

# Potential of *Pinus radiata* plantations for use of harvest residues in characteristic soils of south-central Chile

Potencial de las plantaciones de *Pinus radiata* para el aprovechamiento de los residuos de cosecha en suelos característicos del centro-sur de Chile

Eduardo Cartes-Rodríguez<sup>1, 2\*</sup>; Rafael Rubilar-Pons<sup>2, 3</sup>; Eduardo Acuña-Carmona<sup>2</sup>; Jorge Cancino-Cancino<sup>2</sup>; Jorge Rodