 km al sur de San Carlos de Bariloche. El matorral se clasificó en tres categorías de acuerdo a su ubicación: fondo de valle, ladera sur, y ladera norte. Luego, se combinó el poder calorífico de las especies con la cantidad de residuos forestales que genera la aplicación de un sistema de manejo sustentable en cada una de las categorías. Estos datos fueron extrapolados a toda la distribución del matorral en la provincia de Río Negro. A partir de herramientas SIG, se elaboraron mapas de oferta potencial de residuos forestales, balance energético y evaluación monetaria del uso del residuo forestal del matorral como recurso energético. Para elaborar los mapas se asumió que el residuo forestal se comercializa en San Carlos de Bariloche y El Bolsón, las dos ciudades rionegrinas más pobladas de la zona andina. Las maderas analizadas mostraron aptitudes energéticas comparables con las de otras especies leñosas que se utilizan comúnmente como combustibles. De las especies caracterizadas, el ñire presentó el mayor de poder calorífico por unidad de volumen y el notro mostró una buena aptitud energética debido a que posee un alto poder calorífico combinado con un bajo contenido de cenizas. El balance energético y la evaluación monetaria resultaron positivos en toda la distribución del matorral. La energía del residuo

superó de 70 GJ ha^{-1} a 800 GJ ha^{-1} la energía que demandaría su utilización, dependiendo de la ubicación y del tipo de matorral. Las mayores ganancias monetarias se observaron en los matorrales de ladera sur más cercanos a los centros de consumo, con valores de hasta de $90000 \text{ \$ ha}^{-1}$ (USD 2330), y las menores en los matorrales de fondo de valle alejados de las ciudades, con ganancias desde aproximadamente $1000 \text{ \$ ha}^{-1}$ (USD 26). Este Trabajo Final aporta información de base sobre la caracterización energética de las especies más representativas del matorral norpatagónico, de gran utilidad para la evaluación del potencial dendroenergético de esta región. Además, presenta una primera aproximación espacialmente explícita de la viabilidad económica de la explotación sustentable de este recurso. Los resultados obtenidos son promisorios, sin embargo, trabajos futuros sobre esta temática deberían considerar otros factores importantes como el análisis temporal (dinámica del matorral y flujo de fondos) y la factibilidad de otros formatos dendroenergéticos de mayor densidad energética (astillas, pellets, etc.).

INTRODUCCIÓN

El actual proceso de cambio climático presenta importantes desafíos socioambientales relacionados con el uso de la energía. Por ejemplo, una de las principales estrategias de mitigación del cambio climático es el uso de energías alternativas que ayuden a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (FAO 2009). Además, diversificar las fuentes de energía es clave para cubrir la creciente demanda energética producto del aumento de la población mundial. Contar con una matriz energética diversificada se vuelve aún más importante en un contexto de crisis de abastecimiento ya que disminuye la dependencia de los recursos fósiles, afianzando la seguridad energética de los países (Hilbert 2013).

La bioenergía, energía derivada de la biomasa, es una alternativa que está recibiendo gran atención a nivel mundial. Además de renovable, se la considera una energía limpia porque no contribuye al aumento de gases de efecto invernadero debido a que el balance de emisiones de dióxido de carbono es neutro (Secretaría de Energía 2008). Las principales fuentes de biomasa para su generación son los cultivos agrícolas y los bosques (Martín 2006). Sin embargo, tanto bosques como cultivos, deben ser manejados de manera adecuada para que la bioenergía que proveen sea una opción ambientalmente sustentable.

Cuando la bioenergía se genera a partir de biomasa forestal, se denomina dendroenergía (Canalís 2013). Esta energía puede obtenerse de una gran variedad de actividades silvícolas, sin importar que sean realizadas en plantaciones manejadas para tal fin (Goche-Télles et al. 2015). Por ejemplo, la poda y el raleo del bosque dejan una gran cantidad de residuos que pueden utilizarse como fuente de dendroenergía. Por otro lado, estas actividades contribuyen a mantener y mejorar la sanidad del bosque, disminuir el riesgo de incendio y resguardar los servicios ambientales (Loguercio et al. 2008). Por lo tanto, el aprovechamiento de los residuos con fines energéticos puede ser complementario con el cuidado y la conservación forestal.

En Argentina, la dendroenergía es considerada la principal fuente de energía de los sectores más vulnerables. Generalmente, la demanda de leña para cocción de

alimentos y calefacción proviene de los sectores sociales de bajos recursos, o de sectores rurales alejados de núcleos urbanos donde no llegan las redes de gas natural y energía eléctrica (Canalís 2013). Esto implica que además del valor ambiental, la dendroenergía tiene importantes implicancias socioeconómicas, en particular para la periferia de las ciudades con zonas de interfaz urbano-bosque. Por ejemplo, ayuda a resolver el problema que presenta la generación de residuos forestales, habitualmente abordado mediante la quema *in situ* (FAO 2009). Además, promueve la creación de empleo con la consiguiente estabilización de la población en zonas que actualmente están expulsando mano de obra (FAO 2009). Sin embargo, para que la dendroenergía contribuya con el desarrollo sustentable, se requiere de tecnologías que optimicen el aprovechamiento de los residuos forestales y aumenten la eficiencia energética de los combustibles maderables (FAO 2008). Una manera de aumentar la eficiencia es disminuir el contenido de humedad por debajo del 30% (FOCER 2002). La humedad tiene implicancias tanto tecnológicas como ambientales, ya que reduce la temperatura de combustión por debajo de la óptima, dando lugar a una combustión incompleta del combustible, lo que puede generar problemas en calderas debido a escorias y exceso de producción de humos (Espósito-González 2015).

Uno de los problemas comunes en Argentina asociados al desarrollo de la dendroenergía es la falta de información acerca de la localización y las propiedades energéticas del recurso forestal (Hilbert 2013). En general, la madera utilizada se caracteriza por una baja densidad energética, es decir, posee poca cantidad de energía por unidad de volumen. Se suma también la alta dispersión geográfica del recurso. Estos aspectos son claves ya que, transportar un recurso forestal de baja densidad hasta centros de consumo distantes, demanda un alto costo de energía (cubierto en general por combustibles fósiles), lo cual debería considerarse en el análisis de producción y la eficiencia energética. Todo ello implica que en la práctica, el desarrollo de la dendroenergía se enfrente a importantes desafíos en Argentina (Hilbert 2013). En este sentido, es clave que en el país se genere información de base acerca de las oportunidades que sus regiones ofrecen en cuanto a la disponibilidad, localización, y características energéticas de la biomasa.

Antecedentes y justificación

La diversificación de la matriz energética de un país es clave para alcanzar la seguridad energética. La conformación de la misma depende de diversos factores, de los cuales los asociados al mercado están entre los más importantes (Straschnoy et al. 2010). Dado que de acuerdo al análisis económico tradicional las energías alternativas son consideradas no competitivas (Straschnoy et al. 2010), en general estas matrices están mayormente conformadas por energías derivadas de combustibles fósiles (Cárdenas 2011). Sin embargo, estas evaluaciones no tienen en cuenta que las energías convencionales se obtienen de recursos no renovables y tampoco consideran sus externalidades negativas (emisiones de gases de efecto invernadero, impactos en la salud y el medio ambiente, etc.), aspecto que es clave abordar desde la ingeniería ambiental.

Argentina, con una matriz energética dependiente casi en su totalidad de recursos no renovables, es un claro ejemplo de esta problemática. La demanda de energía ha aumentado significativamente en los últimos años, las reservas y la producción de hidrocarburos han disminuido y, como consecuencia, el país atraviesa una crisis de energía que requiere importar combustibles líquidos y gas licuado (Feccia 2015). Al no tener capacidad de autoabastecimiento y depender de importar de un recurso estratégico que es caro y que se agotará en pocos años (Straschnoy y Lamas 2010), se ha vuelto vulnerable en materia de seguridad energética. Si bien se estima que durante las próximas décadas los hidrocarburos continuarán dominando en la matriz energética de Argentina, es fundamental que se tomen medidas para que esta crisis no se profundice (Verón y Propato 2015).

Por medio de la Ley 27191 de “Régimen y Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica” promulgada en el año 2015, se fijó como objetivo para el año 2025 que el 20% de la energía eléctrica nacional deberá ser generada por fuentes renovables. También se suma lo asumido en la Conferencia de Cambio Climático de las Naciones Unidas de 2015 (COP 21, París), donde los países participantes, entre ellos la Argentina, se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producto de la quema de combustibles fósiles. De esta forma, los problemas en materia energética junto a la

preocupación por el cambio climático global, han promovido que el país comience una transición hacia las energías renovables, agregando valor a su amplia dotación de recursos, diversificando su recurso energético y aumentando la distribución de la generación (Iezzi 2017). No obstante, para marzo de 2017 la participación de fuentes renovables en la matriz energética era menor al 2% (Mirazón 2017, Soarez 2017), lo cual plantea algunos interrogantes respecto al cumplimiento de las metas establecidas.

En relación a la dendroenergía específicamente, en el año 2009 el Gobierno nacional impulsó, en conjunto con la FAO, el proyecto “Bioenergía: desafíos para la Argentina” para la promoción del uso energético de la biomasa y asociado al mismo se elaboró “WISDOM Argentina”. La metodología WISDOM (Woodfuels Integrated Supply/ Demand Overview Mapping) permite visualizar espacialmente la oferta y la demanda de combustibles leñosos e identificar “puntos calientes” o áreas prioritarias (FAO 2009). Con esto se busca mejorar el conocimiento acerca del recurso biomasa y el potencial bioenergético del país, y ayudar así a las autoridades en la toma de decisiones. También existen otros programas impulsados por el Estado nacional como el Pro-biomasa, lanzado en 2012 para promover las fuentes de energía alternativas y transformar la matriz energética. Bajo estos programas se pretende además incentivar la realización de estudios que ayuden tanto a mejorar la información de base, como a resolver problemas regionales concretos, aspecto que será abordado por este Trabajo Final.

El país cuenta con una vasta extensión territorial caracterizada por una densidad poblacional heterogénea, determinando que en muchas regiones existan grandes distancias entre las zonas de generación de energía y las de consumo (Straschnoy y Lamas 2010). Como se mencionó, esto implica grandes costos energéticos, y por lo tanto también monetarios, pudiendo incluso ocurrir que en ciertas zonas la energía que se obtiene sea menor a la que demanda su producción y transporte (i.e., un balance negativo). Este problema se presenta con frecuencia en la Patagonia, una de las regiones del país con mayor potencial en energías renovables (Secretaría de energía et al. 2009). En efecto, su oferta de recursos naturales la convierte en una región estratégica para la generación de energía eólica, hidráulica, solar, geotermia y dendroenergía. Por otro lado, las condiciones climáticas son severas durante la mayor parte del año y sólo los centros urbanos cuentan

con provisión de gas natural. En muy pocos casos la red de gas llega a los barrios periféricos y el resto de la población utiliza generalmente leña para calefacción y gas envasado para la cocción de alimentos (González et al. 2005).

Considerando la situación energética de Argentina, el impulso del Estado nacional hacia el desarrollo de energías renovables, y la oferta de recursos para su generación que presenta la Patagonia, resulta de gran interés estudiar el potencial dendroenergético de los bosques nativos de esta región, ya que, durante más de 100 años, han sido utilizados para la provisión de madera de construcción y como combustible. En particular, en este trabajo se propone evaluar este potencial en el matorral norpatagónico debido a que es el tipo forestal más cercano a los núcleos urbanos y posee una alta productividad. Además, estas comunidades pueden ser manejadas sustentablemente mediante la extracción de biomasa, seguido de la plantación de especies nativas de alto valor maderero. Dadas las características de la región y de la problemática abordada, las herramientas de análisis espacial cobran especial importancia. Es por ello que este trabajo es abordado desde una perspectiva espacialmente explícita. Se considera que el tema elegido es de relevancia para mejorar las condiciones de los habitantes que no tienen acceso a gas natural y electricidad, en particular en la provincia de Río Negro. Además, este estudio se enmarca dentro de un contexto de manejo sustentable de bosques nativos.

Objetivos

General:

- I. Evaluar la potencialidad regional del matorral norpatagónico, bajo manejo sustentable, para generación de dendroenergía en formato tradicional de leña en la provincia de Río Negro.

Específicos:

- I. Caracterizar el residuo forestal del matorral norpatagónico en base a parámetros físico-químicos de relevancia para su uso energético.

- II. Elaborar un mapa de oferta potencial del residuo forestal del manejo sustentable del matorral en la provincia de Río Negro y cartografiar el balance energético y la evaluación monetaria del uso energético de este residuo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio abarca la distribución del matorral en Patagonia norte, específicamente aquella dentro de los límites de la provincia de Río Negro (Figura 1). Fitogeográficamente, los matorrales de Patagonia norte pertenecen al Dominio Subantártico de la región Andino Patagónica (Cabrera 1971). Están constituidos por bosques y montes bajos de ñire (*Nothofagus antártica* (G. Forst.) Oerst), puros o acompañados por otras especies leñosas, tales como laura (*Schinus patagonicus* (Phil.) Johnst.), radial (*Lomatia hirsuta* (Lam.) Diels ex Macbr.), retamo (*Diostea juncea* (Gillies et Hook.) Miers) y notro (*Embothrium coccineum* (J. R. Forst. Et G. Forst)) (Reque et al. 2007) y representan uno de los tipos forestales más representativos de los bosques caducifolios de la Patagonia andina (Veblen et al. 1996). Su distribución especial se asocia a los núcleos urbanos y estructura actual responde al uso antrópico que históricamente se ha dado al matorral: quema para pastura, pastoreo y extracción de leña y pastoreo (Reque et al. 2007, Gyenge et al. 2009, Gowda 2013).

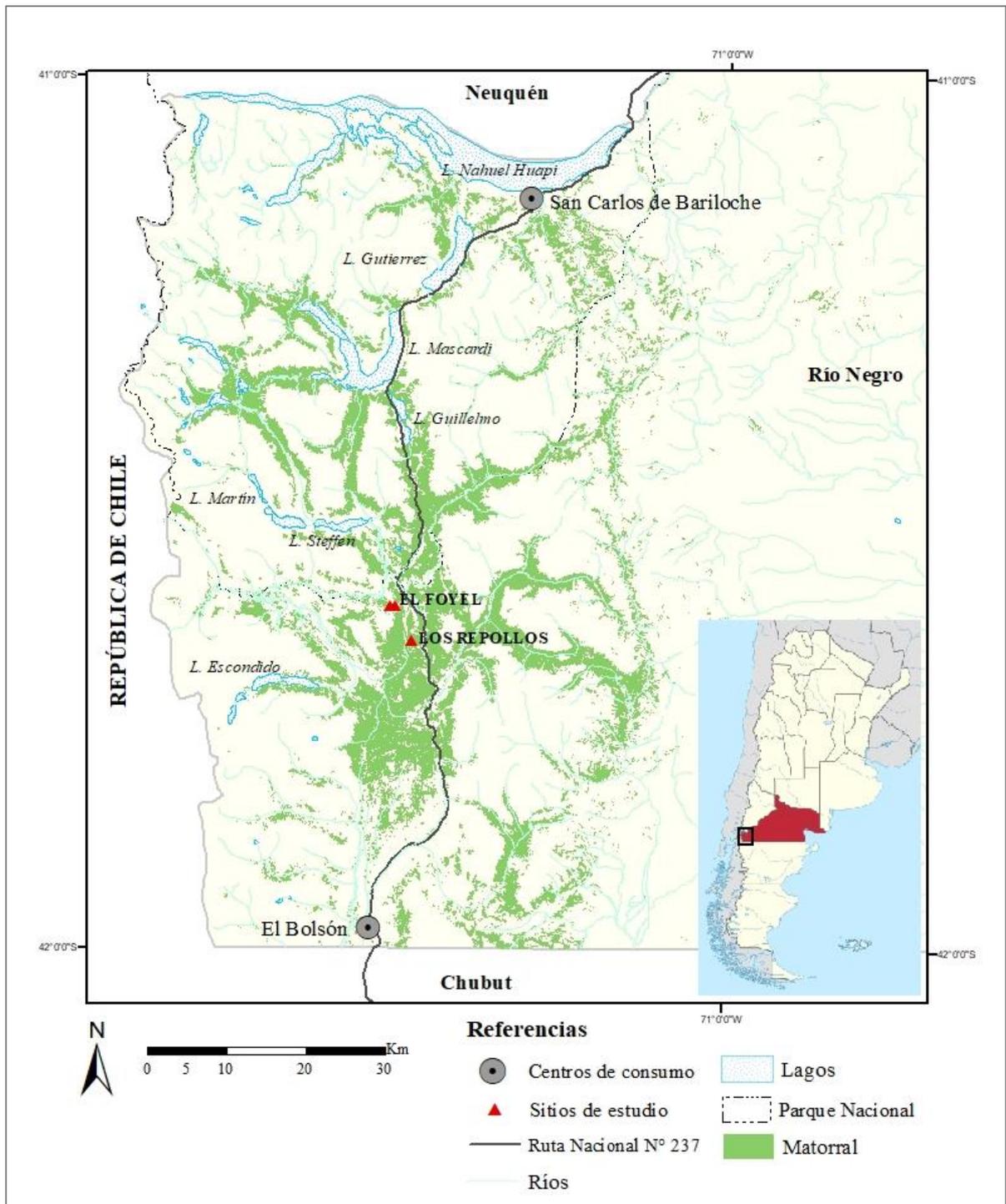


Figura 1: Área de estudio, distribución del matorral en la provincia de Río Negro y ubicación del sitio de estudio "El Foyel" y "Los Repollos".

Caracterización energética

Muestreo de campo

El muestreo de campo se llevó a cabo a principios de noviembre de 2017, en un matorral mixto cercano al paraje “El Foyel” (Figura 1). Se recolectaron muestras de las especies más representativas de las comunidades de matorral en el norte de Patagonia: ñire, laura, radial, retamo y notro (Reque et al. 2007).

Dentro del sitio, se seleccionaron tres individuos por especie ($n = 15$). La selección fue aleatoria, y se buscó que los individuos de una misma especie se encuentren distanciados entre sí. El tamaño muestral está dentro del rango utilizado comúnmente en la caracterización energética de la madera. Al muestrearse árboles de un mismo sitio y coetáneos, se minimizó la variabilidad debida a la edad y las condiciones ambientales (Fernández-Puratich et al. 2014). Durante el proceso de selección se descartaron aquellos individuos que no presentaban un leño en buen estado (podredumbres, ataques de insectos, etc.).

De cada individuo seleccionado se extrajeron: dos rodajas (secciones transversales) de fuste de aproximadamente 2 cm de grosor; un trozo de fuste de aproximadamente 15 cm (se eligió el fuste de mayor diámetro de cada individuo); y dos rodajas de rama de aproximadamente 1 cm (Figura 2). Todo el material se obtuvo con motosierra (Figura 3), y fue rotulado para la correcta identificación de la especie, el individuo y la parte del árbol a la que pertenecía. Luego de cortado, el material fue ubicado en bolsas plásticas herméticas y transportadas al laboratorio para su análisis. Las rodajas, tanto de fuste como de ramas, se utilizaron para determinar humedad y densidad de la madera. A partir de los trozos de fuste se prepararon alícuotas para determinar ceniza y poder calorífico.

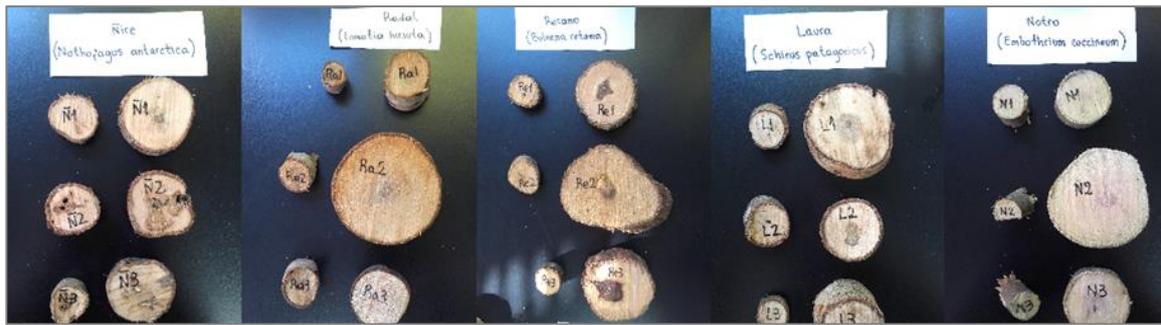


Figura 1: Material leñoso (fustes y ramas) de las especies seleccionadas recolectado en el muestreo de campo.



Figura 2: Extracción del material leñoso durante el muestreo de campo.

Análisis de laboratorio

a. Determinación de humedad

La determinación se llevó a cabo en el laboratorio de la UNRN, aplicando el método de gravimetría indirecta, que consiste en utilizar una estufa de secado para evaporar la humedad del material y registrar la pérdida de peso (Orduña 2016). Para determinar el peso húmedo, el material fue pesado el día del muestreo, evitando así cambios de humedad debidos a la característica higroscópica de la madera. El peso seco se obtuvo a partir de secar el material en estufa hasta peso constante (Figura 4). Se calculó la humedad en base seca (h_{bs}), es decir, respecto al peso seco, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$h_{bs} = \frac{p_h - p_s}{p_s} * 100$$

donde, p_h es el peso húmedo en g; y p_s el peso seco en g. Esta definición de humedad permite valores superiores al 100%. En cada individuo se determinó la humedad en fuste y rama ($n=30=5$ especies x 3 individuos x 2 partes del árbol).



Figura 4: Secado y pesaje del material leñoso en el laboratorio.

b. Determinación de densidad básica

La densidad básica de la madera se define como su peso seco dividido por su volumen verde, es decir, con un contenido de humedad mayor o igual al 30% (Zapata-Sánchez 2006). Se determinó en el laboratorio de la UNRN utilizando el método de Arquímedes, considerado uno de los más prácticos y exactos, y el más utilizado para la medición de material leñoso de formas irregulares (Fernández-Puratich 2012). Este método consiste en sumergir la muestra en un recipiente con agua situado sobre una balanza para, a partir de la diferencia de peso que se produce, la cual es equivalente al peso del agua desplazada, obtener el volumen de la muestra sumergida (Figura 5). La densidad básica (ρ) se calculó de acuerdo a la siguiente expresión (Přemyslovská et al. 2007):

$$\rho = \left(\frac{p_s}{p_h} \right) * \rho_a$$

donde, p_s es el peso del material seco en g; p_h es el empuje que recibe la muestra

sumergida que es igual al peso del líquido desplazado en g; y ρ_a es la densidad del agua en g cm^{-3} . Esta propiedad se analizó en fuste y rama ($n= 30= 5$ especies x 3 individuos x 2 partes del árbol).



Figura 5: Determinación de densidad de la madera por método de Arquímedes.

c. Determinación del contenido de cenizas

Esta determinación se llevó a cabo en el laboratorio de la UNRN. Las alícuotas obtenidas de los trozos de fuste fueron secadas en estufa durante 24 horas, se pulverizaron mediante el uso de una escofina, y se tamizaron con una malla número 35 (Figura 6). Una vez procesado, el material se colocó en cápsulas de porcelana y se llevó a mufla durante 4 horas a 550 °C para asegurar su completa incineración. Finalmente, el contenido de cenizas en base seca (C_{bs}) se determinó de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C_{bs} = \frac{p_{c+ce} - p_c}{p_{c+m} - p_c} * 100$$

donde, p_{c+ce} es el peso de la cápsula más el de las cenizas resultantes en g; p_c es el peso de la cápsula en g; y p_{c+m} es el peso de la cápsula más el del material antes de la incineración en g (el material no contenía humedad porque previamente se secó en

estufa). Esta propiedad se analizó sólo en el fuste de los individuos muestreados ($n= 15 = 5$ especies \times 3 individuos).



Figura 6: Pulverización del material leñoso mediante escofina y tamizado.

d. Determinación del poder calorífico

Se distinguen el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI). La diferencia entre ellos radica en cómo se trata el vapor de agua que se genera durante la combustión. Si luego de la combustión el vapor de agua generado se condensa liberando su calor latente, y éste es contabilizado, entonces se trata del PCS (Cerde 2015). De lo contrario, si el vapor de agua se pierde junto con otros gases de combustión, se obtiene el PCI. En la práctica, este último es el que interesa, debido a que no es posible aprovechar el calor latente de condensación (Marcos y Villegas 2000). El PCS se determina experimentalmente mediante una bomba calorimétrica, mientras que el PCI se obtiene analíticamente a partir del primero, del porcentaje de humedad, y del contenido de hidrógeno de la madera.

Poder calorífico superior:

El procesado del material fue el mismo que el utilizado en la determinación del contenido de cenizas. Una vez obtenidas las alícuotas, estas fueron enviadas al Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional

del Nordeste (UNNE) para su análisis. Allí se determinó el PCS utilizando una bomba calorimétrica de Mahler. En cada determinación se utilizó 1 g de polvillo siguiendo el protocolo de ensayo de la Norma IRAM 17016 y la Norma DIN 51900-1-2000. Luego del análisis de laboratorio, el PCS fue obtenido según la siguiente expresión:

$$PCS = \frac{E * \Delta T - (c_1 + c_2 + c_3)}{m_c}$$

donde, E es el equivalente en agua del calorímetro ($2328 \text{ cal } ^\circ\text{C}^{-1}$, es decir, no depende del ensayo); ΔT es la variación de temperatura alcanzada (es individual de cada ensayo), expresada en $^\circ\text{C}$; c_1 es un factor de corrección por el ácido nítrico (en este caso vale 0 para todos los ensayos ya que no hay nitrógeno ni en el combustible ni en el comburente); c_2 la corrección por el contenido de azufre (también es 0 para todos los ensayos); c_3 la corrección por el alambre de Nichrome utilizado (se mide en cada ensayo); y m_c indica la masa de combustible (se utilizó 1 g). Se realizaron 15 determinaciones, correspondientes al fuste de los individuos ($n= 15= 5 \text{ especies} \times 3 \text{ individuos}$).

Poder calorífico inferior:

El PCI se puede obtener de acuerdo a la siguiente expresión (Orduña 2016):

$$PCI = (PCS - 49,28 * H) * \frac{100 - h_T}{100 - h} - 23 * h_T$$

donde, H es el contenido de hidrógeno del combustible, expresado en porcentaje; h_T es el contenido de humedad del combustible, expresado en porcentaje; y h es el contenido de humedad de la muestra que se utilizó para el cálculo del PCS, expresado en porcentaje. Como en este caso, el PCI se calcula en base seca ($h_T= 0$), con material seco ($h= 0$), la expresión anterior se reduce a:

$$PCI = PCS - 49,28 * H$$

El porcentaje de hidrógeno de la biomasa forestal varía mínimamente de unas especies a otras (Carmona-Cerda 2015). En general, en las maderas de coníferas varía entre 5,6% y 7%, mientras que las de frondosas tienen en su composición entre 5,9% y 6,5% de hidrógeno elemental (Solórzano 2017). En radal y ñire se utilizaron valores de H obtenidos en la bibliografía, 6,1% y 5,4% respectivamente. Para las demás especies estudiadas no se encontró información por lo que se utilizó 5,9%, el promedio de otras especies nativas de la región para las cuales H ha sido reportado (Carmona-Cerda 2015).

e. Índice del valor del combustible

El índice del valor del combustible (IVC), es un indicador de las propiedades combustibles de las distintas maderas, es interesante para poder unificar criterios de comparación. Para calcularlo se necesita conocer la humedad, densidad, contenido de cenizas y poder calorífico. A mayor IVC las maderas tienen mejores propiedades, esto sucede cuando tienen menor contenido de cenizas y/o de humedad, o cuando el valor del poder calorífico y/o la densidad son altos. Se calculó de acuerdo a la siguiente expresión (Purohit y Nautiyal, 1987, Chettri y Sharma 2009):

$$IVC = \frac{PCI * \rho}{C_{bs} * h_{bs}}$$

donde, PCI es el poder calorífico inferior, en kJ g^{-1} ; ρ es la densidad básica de la madera en g cm^{-3} ; C_{bs} es la fracción de ceniza en base seca; y h_{bs} es la humedad en base seca expresada en fracción. Se calculó el IVC de 15 individuos, utilizando los resultados de las determinaciones en fuste de cada una de las propiedades.

Análisis estadístico

Para evaluar las propiedades de las maderas se emplearon modelos lineales con la especie como predictor (categórico con cinco niveles). En el caso de las propiedades que también fueron medidas sobre las ramas, se incluyó el efecto de la parte del árbol (predictor categórico con dos niveles: fuste y rama) y el efecto de interacción con la

especie. De esta forma, PCS, contenido de cenizas, e IVC fueron modeladas de la siguiente manera:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \text{ indep.}$$

donde, Y_{ij} es la propiedad de la madera; j identifica el ensayo (se realizaron 15 ensayos por propiedad, correspondientes a tres individuos por cada una de las cinco especies, en los cuales sólo se analizó el fuste); τ_i es el efecto de la especie i ; y ε_{ij} corresponde al error aleatorio.

Los modelos ajustados para la humedad y la densidad pueden expresarse como:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \eta_j + \lambda_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2) \text{ indep.}$$

donde, k identifica el ensayo (se realizaron 30 ensayos por propiedad, correspondientes a tres individuos de cada una de las cinco especies, en los cuales las determinaciones se realizaron en fuste y en rama); η_j es el efecto de la parte arbórea j ; λ_{ij} el efecto de interacción entre especie y parte arbórea; y ε_{ijk} el error aleatorio.

Luego de estimados los parámetros del modelo, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) (Anderson, 2012; Webster, 2000) para evaluar el efecto principal de la especie y en el caso de las propiedades evaluadas también en las ramas, el efecto principal de la parte del árbol, y el efecto de interacción. Cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicaron pruebas a posteriori (Test de Tukey) (Anderson, 2012).

Por último, se evaluó la relación entre el PCI y la densidad, con el PCI expresado por unidad de peso, y luego expresado por unidad de volumen. En ambos casos el modelo ajustado fue el siguiente:

$$PCI_i = \beta_0 + \beta_0 * \rho_i + \varepsilon_i$$

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \text{ indep.}$$

donde, ρ es la densidad básica obtenida en el ensayo i ($i = 1, 2, \dots, 15$); y ε_i el error aleatorio.

En todas las pruebas inferenciales se utilizó un α (probabilidad de error de tipo I) de 0,05. El análisis estadístico fue realizado en el programa R 3.5 (R Development Core Team, 2000).

Cartografía: oferta potencial de residuos forestales, balance energético y evaluación monetaria

Oferta potencial de residuos forestales

De acuerdo al área de estudio definida, el mapeo se circunscribió a la distribución del matorral norpatagónico en la provincia de Río Negro (Figura 1). La distribución del matorral se obtuvo del Inventario de Bosques Nativos de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (CIEFAP y MAyDS 2016). La misma se clasificó en tres categorías de acuerdo a la ubicación topográfica: fondo de valle (FV), ladera sur (LS), y ladera norte (LN). Esta clasificación responde a que la exposición del matorral es uno de los factores de importancia para determinar la dinámica y composición del mismo (SAyDS 2009). Se trabajó en formato vectorial utilizando como base una grilla con celdas de 500 x 500 m, es decir, cada celda (o pixel) equivale a 25 ha generada por Oddi et al. (2016). La grilla abarca toda la superficie del matorral y contiene atributos espacialmente explícitos a los cuales se les incorporó la categoría de matorral y, en función de esta, la cantidad de residuos forestales. Para asignar la categoría de matorral que le corresponde a cada celda se utilizó el modelo digital de elevaciones ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 (ASTER GDEM Validation Team 2011). A cada categoría de matorral se le asignó la cantidad de residuo forestal que se obtendría considerando la aplicación de un raleo de intensidad media, esto es, con remoción del 50% del área basal. Estos valores fueron generados por el Proyecto SILVA N° 020, UCAR; PICT 2013-1079 (Tabla 1), en el cual tres sitios representativos de cada categoría de matorral fueron sometidos a

distintas intensidades de raleo. Los dos sitios de ladera, norte y sur, se encuentran en el establecimiento “El Foyel” (Figura 1). El tercer sitio, se ubicada en un fondo de valle cerca del establecimiento “Los Repollos” (Figura 1). Se seleccionó una intensidad de raleo media ya que los resultados preliminares indican que sería una opción sustentable en términos ambientales y económicos (Nacif 2016, Goldenberg et al. 2018).

La cantidad de residuos que deja el raleo en cada sitio fue extrapolada al área ocupada por cada tipo de matorral. Es decir, la información de los sitios cercanos a “El Foyel” se extrapolaron a los matorrales ubicados en laderas con orientación norte y sur según corresponda, y la del sitio cercano a “Los Repollos”, a los matorrales de fondo de valle. La extrapolación espacial tiene como supuesto que toda la superficie del matorral bajo estudio recibe el mismo tratamiento de raleo, y que el raleo aplicado a matorrales que pertenecen a una misma categoría produce, en promedio, la misma cantidad de residuos. De esta forma, el mapa final provee una representación espacial de la oferta potencial de residuos forestales de matorrales bajo manejo en la provincia de Río Negro.

*Tabla 1: Generación de residuos de biomasa por hectárea en los tres sitios que fueron sometidos a distintos tratamientos de raleo. El volumen estéreo indica el volumen (m^3) que ocupan la madera y el aire, y el volumen sólido el que ocupa exclusivamente la madera. volumen sólido = $0,6 * \text{volumen estéreo}$. La composición de especies refiere a la cobertura relativa de las especies en el sitio de estudio. Fuente: Proyecto SILVA N°020, UCAR; PICT 2013-1079.*

Sitio	Ubicación	Tipo de matorral	Generación de residuos de biomasa por hectárea		Composición de especies
			Volumen estéreo [$m^3 \text{ ha}^{-1}$]	Volumen sólido* [$m^3 \text{ ha}^{-1}$]	
El Foyel	Ladera sur	Mixto	159,08	95,45	Laura 0,108; Ñire 0,415; Radal 0,016; Retamo 0,079; Notro 0,381
El Foyel	Ladera norte	Mixto	63,39	38,03	Laura 0,166; Ñire 0,413; Radal 0,328; Retamo 0,070; Notro 0,023
Repollos	Fondo de valle	Ñire	13,23	7,94	Ñire 1

Balance energético

Este análisis se basó en comparar las “entradas” y “salidas” de energía que implicaría la utilización del residuo forestal que deja el manejo del matorral en la provincia de Río Negro bajo el esquema previamente mencionado. Para ello se supuso

que el residuo se genera en cada punto del área del matorral, y se consume en formato de leña en San Carlos de Bariloche o El Bolsón¹. Por lo tanto, como entrada se consideró el costo energético del proceso de raleo y del transporte de la biomasa hasta el centro de consumo más cercano; y como salidas, la oferta energética, es decir, la energía contenida en el residuo forestal. Este análisis es espacialmente explícito porque considera que las salidas varían en el espacio de acuerdo al tipo de matorral (éstos difieren en la cantidad de residuos y en su composición); y las entradas de acuerdo a la cantidad de biomasa a ralear (que varía por tipo de matorral), y a la distancia recorrida hasta el centro de consumo. De esta forma, el análisis permite conocer en qué zonas se invertiría más energía de la que se extraería o, caso contrario, dónde el matorral ofrece más energía de la que se necesitaría para ponerla a disposición en el centro de consumo. Queda fuera del alcance de este trabajo el análisis de la energía necesaria para la fabricación de la maquinaria utilizada, para la obtención de los combustibles fósiles, y la energía requerida por parte de los operarios para desarrollar sus tareas.

Para determinar las entradas de energía, se supuso que el raleo del matorral se realiza con motosierra y se consideró la cantidad de combustible que requeriría llevarlo a cabo (consumo de nafta). Se supuso que este consumo sólo depende de la cantidad de biomasa a extraer. Para estimar el costo energético del transporte de los residuos (consumo de gasoil) se consideró la distancia desde cada celda hasta la ruta (camino secundario), y desde allí hasta el centro de consumo. Esto tuvo en cuenta que el combustible consumido en ruta es menor que en los caminos secundarios (se asumió el doble de consumo en caminos secundarios debido a que en general son irregulares y no están en buen estado) (Posada-Henao y González-Calderón 2014), y es menor cuando el camión va a buscar la carga (vacío) que al llevarla hasta el centro de consumo (cargado) (FCAYF-UNLP 2016). Por lo tanto, a diferencia de la energía requerida para la actividad de raleo, el costo de transporte varía dentro de cada tipo de matorral ya que depende de

¹ Se seleccionaron estas dos ciudades de Río Negro por ser las que están más asociadas a las comunidades del matorral, y las que consumen la mayor parte de la leña que proviene de estas comunidades en la provincia.

la distancia. De acuerdo a lo expuesto, las entradas de energía en cada celda se calcularon como:

$$E_i = ER_i + ET_i$$

$$ER_i = Ve_i * CCE * PCI_{nafta}$$

$$ET_i = [(d_i * (CCT_{vacío} + CCT_{cargado})) * PCI_{gasoil} * c_i]$$

donde, E_i representa las entradas o costo energético en la celda i en $MJ ha^{-1}$; ER_i y ET_i los costos de raleo y transporte respectivamente en $MJ ha^{-1}$; Ve_i es el volumen estéreo del residuo forestal de la celda i en $m^3 ha^{-1}$; CCE el consumo de combustible de la motosierra para extraer $1 m^3$ estéreo de biomasa ($1 m^{-3}$); PCI_{nafta} el poder calorífico inferior de la nafta en $MJ l^{-1}$; d_i la distancia de la celda i al punto de consumo más cercano en km (aquí se consideró el gasto diferencial de combustible en ruta y caminos secundarios: $d_i = d_{cs} * 2 + d_r$, dónde, d_{cs} la distancia a recorrer por caminos secundarios; y d_r es la distancia a recorrer por ruta pavimentada); $CCT_{vacío}$ y $CCT_{cargado}$ es el consumo de combustible del camión vacío y cargado respectivamente en $l km^{-1}$; PCI_{gasoil} el poder calorífico inferior del gasoil en $MJ l^{-1}$; y c_i los camiones necesarios para transportar la biomasa (número ha^{-1}). Los valores y fuentes utilizados para los cálculos de las entradas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores y supuestos utilizados para conocer la energía necesaria para el aprovechamiento de la biomasa, proveniente de los combustibles fósiles empleados en las actividades de extracción y transporte.

Variable	Valor	Unidad	Fuente
Combustible para extracción	0,8	$l m^{-3}$	Experimento Foyel (Proyecto SILVA)
Combustible camión sin carga	0,35	$l km^{-1}$	Francescato, Valter; Zuccoli Bergomi 2008
Combustible camión cargado	0,40	$l km^{-1}$	Francescato, Valter; Zuccoli Bergomi 2008
Capacidad del camión	30	m^3	Gutiérrez Rodríguez et al. 2013
PCI nafta	31,83	$MJ l^{-1}$	Ministerio de Energía 2018 (http://www.energia.gob.ar)
PCI gasoil	36,82	$MJ l^{-1}$	Ministerio de Energía 2018 (http://www.energia.gob.ar)

Las salidas representan la energía ofrecida por el residuo forestal de cada celda. La oferta de energía depende de la cantidad de residuo forestal y la composición de especies, lo cual puede expresarse como:

$$S_i = V_{S_i} * \sum_{j=1}^5 (f_j * PCI_{especie_j})$$

donde, S_i es la energía contenida en la biomasa del residuo forestal en la celda i en MJ ha^{-1} ; V_{S_i} el volumen sólido de los residuos forestales en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$; f_j y $PCI_{especie_j}$ la fracción en el residuo y el poder calorífico inferior en MJ m^{-3} de la especie j , respectivamente. Las especies consideradas fueron las cinco utilizadas para la caracterización energética, las cuales representan casi la totalidad del residuo forestal. La determinación de las salidas supone que el volumen de residuos y la composición varían con el tipo de matorral (FV, LN, LS), pero se mantiene constante dentro de cada categoría. La información sobre el volumen y la composición del residuo forestal fue cedida por el Proyecto SILVA (Tabla 1), y para el PCI de las especies se utilizó la información obtenida previamente.

Una vez estimadas las entradas y salidas de energía por hectárea, se calculó el balance energético que resultaría de utilizar el residuo forestal de la celda i (25 ha), en el punto de consumo más cercano:

$$\text{Balance energético}_i = (S_i - E_i) * 25$$

para, de esta forma, generar el mapa del balance energético.

Evaluación monetaria

Este análisis evalúa la dimensión monetaria del balance energético: las entradas de energía representan “egresos” (o costos) monetarios y las salidas “ingresos” (o beneficios). Los egresos constituyen costos de raleo y transporte de biomasa hasta el centro de consumo, y los ingresos el dinero que se obtendría al comercializarla en formato de leña. El análisis supone matorrales maduros donde los ingresos y egresos ocurren en un único momento del tiempo (esto es, se ralea, transporta y vende). En este sentido, no representa una evaluación clásica de un proyecto forestal, con flujos de caja a lo largo de la duración del mismo.

Para contabilizar los egresos por el raleo y el transporte, se consideró un sistema en tres etapas: a) extracción de la biomasa, con dos operarios (motosierrista y ayudante) trabajando en simultáneo en las actividades de corte, bajado y acanchado de la leña; b) carga y descarga del camión, con dos operarios realizando estas tareas en simultáneo; y c) transporte de la biomasa hasta los centros de consumo establecidos. Los egresos (EG) son el resultado de la suma de los costos asociados a estas tres etapas, costo de raleo (CR), costo de carga y descarga (CC), y costo de transporte (CT). Lo anterior se puede expresar como:

$$EG_i = CR_i + CC_i + CT_i$$

siendo,

$$CR_i = Ve_i * \left[\frac{1}{r} * (P_m + P_a) + C_{cm} * P_{cm} + C_{ac} * P_{ac} \right]$$

$$CC_i = \left(\frac{Ve_i}{v} * P_a \right) * 4$$

$$CT_i = d_i * P_f * c_i$$

donde, Ve_i es el volumen estéreo del residuo forestal de la celda i en $m^3 \text{ ha}^{-1}$; r el rendimiento del personal para las actividades de raleo en $m^3 \text{ hr}^{-1}$; P_m y P_a representan el precio de la hora de trabajo del motosierrista y el ayudante respectivamente, en $\$ \text{ hr}^{-1}$; C_{cm} y C_{ac} son el consumo de mezcla de motosierra y aceite por m^3 , respectivamente; P_{cm} y P_{ac} el precio de la mezcla de motosierra y del aceite respectivamente en pesos (\$) l^{-1} ; d_i la distancia desde la celda i al centro de consumo más cercano en km; P_f el precio del flete en $\$ \text{ km}^{-1}$; v la velocidad de carga y descarga del camión en $m^3 \text{ h}^{-1}$; y c_i los camiones necesarios para transportar la biomasa (número ha^{-1}).

En el caso de los ingresos, se utilizó el valor de mercado de la leña de especies nativas que le pagaría un usuario final al ente forestal que realice el aprovechamiento. Si bien la Ley 26.331 otorga subsidios para este tipo de proyectos, el impacto financiero en la alternativa analizada es mínimo (Goldenberg et al. 2018), por lo que no se tuvieron en cuenta en el análisis. De esta forma, los ingresos que se obtendrían en una celda (I_i) fueron calculados como:

$$I_i = Ve_i * P_l$$

donde, P_l es el precio de mercado de la leña en \$ m³.

Finalmente, se realizó la evaluación monetaria de cada celda de 25 ha (EM_i)

$$EM_i = (I_i - EG_i) * 25$$

y se generó el mapa asociado. Los valores utilizados para la obtención de este mapa se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores y fuentes utilizados para estimar los ingresos y egresos provenientes del aprovechamiento de la biomasa forestal.

VARIABLES	Tipo	Valor	Unidad	Fuente
Precio dólar	-	38,63	\$	www.dolarhoy.com (ago-18)
Precio leña	Ingreso	1300	\$ m ³	Averiguación personal (ago-18)
Consumo mezcla motosierra	Egreso	0,8	l m ⁻³	Experimento Foyel
Precio mezcla motosierra	Egreso	28,99	\$ l ⁻¹	Averiguación personal (ago-18)
Consumo aceite cadena	Egreso	0,33	l m ⁻³	Experimento Foyel
Precio aceite cadena	Egreso	255	\$ l ⁻¹	Averiguación personal (ago-18)
Rendimiento de personal	Egreso	0,47	m ³ h ⁻¹	Experimento Foyel
Motosierrista	Egreso	149,7 0	\$ h ⁻¹	Delvalle 2012 (valor actualizado a 2018)
Ayudante	Egreso	134,2 9	\$ h ⁻¹	Delvalle 2012 (valor actualizado a 2018)
Capacidad del camión	Egreso	10	m ³	Averiguación personal (ago-18)
Precio flete	Egreso	45	\$ km ⁻¹	Averiguación personal (ago-18)
Velocidad de carga y descarga	Egreso	15,5	m ³ h ⁻¹	Turc y Mazzucco 1998

RESULTADOS

Caracterización energética

El radial fue la especie que presentó mayor humedad al momento de corte (aproximadamente 96% en fuste y 100% en rama), mientras que los valores más bajos se observaron en el retamo (75% en fuste y en rama) (Tabla 4, Figura 5). No se observó interacción entre la especie y la parte arbórea en la humedad de las maderas (valor $p > 0,05$) (Tabla 5, Figura 8) y por lo tanto sus efectos pueden analizarse de manera

independiente. La humedad del material difirió entre especies (Figura 8), pero no varió entre fuste y rama (Tabla 5). El comportamiento fue similar para las especies, excepto en el caso del notro, donde la humedad en rama fue menor que en fuste (Figura 8). Sólo se detectaron diferencias entre la humedad del radial y el retamo (Figura 7), que como se mencionó anteriormente, fueron las especies que mayor y menor humedad presentaron respectivamente.

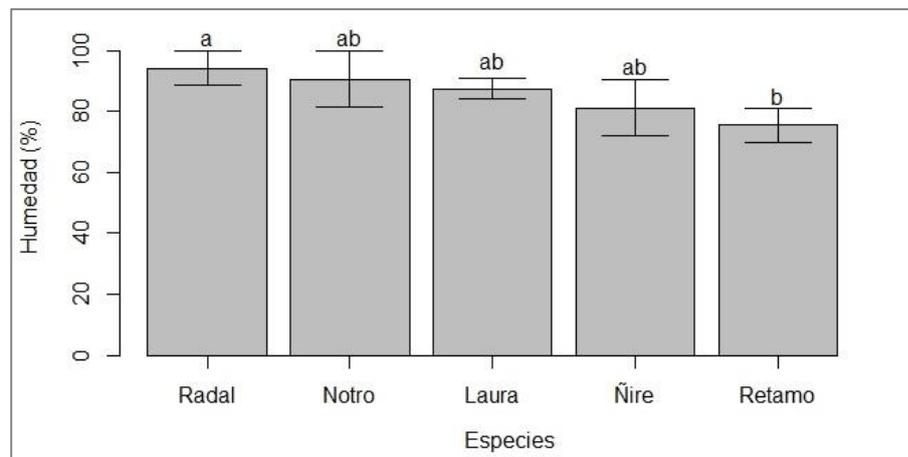


Figura 7: Comparación de la humedad de la madera entre las especies evaluadas. Las barras indican el desvío estándar de los datos. Las letras muestran diferencias de medias de acuerdo al test de comparaciones múltiples de Tukey, utilizando un alfa global de 0,05.

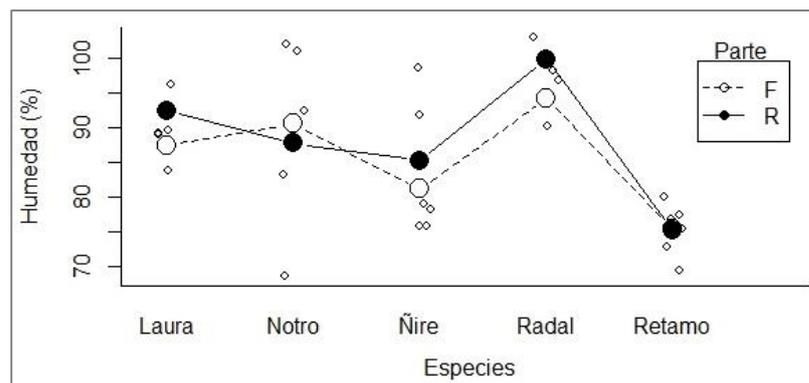


Figura 8: Variación de la humedad de la madera de acuerdo a la especie y parte arbórea (F: fuste; R: rama). Los puntos de mayor tamaño corresponden al valor predicho por el modelo estadístico.

En cuanto a la densidad básica, se observó un efecto de interacción (valor $p < 0,05$) (Tabla 5), lo cual implica que el efecto de la especie varió según el componente

arbóreo (Figura 10). El ñire presentó la mayor densidad tanto en fuste como en rama (564,6 kg m⁻³ y 522,6 kg m⁻³ respectivamente), mientras que el valor más bajo en fuste se observó en el notro (446,2 kg m⁻³) y en rama en el radal (453,0 kg m⁻³) (Tabla 4, Figura 9). Excepto en el notro, las ramas resultaron ser menos densas que los fustes (Figura 10).

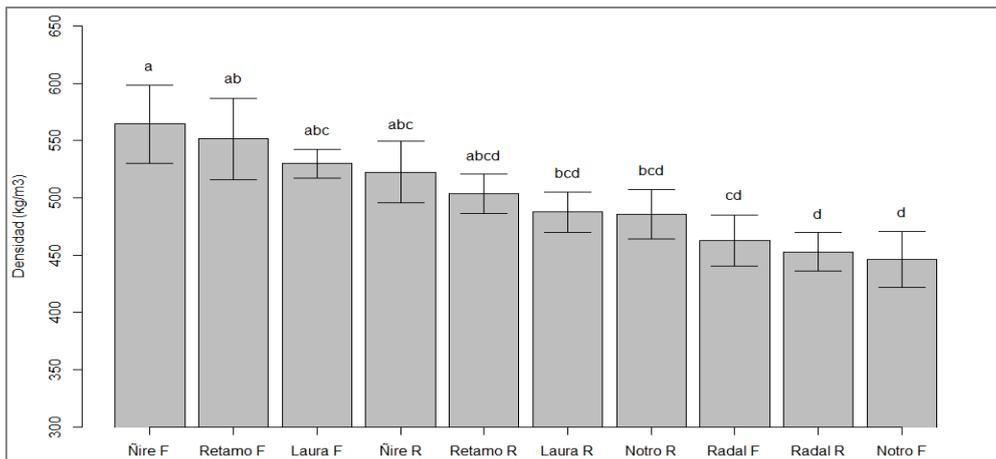


Figura 9: Comparación de la densidad básica entre las especies evaluadas, discriminada por parte arbórea. En el eje x se muestran las especies con la parte arbórea correspondiente (F: fuste; R: rama). Las barras indican el desvío estándar de los datos. Las letras indican diferencias de medias de acuerdo al test de comparaciones múltiples de Tukey, utilizando un alfa global de 0,05.

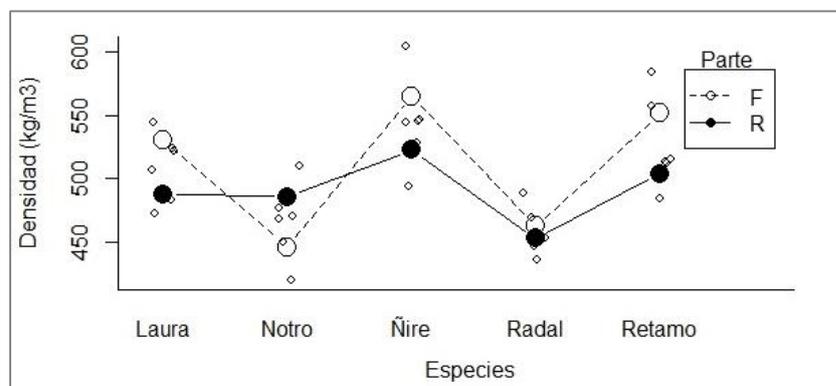


Figura 10: Variación de la densidad básica de la madera de acuerdo a la especie y parte arbórea (F: fuste; R: rama). Los puntos de mayor tamaño corresponden al valor predicho por el modelo estadístico.

El notro resultó la especie que presentó menor contenido de cenizas (0,2%), mientras que la laura fue la especie con el valor más alto (2,1%), casi 10 veces por encima del primero (Tabla 4). Esta diferencia, implicó que el contenido de cenizas difiriera entre especies (Tabla 5, Figura 11).

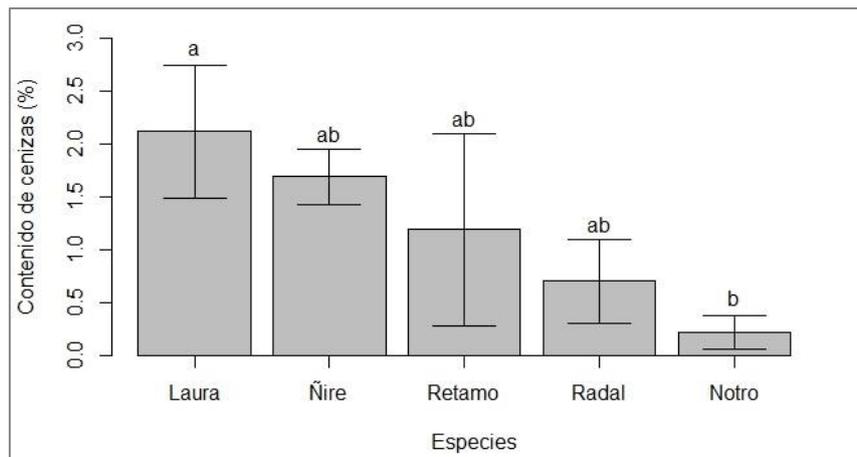


Figura 11: Comparación del contenido de cenizas entre las especies evaluadas. Las barras indican el desvío estándar de los datos. Las letras indican diferencias de medias de acuerdo al test de comparaciones múltiples de Tukey, utilizando un alfa global de 0,05.

El PCS varió entre todas las especies (Tabla 5, Figura 12) con valores entre 4123 kcal kg⁻¹ en el retamo y casi 4673 kcal kg⁻¹ en el radal (Tabla 4).

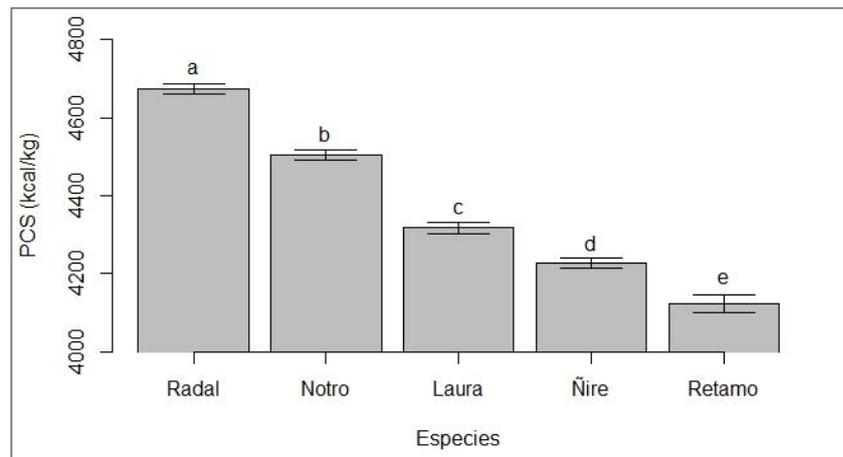


Figura 12: Comparación del poder calorífico superior (PCS) entre las especies estudiadas. Las barras indican el desvío estándar de los datos. Las letras indican diferencias de medias de acuerdo al test de comparaciones múltiples de Tukey, utilizando un alfa global de 0,05.

Las especies también difirieron en cuanto a su IVC (Tabla 5, Figura 13). El IVC más alto fue de aproximadamente 7000 y correspondió al notro, por otro lado, el valor más bajo lo obtuvo la laura con un valor cercano a 500 (Tabla 4).

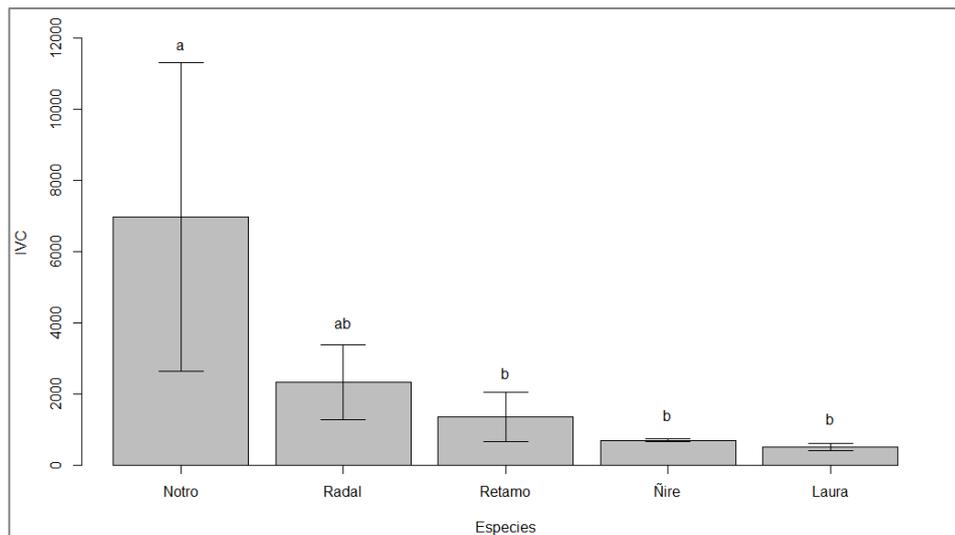


Figura 13: Comparación del índice del valor del combustible (IVC) entre las especies estudiadas. Las barras indican el desvío estándar de los datos. Las letras indican diferencias de medias de acuerdo al test de comparaciones múltiples de Tukey, utilizando un alfa global de 0,05.

Cuando el PCI fue expresado por unidad de peso, el 63% de su variabilidad fue explicada por una relación lineal con la densidad de las maderas. En particular, éste disminuyó casi tres unidades por kg m^{-3} de aumento en la densidad (Figura 14). Sin embargo, el PCI aumentó linealmente con la densidad cuando fue evaluado por unidad de volumen (Figura 15), en este caso con un 85% de la variabilidad explicada por el modelo. En particular, se estimó un incremento de aproximadamente 2616 kcal m^{-3} por cada kg m^{-3} de aumento en la densidad de la madera.

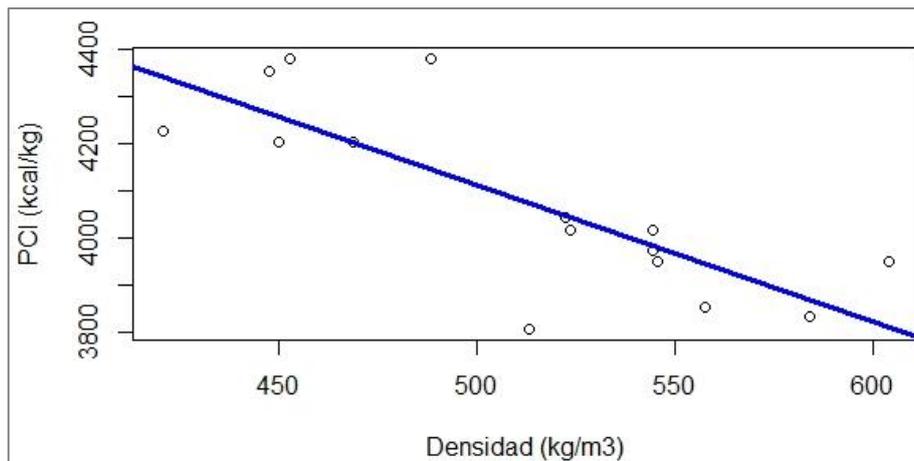


Figura 14: Relación ente el poder calorífico inferior (PCI), expresado por unidad de peso y la densidad de las maderas de las especies del matorral del norte de Patagonia. La recta representa el modelo ajustado, de acuerdo a la ecuación de regresión: $y = -2,9 x + 5565,3$ ($r^2 = 0,6371$).

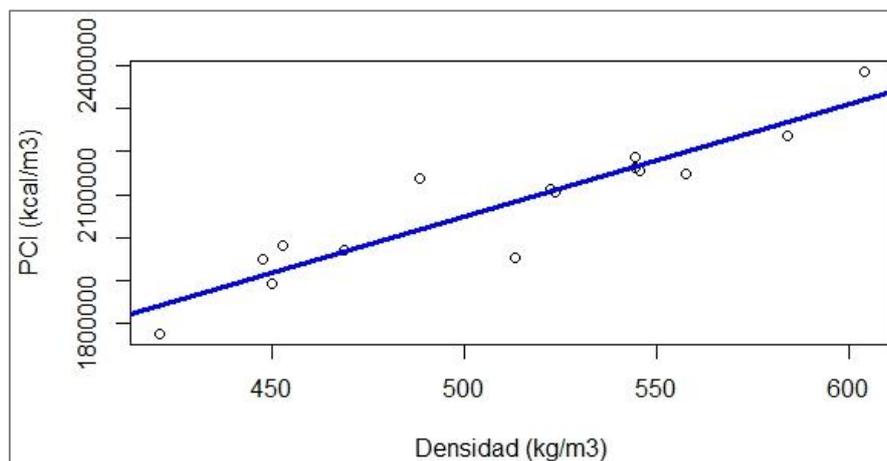


Figura 15: Relación ente el poder calorífico inferior (PCI), expresado por unidad de volumen y la densidad de las maderas de las especies del matorral del norte de Patagonia. La recta representa el modelo ajustado, de acuerdo a la ecuación de regresión: $y = 2616,4 x + 739818$ ($r^2 = 0,8523$).

La Tabla 4 presenta, para cada propiedad, las medias de cada especie estimadas por los modelos ajustados, junto con la bondad de ajuste (r^2) de los mismos. La Tabla 5 muestra el análisis de varianza (ANOVA) de cada modelo.

Tabla 4: Medias de cada propiedad para las distintas especies (\pm desvío estándar) y parte del árbol, estimadas de acuerdo al modelo ajustado en cada caso, con su correspondiente bondad de ajuste (coeficiente de determinación r^2). PCS: poder calorífico superior; IVC: índice del valor del combustible. En el caso del PCI el desvío estándar fue estimado incluyendo la incertidumbre debida al H (Solórzano 2017). De acuerdo a una propagación multiplicativa del error.

Especie	Humedad (%)		Densidad (kg m ⁻³)		PCS (kcal kg ⁻¹)	PCI (kcal kg ⁻¹)	Contenido de Cenizas (%)	IVC
	Fuste	Rama	Fuste	Rama				
Laura	87,4 \pm 3,1	92,4 \pm 3,5	530,1 \pm 12,5	487,8 \pm 17,5	4317,33 \pm 14,5	4025,3 \pm 14,8	2,12 \pm 0,6	506,1 \pm 105,5
Notro	90,5 \pm 9,2	87,7 \pm 17,2	446,2 \pm 24,2	485,7 \pm 21,3	4503,3 \pm 12,7	4211,3 \pm 13,0	0,22 \pm 0,2	4958,2 \pm 4339,3
Ñire	81,2 \pm 9,2	85,3 \pm 11,5	564,6 \pm 34,1	522,6 \pm 26,8	4226,3 \pm 13,6	3957,3 \pm 13,6	1,7 \pm 0,3	691,6 \pm 33,4
Radal	94,2 \pm 5,8	99,8 \pm 4,4	462,7 \pm 22,2	453,02 \pm 16,6	4673,7 \pm 14,4	4372,6 \pm 14,4	0,7 \pm 0,4	2329,1 \pm 1049,1
Retamo	75,4 \pm 5,5	75,2 \pm 2,3	551,5 \pm 35,7	503,9 \pm 17,3	4123,0 \pm 23,5	3831,0 \pm 23,8	1,2 \pm 0,9	1341,7 \pm 696,4
r^2	0,519		0,7981		0,9955		0,694	0,6763

Tabla 5: Análisis de varianza (ANOVA) para cada propiedad evaluada en la caracterización energética de las maderas (la humedad y la densidad incluyeron como fuente de variabilidad la componente del árbol -rama y fuste- y la interacción con la especie). g.l.: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; CM: cuadrado medio; F: estadístico de prueba; Valor-p: valor de probabilidad.

Propiedad	Fuente de variabilidad	g. l.	SC	CM	F	Valor-p
Humedad	Especie (E)	4	1368,2	342,1	4,5	0,01073
	Parte del árbol (P)	1	31,6	31,6	0,4	0,52698
	Interacción E*P	4	76,4	19,1	0,2	0,90516
Densidad	Especie (E)	4	34075	8518,8	14,9	8,67x10 ⁻⁰³
	Parte del árbol (P)	1	3134	3134,1	5,5	0,02987
	Interacción E*P	4	8092	2022,9	3,5	0,02462
Cenizas	Especie (E)	4	6,8	1,7	5,7	0,01193
PCS	Especie (E)	4	583218	145805	553,8	1,10x10 ⁻⁰⁸
IVC	Especie (E)	4	853613	21340242	5,2	0,01557

Cartografía: oferta potencial de residuos forestales, balance energético y evaluación monetaria

Oferta potencial de residuos forestales

En la Figura 16 se muestra el mapa de oferta potencial de residuos forestales. De verde claro a verde oscuro, se diferencian las zonas que ofrecen menor a mayor cantidad

de residuos, respectivamente, luego de la aplicación de un raleo bajo las condiciones planteadas en la sección “Materiales y métodos”.

Balance energético

La Figura 17 muestra el mapa de balance energético, en el que se puede observar dónde este balance resultó más, y menos eficiente. El mapa indica que el balance fue positivo para toda la distribución del matorral. Es decir, bajo los supuestos del análisis, el residuo forestal producto de un raleo de intensidad media en cualquier matorral de la provincia de Río Negro generaría más energía de la que se necesita invertir para su extracción y transporte hasta Bariloche o El Bolsón. Las mayores diferencias entre las salidas y entradas de energía se encontraron en los matorrales de ladera sur, y las menores en los de fondo de valle. Así, donde el balance fue más favorable (esto es, los matorrales de ladera sur más cercanos a los centros de consumo), la energía contenida en los residuos forestales de una hectárea de matorral superó en más de 800 GJ la de los combustibles empleados en su aprovechamiento y en casi 70 GJ donde fue menos favorable (matorrales de fondos de valles alejados del consumo).

Evaluación monetaria

La evaluación monetaria también fue positiva en toda el área de distribución del matorral (Figura 18). Los resultados mostraron que en matorrales de ladera sur cercanos a los centros de consumo las ganancias serían cercanas a los 90000 \$ ha⁻¹ (2329 USD ha⁻¹) por comercializar el residuo forestal como leña. Los matorrales menos rentables fueron los ubicados en fondos de valle, con rentabilidades cercanas a los 1000 \$ ha⁻¹ (26 USD ha⁻¹). Además de que resultaron los más rentables, los matorrales de ladera sur presentaron mayor variabilidad en el balance monetario, con un rango de casi 79000 \$ ha⁻¹ (2045 USD ha⁻¹).

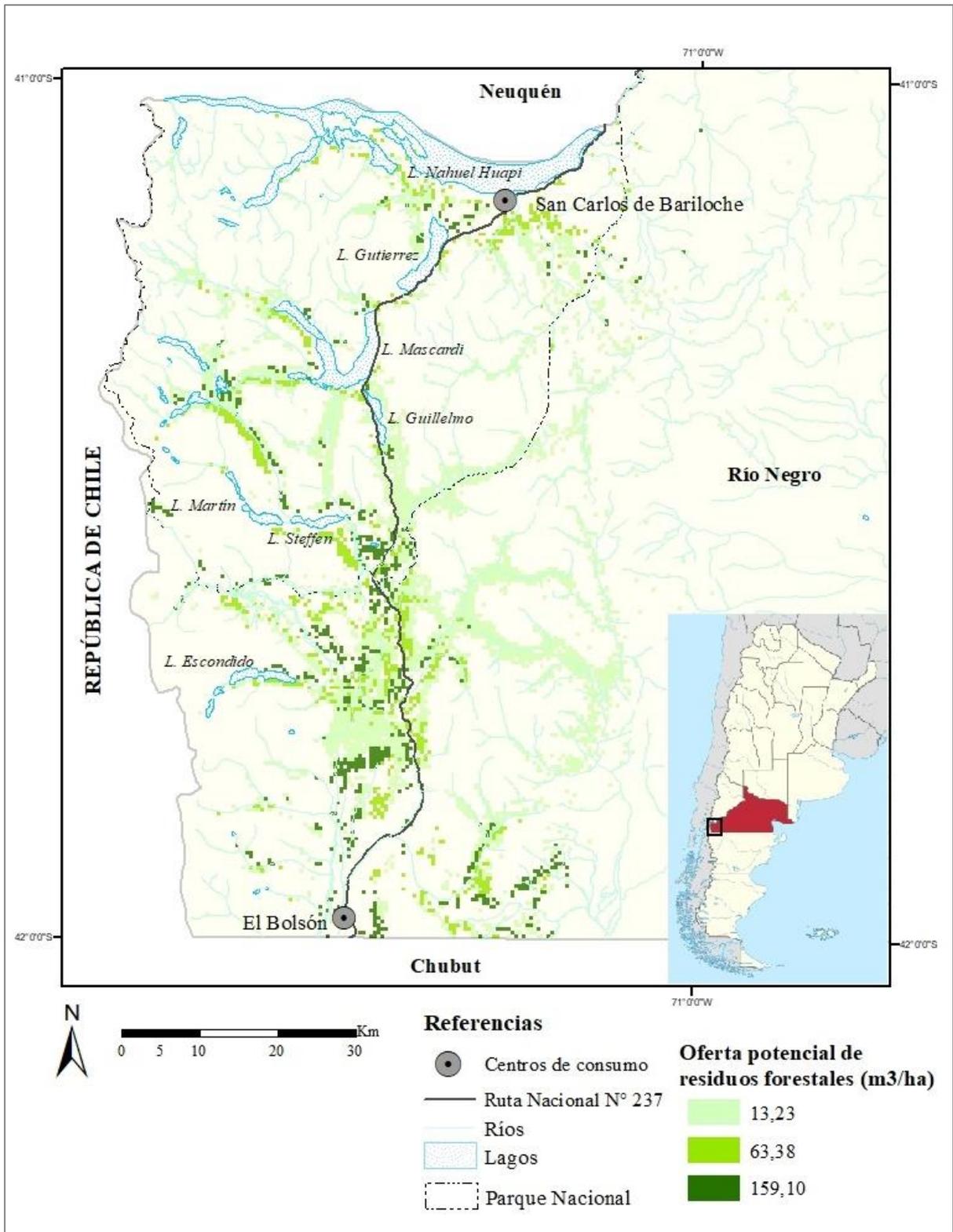


Figura 16: Mapa de oferta potencial de residuos forestales del matorral norpatagónico de la provincia de Río Negro. Cada celda (pixel) equivale a 25 ha.

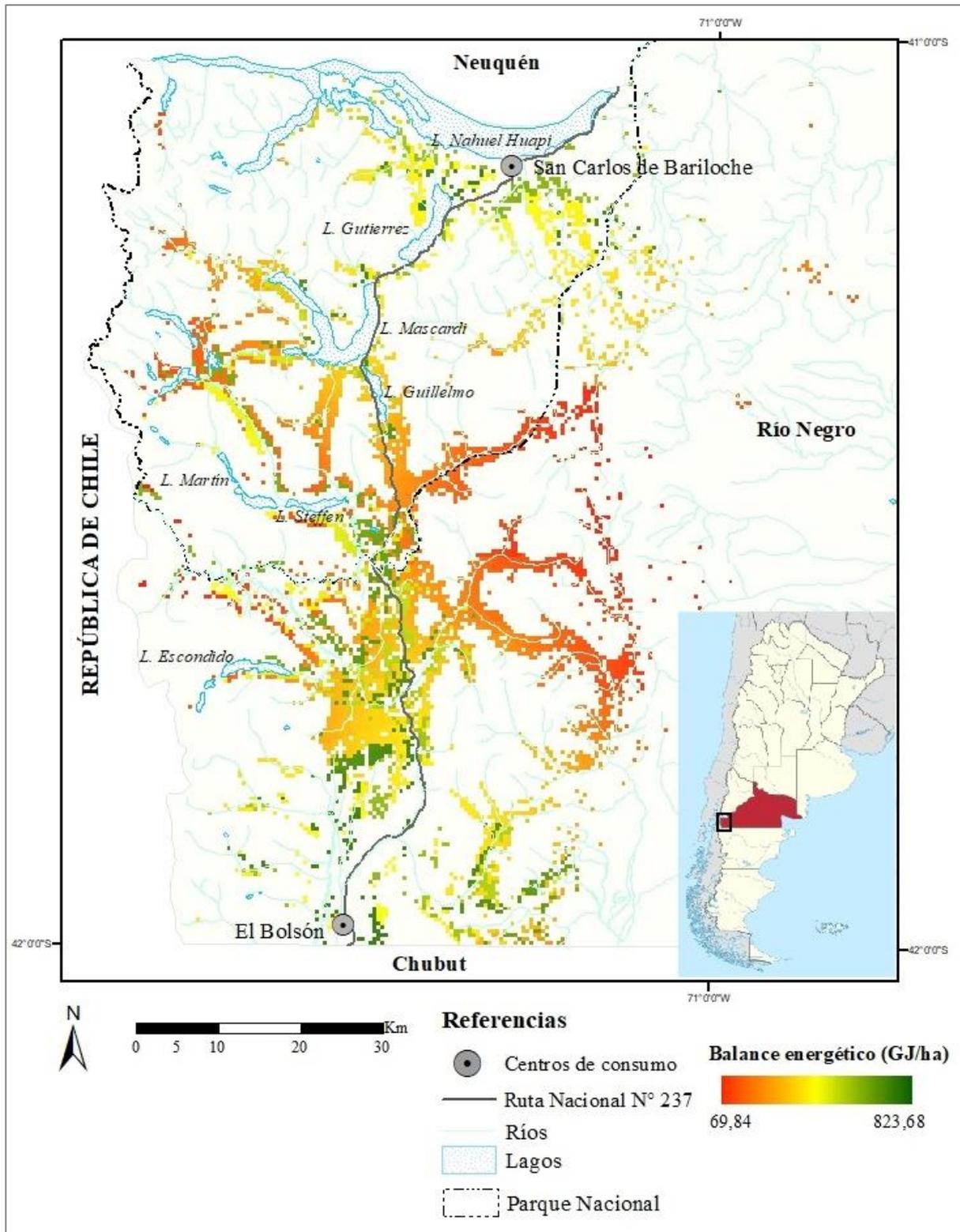


Figura 17: Mapa de balance energético del aprovechamiento de la biomasa residual del matorral norpatagónico de la provincia de Río Negro. Cada celda (pixel) equivale a 25 ha.

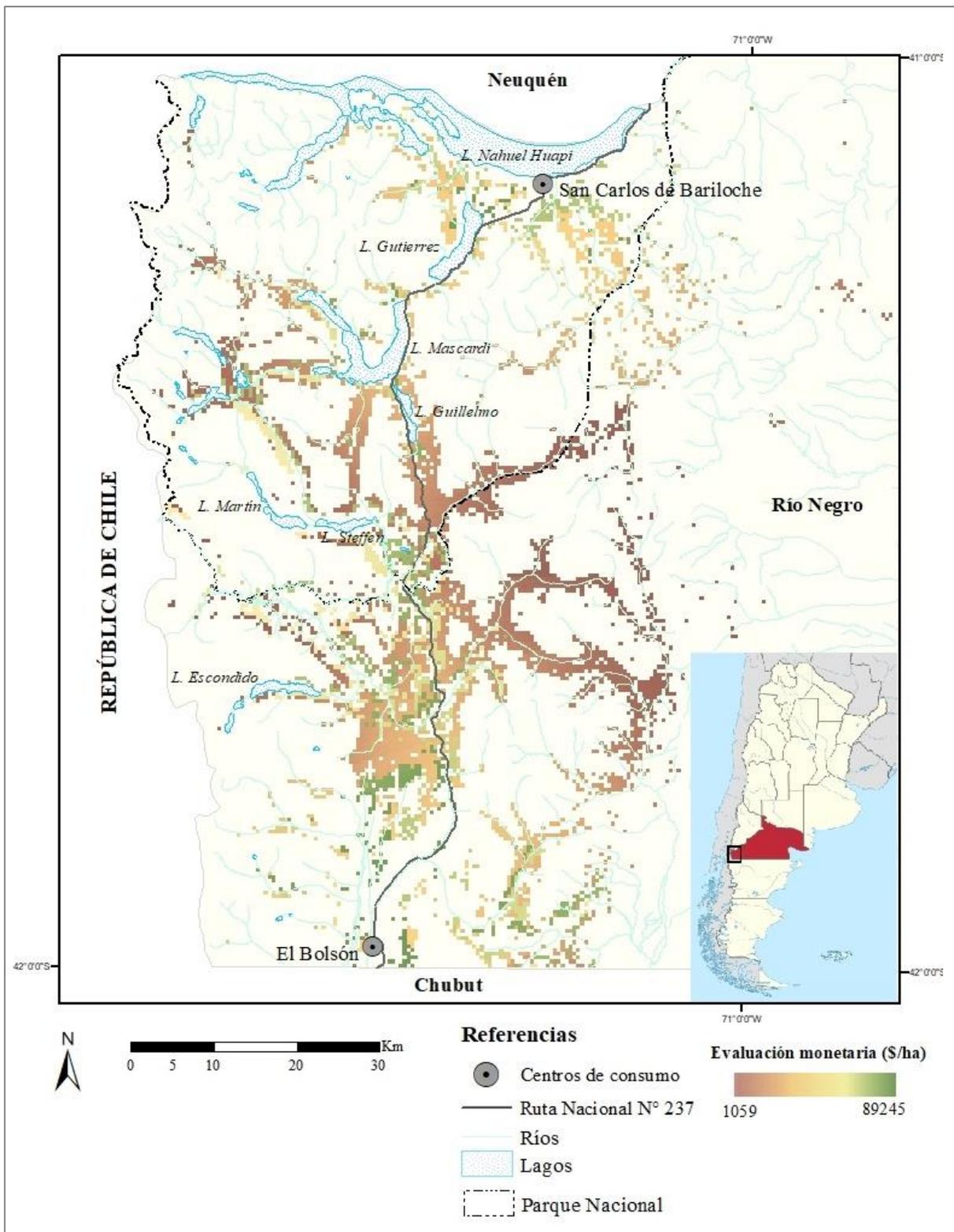


Figura 18: Mapa de balance de rentabilidad financiera del aprovechamiento de biomasa residual del matorral norpatagónico de la provincia de Río Negro. Cada celda (pixel) equivale a 25 ha.

DISCUSIÓN

Caracterización energética

La humedad es un parámetro clave para la eficiencia energética de los combustibles leñosos (Expósito-González 2015). Es la variable que más influye sobre el poder calorífico debido a que parte de la energía de la combustión es utilizada para evaporar el agua que contiene el material (Expósito-González 2015). En el caso de la leña, para que la combustión sea eficiente el contenido de humedad no debe superar el 30% (FOCER 2002). Se conoce que recién cortada posee un contenido variable, entre 60% y 130% (Ministerio de Energía 2014). Considerando este rango, las especies del matorral mostraron niveles intermedios, con un 80% de humedad en promedio, por lo tanto, las maderas analizadas deberían perder aproximadamente el 50% de su humedad antes de ser utilizadas. En efecto, los valores de humedad observados indican que al momento del corte casi la mitad del peso de la madera es agua. Sin embargo, no es posible inferir el tiempo que tardará en secarse sólo conociendo la humedad cuando es cortada, ya que el mismo depende de las condiciones climáticas (temperatura media y humedad ambiente), y de almacenamiento (ordenamiento de la leña y protección), además de la especie (fisiología, anatomía del leño) (Ministerio de Energía 2014). Si el tiempo de estivado es menor al requerido, la leña se utilizará húmeda, la combustión será poco eficiente y se necesitará más leña para lograr igual energía. No obstante, muchas veces los usuarios utilizan leña seca en combinación con leña verde para retardar el consumo del material y así lograr que los ambientes sean calefaccionados por más tiempo (Cardoso et al. 2015), aunque ello es a costa de obtener un rendimiento energético menor. Respecto al ajuste del modelo, el coeficiente de determinación es relativamente bajo (Tabla 4). Probablemente, esto se relacione a la alta variabilidad de la humedad, sumado a que la interacción entre fuste y ramas no es significativa, lo cual quita grados de libertad sin reducir el error residual (Tabla 5).

La densidad de la madera es otro de los parámetros de importancia, en este caso relacionado con la cantidad masa/energía contenida en el leño (Ordóñez-Díaz et al. 2015). El ñire fue la especie que presentó mayor densidad tanto en fuste como en rama, aunque la del fuste fue menor a la reportada en la bibliografía (Solórzano 2017). Esta diferencia puede deberse a que Solórzano (2017) consideró individuos de gran porte provenientes de formaciones boscosas, y no de matorrales, como en este trabajo. Las demás maderas analizadas tuvieron valores de densidad dentro del rango de lo informado para especies leñosas nativas de la región (Carmona-Cerda y Álvaro-Urzúa 2013). En general, las ramas resultaron ser menos densas que los fustes, salvo para el notro. Que la madera sea más densa implica que sus brasas se mantendrán encendidas por un tiempo prolongado, aumentando el tiempo de calefacción de una vivienda (Abbot y Lowore 1999). En este sentido, el aprovechamiento del fuste principal sería más conveniente que las ramas. De todas maneras, las ramas contribuyen a aumentar el volumen de biomasa en el suelo, por lo que su utilización conllevaría a un manejo más sustentable al necesitar intervenir menos superficie para obtener el mismo volumen.

En el caso de las cenizas, estas tienen relevancia tecnológica ya que perturban el proceso de combustión e implican mayores esfuerzos en el mantenimiento de estufas y calderas. Además, dependiendo del comportamiento de las cenizas, pueden causar deterioro en los equipos por formación de escoria, riesgo que aumenta cuando la temperatura de fusión es baja (Orduña 2016). El contenido de cenizas estuvo por debajo del 2% para todas las maderas, excepto en laura y su madera sería la menos recomendada para ser utilizada como material dendroenergético bajo este parámetro. Los valores reportados en la bibliografía para ñire y radial son de 1,3 y 0,5, respectivamente (Solórzano 2017, Carmona-Cerda y Álvaro-Urzúa 2013), ambos menores a los obtenidos. Sin embargo, a diferencia de este trabajo, estos valores se refieren a la madera de las especies sin considerar la corteza, la cual aporta un mayor contenido de cenizas y usualmente es utilizada con el leño. No obstante, todos los valores son bajos en comparación con los biocombustibles agrícolas (Feijóo 2015).

El parámetro mediante el cual se cuantifica la energía contenida en la masa leñosa es el poder calorífico (Álvarez-Rodríguez et al. 2013). Los PCS de las maderas analizadas

están dentro del rango observado en otras especies leñosas nativas como la lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp & Endl.) Krasser), el ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Florin et Boutelje) y el coihue (*Nothofagus domeyi* (Mirb.) Oerst) (Solórzano 2017). Además, las maderas analizadas, doblan en PCS a los arbustos nativos de la estepa patagónica, que son utilizados comúnmente como combustibles como el michay (*Berberis microphylla*), el alpataco (*Prosopis denudans*) y el molle colorado (*Schinus johnstonii*) (Cardoso et al. 2015). De las especies analizadas sólo se encontró en la bibliografía el PCS del ñire (Solórzano 2017), siendo similar al obtenido en este trabajo. Por lo tanto, los valores reportados en este trabajo para el resto de las maderas constituyen una referencia para nuevos estudios. Otro aspecto novedoso fue lo observado respecto a la relación entre el poder calorífico y la densidad de las especies. Los resultados indican que las maderas más densas ofrecen menos energía por unidad de masa, con lo cual sus leños estarían formados por componentes de menor poder calorífico. Esta relación aún no ha sido explorada y abre interesantes preguntas ecológicas y fisiológicas que podrían tener implicancias de aplicación dendroenergética.

La combinación de los anteriores parámetros (humedad, densidad, cenizas, PCS) resultan en el IVC. Este índice permite comparar los combustibles leñosos de acuerdo a las propiedades energéticas más importantes (Chetri y Sharma 2009), sin embargo, no es comúnmente utilizado y ha sido reportado para pocas especies. El alto valor mostrado por la madera del notro en relación a las demás especies se explica fundamentalmente por su bajo contenido de cenizas. El notro sería entonces la especie del matorral con las mejores propiedades combustibles, de acuerdo a este indicador. En efecto, el IVC del notro resultó más alto que el observado en arbustos nativos de la estepa patagónica que se utilizan comúnmente como combustibles (Cardoso et al. 2015). El resto de las maderas alcanzaron valores similares al de estos arbustos, incluso la laura que fue la especie con más bajo IVC. No obstante, se observó una gran heterogeneidad entre especies en cuanto a la variabilidad del IVC y ello podría deberse a que este parámetro es una función del resto de las variables. Por lo tanto, la variabilidad se amplifica en las especies que tuvieron valores altos de PCI y densidad, pero baja humedad y contenido de cenizas (por ejemplo, el notro, que presentó muy bajo

porcentaje de cenizas), respecto a las que mantuvieron valores bajos o altos en todas las variables.

Cartografía: oferta potencial de residuos forestales, balance energético y evaluación monetaria

Los matorrales de menor generación de residuos por área fueron los ubicados en fondos de valle, con aproximadamente $13 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Tabla 1). Sin embargo, son los matorrales más abundantes, ocupando el 70% de la superficie total del matorral en la provincia de Río Negro, y en total generarían algo más de 1200000 m^3 estéreos de leña. Los matorrales de ladera son menos abundantes (17% de ocupación los de exposición norte y 13% los de exposición sur), pero dado que son más productivos (64 m^3 de leña por hectárea en ladera norte y 160 m^3 en ladera sur), en total aportan más residuos, con una oferta regional de leña de 1374000 m^3 proviniendo de matorrales de exposición norte y 2641000 de los de ladera sur. Esto implicaría que si a toda la superficie ocupada por el matorral en Río Negro se le aplicara un raleo de intensidad media se obtendría un total de aproximadamente 5225000 m^3 estéreos de leña. Es importante destacar que estos resultados representan la oferta potencial de residuos forestales por la acción de remover el 50% del área basal de un matorral maduro en un momento de tiempo determinado. Para obtener un flujo temporal de oferta se deberían tener en cuenta, entre otros factores, los ciclos de corte y el incremento medio anual de las especies, pero ello queda fuera del alcance de este trabajo debido a que no se cuenta con información al respecto. Además, dado que este potencial se analizó con el formato tradicional de leña, se consideró como residuos a los fustes y ramas gruesas (mayores o iguales a 1 cm de diámetro), quedando fuera de la cuantificación la biomasa de copa (ramillas y hojas). Estas últimas se podrían dejar *in situ* para beneficio del suelo mediante la incorporación de carbono, reducción de la erosión, y mejora de los procesos biológicos en general (Gargaglione et al. 2013). Si se analizaran otras alternativas dendroenergéticas tales como el chip, la cantidad de residuos que podría ser aprovechado aumentaría, y de esta forma la oferta potencial sería considerablemente mayor debido a que este formato incluye la biomasa de copa. Sin embargo, se recomienda que el material de la copa de los árboles se deje en el lugar para

evitar una exportación importante de nutrientes. Esto es debido a que, a pesar de representar una ínfima proporción de biomasa, las hojas contienen la mayor parte de los nutrientes del árbol (Gargaglione et al. 2013). Por otro lado, la cuantificación se realizó considerando los matorrales dentro del Parque Nacional Nahuel Huapi, sin embargo, la extracción de leña no está permitida en gran parte de su extensión. Bajo la jurisdicción del parque los matorrales se encuentran bajo las siguientes clasificaciones de uso: “Zona de uso público extensivo” y “Zona de aprovechamiento de recursos naturales”. Aunque la primera de las clasificaciones no admite el uso extractivo de los recursos naturales (la segunda sí), en la práctica se observa extracción de leña principalmente asociada a la ruta 40 (Administración de Parques Nacionales, 2019).

El potencial energético de los matorrales de fondo de valle sería de 74 GJ ha⁻¹, y los de ladera norte y sur 340 GJ ha⁻¹ y 830 GJ ha⁻¹, respectivamente. Como referencia general, en Chile un bosque de frondosas compuesto por coihue, raulí (*Nothofagus alpina* Poepp. Et Endl. Kaseer) y tepa (*Laureliopsis philippiana* (Looser) Shodde) tiene un potencial energético de 3488 GJ ha⁻¹ (Torres-Álvarez y Peña-Cortés 2011), y un bosque de encinas en el este de España de 1640 GJ ha⁻¹ (Fernández-Puratich y Oliver-Villanueva 2014). Ambas estimaciones no son comparables entre sí dado que en el primer caso los autores han trabajado con el PCS, mientras que, en el segundo, como en este estudio, las estimaciones se basaron en el PCI. Si bien estos valores son mayores a los encontrados en el matorral de Patagonia norte, debido probablemente a que provienen de bosques altos, con árboles de mayor porte que los del matorral, un aspecto clave en la oferta energética es el tiempo en alcanzar el stock de biomasa. Por el contrario, si se compara con el potencial energético de formaciones arbustivas (altura media máxima 150 cm), los valores encontrados son similares e incluso mayores (González-González et al. 2017). Dado que el consumo de energía anual por vivienda en Bariloche es en promedio de 170 GJ (Gonzales et al. 2005), el manejo de toda la superficie del matorral de Río Negro (aproximadamente 130.000 ha) podría abastecer el consumo anual de alrededor de 160 mil viviendas. Ahora bien, esto representa abastecer el consumo (demanda) de un año, con un stock de leña (oferta) generada durante todo el ciclo de vida del matorral (los matorrales analizados regeneraron luego de incendios ocurridos hace 30 a 50 años). Por

otro lado, esta estimación se basa en el PCI y no considera la eficiencia de uso, es decir la energía realmente aprovechable. Actualmente, las estufas más eficientes tienen un rendimiento cercano al 75% (INTI 2014), sin embargo, los artefactos a leña que se emplean para calefacción en Patagonia en su mayoría son de tipo primitivo, con calentamiento directo por llama, lo que los hace poco eficientes (Gonzales et al. 2005), por lo que el abastecimiento se reduciría notablemente. La eficiencia energética de las viviendas es un factor no menos importante que también afecta al cálculo del rendimiento de la biomasa, por lo que es importante que se realicen programas de concientización, asesoramiento y asistencia para la aislación térmica de las viviendas. Además, las estimaciones se realizaron con el PCI de la leña completamente seca, pero si se considera que la leña se usa con una humedad cercana al 30%, el potencial calorífico se reduciría aproximadamente un 68% (Gallegos 2009). En este sentido, es clave utilizar calefactores eficientes y leña con un bajo contenido de humedad. Por otro lado, el PCI utilizado corresponde a leños en buen estado, es decir, sin podredumbres o ataques de insectos, sin embargo, en la práctica, cuando se realicen los raleos, estos individuos no serán descartados para aumentar el volumen de biomasa y por lo tanto la eficiencia del raleo, por lo que el poder calorífico total obtenido será menor.

Si bien el resultado monetario varía espacialmente de acuerdo a la productividad y a la distancia al centro de consumo, uno de los aspectos más interesantes es que, bajo los supuestos de este trabajo, el aprovechamiento del residuo del matorral bajo enriquecimiento forestal sería factible en cualquier sitio de la provincia de Río Negro. Una potencialidad del abordaje espacialmente explícito de este trabajo, la cual es clave para la planificación territorial, es que permite conocer la distancia a la cual la comercialización del residuo dejaría de ser rentable, la cual fue estimada entre los 120 y 130 km. Dado que los matorrales más alejados de los centros de consumo no superan los 112 km en el caso de los de ladera sur, 91 km los de ladera norte, 109 km los ubicados en fondos de valle, la evaluación monetaria mostró valores positivos en toda el área de estudio. De todas maneras, estos valores son aproximados ya que el recorrido desde la celda hasta la ruta (camino secundario) no es en línea recta, como fue considerado, con lo cual la distancia real es mayor. Además, se debe considerar que el algoritmo utilizado

aplica una regla de decisión seleccionando el centro de consumo más cercano a cada celda de matorral, pero en la práctica puede suceder que éste no sea el destino de la leña, con lo cual los rendimientos monetarios (y energéticos) serían diferentes, pudiendo incluso volverse negativos. Una manera de contextualizar estos resultados es compararlos con fuentes de energía convencionales. Por ejemplo, un barril equivalente de petróleo tiene un PCI de 5,7 GJ (Ministerio de Energía 2018) con un costo de extracción de alrededor de \$ 490 (USD 12,7) (Télam 2017). Dado que el barril contiene 159 l, este combustible tiene un costo de extracción de aproximadamente \$ 86 (USD 2,2) por cada GJ. En el caso del residuo forestal, la extracción de 1 GJ costaría alrededor de \$ 132 (USD 3,4), es decir, sería un 53% más costoso. Sin embargo, esta comparación es sobre costos de extracción sin considerar costos de transporte y distribución. Además, en el caso del petróleo, comúnmente los usuarios utilizan combustibles derivados, y por lo tanto habría que considerar también los costos de refinamiento. Se deben tener en cuenta igual otras externalidades negativas, por ejemplo, uno de los problemas más estudiados en la actualidad es la liberación de CO₂ a la atmósfera al quemar los combustibles fósiles (Andrade-Castañeda 2017). Si bien la quema de biomasa boscosa también produce liberaciones de carbono a la atmósfera, las emisiones globales se estiman en 0,5 Gt año⁻¹, en comparación a los 5,2 Gt año⁻¹ de los combustibles fósiles (Rodríguez y Corvalán 2006). Además, entre los grandes problemas ambientales que atentan contra la biodiversidad se encuentran los derrames de petróleo en mares y océanos (Baii y Abreu 2017). El aprovechamiento forestal (con el reemplazo del bosque nativo como caso extremo) también puede afectar negativamente la biodiversidad (Loening 2003). En este sentido es importante destacar que este trabajo evaluó el uso de residuos forestales generados al aplicar un manejo sustentable, con lo cual no habría costos ambientales asociados.

CONCLUSIONES

La madera es un recurso energético renovable, que utilizada racionalmente puede ser un combustible confiable y sostenible, por lo que representa una opción válida como energía alternativa ante la situación energética global. En este trabajo se muestra que las

propiedades energéticas de las maderas de las especies del matorral de Patagonia norte son comparables con las de otras especies leñosas que se utilizan comúnmente como combustibles. La mayor oferta de energía calórica por unidad de masa (PCS) se obtuvo en el radal y el notro, este último además con un bajo contenido de cenizas que incide favorablemente en su aptitud energética (IVC). El ñire, la especie más utilizada como leña en la región, ofreció la mayor energía calórica por unidad de volumen, debido a su elevada densidad. Esto le otorgaría al ñire mayor ventaja como combustible ya que los costos de transporte y almacenaje de la leña son menores para igual cantidad de energía, y es una de las condiciones más importantes para los usuarios.

Los resultados encontrados en este trabajo indican que utilizar como leña el residuo forestal obtenido al implementar raleos de intensidad media sería conveniente en términos energéticos y generaría beneficios monetarios para los productores de la provincia de Río Negro. Dicho ingreso podría servir para solventar los costos de la posterior plantación de especies forestales nativas con el objetivo de agregarle valor al matorral. Además, aplicar raleos selectivos para obtener la materia prima contribuye a mejorar la estructura y sanidad del bosque, potenciando la provisión de sus servicios ambientales.

Este Trabajo Final presenta una primera aproximación espacialmente explícita a la evaluación del potencial dendroenergético que tienen los recursos forestales de Patagonia norte. Como tal, el sistema de estudio ha sido simplificado, incluyendo sólo dos ciudades y una ruta, y asumiendo que la trayectoria desde esta ruta hasta el sitio de oferta es recta y de similar topografía. Futuros estudios deberían llevarse a cabo complejizando el sistema, considerando otras rutas, caminos secundarios, considerando otras intensidades de raleo y tecnologías de aprovechamiento, e incluyendo la dimensión temporal en el análisis (ciclo de vida del matorral y flujo de fondos). Además, actualmente hay otros formatos dendroenergéticos que están tomando relevancia a nivel global. Entre ellos se encuentran las astillas, el pellet y la briqueta, los cuales presentan ventajas sobre la leña debidas a su facilidad de transporte, almacenamiento y manipulación, además de su mayor densidad (en el caso de pellets y briquetas) que les proporciona una mayor energía por unidad de volumen. Si bien en la Patagonia al día de

la fecha estos formatos no están muy difundidos, la factibilidad técnica de producirlos debería ser estudiada.

BIBLIOGRAFÍA

Abbot, P. G. y J. D. Lowore, (1999). Characteristics and management potential of some indigenous firewood species in Malawi. *Forest Ecology and Management* 119 (1): 111-121.

Administración de Parques Nacionales, (2019). Plan de Gestión del Parque Nacional Nahuel Huapi. San Carlos de Bariloche, Argentina.

Álvarez-Rodríguez, A., Pizarro-García C., y M. B. Folgueras-Díaz, (2013). Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo, España.

Anderson, D. R., Sweeney, D. J. y T. A. Williams, (2012) Estadística para administración y economía. 10ª edición. CENGAGE Learning.

Andrade-Castañeda, H. J., Arteaga-Céspedes, C. C. y M. A. Segura-Madriral. Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). *Corpoica Ciencia Tecnología Agropecuaria* 18(1):103-112.

Baii M. H. y A. Guillén J. L. Abreu, (2017). Sustainability and oil. *Daena Journal* 12(3): 42-64.

Cabrera, A., (1971). Fitogeografía de la República Argentina. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 14:1-42.

Canalís, J. R., (2013). Apuntes sobre dendroenergía. *Producción forestal*. Año 3 N.º 5, 10-12.

Cárdenas, G. J., (2011). Matriz energética argentina. Situación actual y posibilidades de

- diversificación. *Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario*. Año C 1514, 32-36.
- Cardoso, M. B., Ladio, A. H., Dutrus, S. M. y M. Lozada, (2015). Preference and calorific value of fuelwood species in rural populations in northwestern Patagonia. *Biomass and Bioenergy* 81: 514-20.
- Carmona Cerda, R. J., (2015). Caracterización física, química y energética de biomasa leñosa como materia prima biocombustible. Universidad de Córdoba. Córdoba, España.
- Carmona-Cerda, R. J. y M. Álvaro-Urzúa, (2013). Caracterización de biomasa leñosa con fines energéticos disponible en Chile. Santiago de Chile, Chile.
- Chettri, N, y E. Sharma, (2009). A scientific assessment of traditional knowledge on firewood and fodder values in Sikkim, India. *Forest Ecology and Management*. 257(10): 2073-78.
- CIEFAP y MAyDS, (2016). Actualización de la Clasificación de Tipos Forestales y Cobertura del Suelo de la Región Bosque Andino Patagónico. Informe Final. Buenos Aires, Argentina.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente, Universidad Católica de Temuco, (2005). Estudio de Secado de Leña y Equivalencias de unidades de comercialización. Temuco, Chile.
- Delvalle, P., Gándara, F., D'Agostini, P., Balbuena, O. y L. A. Monicault, (2012). Tecnología en desarrollo para el manejo silvopastoril en el Chaco húmedo argentino. Ediciones INTA. Chaco, Argentina.
- Expósito-González, S., (2015). Determinación del contenido de humedad en biocombustibles sólidos de origen forestal mediante tecnología microondas. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo. Oviedo, España.

- FAO, (2008). *Bosques y energía. Cuestiones clave*. Buenos Aires, Argentina.
- FAO Departamento Forestal, (2009). Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina. Buenos Aires, Argentina.
- FCAyF-UNLP, (2016). Aprovechamiento Forestal. La Plata, Argentina.
- Feijóo, E. A., Golato, M. A., Colombres, F. J. A., Paz, D. y G. J. Cárdenas, (2015). Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 92(2): 23-32.
- Fernández-Puratich, H., (2012). Valorización integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal en condiciones mediterráneas (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Fernández-Puratich, H. y J. V. Oliver-Villanueva, (2014). Cuantificación de biomasa y valor energético de renovales de *Quercus ilex* en condiciones mediterráneas. *Bosque* 35(1):65-74.
- Francescato, V., Antonini E. y L. Zuccoli-Bergomi, (2008). *Wood Fuels Handbook. Production, quality requirements, trading*. AEBIOM AIEL. Italian Agriforestry Energy Association.
- FOCER, (2002). *Manuales sobre energía renovable: Biomasa*. Biomass Users Network (BUN-CA). San José, Costa Rica.
- Gallegos, R., (2009). Cuantificación y utilización de los residuos de cosecha forestal, específicamente de tocones de una plantación de *Eucalytus nitens* (Dean et Maiden), para la producción de energía renovable, en la Región de Los Ríos. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Gargaglione, V., Peri, P. L. y G. Rubio, (2013). Partición diferencial de nutrientes en árboles de *Nothofagus antatica* creciendo en un gradiente de calidades de sitio en

- Patagonia Sur. *Bosque* 34(3): 291-302.
- Goche-Télles, J. R., Dominguez-Calleros, P. A., Montiel-Altuna, E. y C. Palacios-Mendoza, (2015). Biocombustibles sólidos, una opción sustentable para la producción de energía. En *Biocombustibles sólidos*, editado por A. Carrillo-Parra y J. G. Rutiaga Quiñones, 187. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Goldenberg, M. G., (2014). Alternativas de manejo y plantación forestal en bosques de matorral alto en Río Negro (Tesis de grado). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- Goldenberg, M. G., Gowda, J. H., Casas, C. y L. A. Garibaldi, (2018). Efecto de la tasa de descuento sobre la priorización de alternativas de manejo del matorral Norpatagónico argentino. *Bosque* 39(2): 217-226.
- González, A. D., Gortari, S. y E. Crivelli, (2005). Uso racional de energía y conservación de bosques en la Patagonia andina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 9 2005, 07.01-07.06.
- González- González, B. D., Sixto, H., Alberdi, I., Esteban, L., Guerrero, S., Pasalodos, M., Vázquez, A., e I. Cañellas, (2017). Estimation of shrub biomass availability along two geographical transects in the Iberian Peninsula for energy purposes. *Biomass and Bioenergy* 105(2017): 211-218.
- Gutiérrez Rodríguez, E., Moreno Orjuela, R. D. y N. Villota Echeverry, (2013). Guía de cubicación de madera. Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
- Gyenge, J., Fernández M. E., Sarasolaa, M., Urquiza, M., y T. Schlichter, (2009). Ecuaciones para la estimación de biomasa aérea y volumen de fuste de algunas especies leñosas nativas en el valle del río Foyel, NO de la Patagonia argentina. *Bosque* 30(2): 95-101.

- Hilbert, J. A., (2013). Bioenergía y el sector forestal. *Producción Forestal* 3(5): 1-44.
- Iezzi, M., (2017) ¿Por qué renovables en Argentina? Energías renovables en Argentina, oportunidades en un nuevo contexto de negocios. *Informes pwc*.
- Lerna, A. V., (2015). Planificación, logística y valorización de biomasa forestal residual en la provincia de Valencia (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Loening, L. J. y M. Markussen, (2003). Pobreza, deforestación y sus eventuales implicaciones para la biodiversidad en Guatemala. *Economía, Sociedad y Territorio* 4(14) 279-315.
- Loguercio, G. A., Jovanovski, A. y J. Molina, (2008). Residuos de biomasa de forestaciones y aserraderos de la región andina de las provincias de Neuquén y Chubut. Evaluación preliminar de oferta.
- Marcos F. y S. Villegas, (2000). Nueva fórmula para la determinación del poder calorífico en función de la humedad. Universidad Politécnica de Madrid.
- Martín, M. F., (2006). Generación de energía eléctrica con biomasa a medio y largo plazo. *Anales de Mecánica y Electricidad*. 83(1): 22-27.
- Ministerio de Energía, (2014). Guía práctica para el buen uso de la leña. Leña Seca- Leña eficiente. Santiago de Chile, Chile.
- Ministerio de Energía, Presidencia de la Nación, (2018). Tabla de conversiones energéticas. Disponible en: <http://www.energia.gob.ar> (Fecha de consulta: 1/12/2018)
- Mirazón, E., (2017). Un nuevo comienzo. Energías renovables en Argentina, oportunidades en un nuevo contexto de negocios. *Informes Pwc*.

- Monteoliva, S., Baroto, A. J., Alarcón, P., Tesón, N. y M. E. Fernández, (2017). Densidad de la madera como variable integradora de la anatomía del leño: análisis de rama y fuste en cuatro especies de *Eucaliptus*. *Revista de la Facultad de Agronomía* 116(1): 1- 11. La Plata, Argentina.
- Nacif, M. E., Kitzberger, T. y L. A. Garibaldi, (2016). Efecto del manejo de bosque y de los cambios ambientales sobre la supervivencia y crecimiento de especies nativas de interés forestal. *V Jornadas Forestales Patagónicas - III Jornadas Forestales de Patagonia Sur - Ecofuego II*.
- Oddi, F.J., Goldenberg, M., Bianchi, L.O. y L.A. Garibaldi, (2016). Mapeo de la rentabilidad del manejo del matorral en Río Negro (Argentina) bajo diferentes escenarios financieros. 1er Congreso Latinoamericano IUFRO de Ecología del Paisaje - 2do Congreso Latinoamericano de IALE. Temuco, Chile. Noviembre de 2016
- Ordóñez-Díaz, J. A. B., Galicia-Naranjo, A., Venegas-Mancera, N. J., Hernández-Tejeda, T., Ordóñez-Díaz, M. J., y R. Dávalos-Sotelo, (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques* 21(Núm. esp.): 77–126.
- Orduña, A. B., (2016). Estimación del potencial energético de la biomasa residual agrícola y analisis de aprovechamiento en los municipios de la Comarca Del Alto Palancia (Trabajo Final de Master). Universidad Jaume I, Castellón de la plena.
- Posada-Henao, J. J. y C. A. González-Calderón, (2013). Consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera- modelos predictivos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 12(23): 35-46.
- Přemyslovská, E., Šlezingerová, J., Rybníček, M., Gryc, V., Vavrčík, H. y L. Praus, (2007). Basic density of wood in different forest type. *Proceedings of International Scientific Conference Bioclimatology and Natural Hazards*. N.º Horáček 1998: 1-4.

- Purohit, A. N, y A. R. Nautiyal, (1987). Fuelwood value index of indian mountain tree species. *International Tree Crops Journal* 4:2-3, 177-182.
- Reque, J., Sarasola, M., Gyenge, J. y M. E. Fernández, (2007). Caracterización silvícola de ñirantales del norte de la Patagonia para la gestión forestal sostenible. *Bosque* 28(1): 33-45.
- Riegelhaupt, E. y T. Arias-Chalico, (2009). Oportunidades y desafíos para la producción de biocombustibles en América Latina.
- Rodríguez, M. y P. Corvalán, (2006). Consideraciones económicas en el uso de la biomasa como fuente de energía. *Serie Ciencias Agronómicas* N° 11: 165-173
- R Development Core Team, 2000. Introducción a R. Notas sobre R: Un entorno de programación para Análisis de Datos y Gráficos. Versión 1.0.1.
- SAyDS, (2009). Plan forestal regional patagónico.
- Secretaría de Energía, (2008). Energías Renovables - Energía Biomasa.
- Secretaría de energía, REEP y Fundación Bariloche, (2009). Energías Renovables: diagnóstico, barreras y propuestas.
- Solórzano, S. (Ed.), (2017). Herramienta para negocios sustentables en biomasa forestal. Informe Técnico N° 214. Instituto Forestal, Chile.
- Straschnoy, J., Lamas N. y S. Klaus, (2010). Energía, Estado y sociedad. Situación energética argentina 1(14): 76-93.
- Télam, (2017). YPF proyecta alcanzar a fines de 2018 un costo de desarrollo de U\$S10 por barril en Vaca Muerta, similar al de EEUU. Disponible en: <http://www.telam.com.ar> (Fecha de consulta: 15/11/2018)
- Torres-Álvarez O. y F. Peña-Cortés, (2011). Zonificación del potencial energético de la

biomasa residual forestal en la cuenca del lago Ranco, Chile. Antecedentes para la planificación energética regional. *Bosque* 32(1): 77-84.

Turc, C. O. y R. V. Mazzucco, (1998). Caracterización de los sistemas de aprovechamiento forestal utilizados en los montes santiagueños. *Quebracho* N° 6: 59-68.

Verón, S. R. y T. S. Propato, (2015). La matriz energética argentina y su impacto ambiental. *Ciencia hoy*. Vol. 144.

Webster, A. L., (2000). Estadística aplicada a los negocios y la economía. 3ª edición. McGraw-Hill.

Zapata Sánchez, C. E., (2006.) Guía metodológica para la caracterización y evaluación de la calidad de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Medellín, Colombia.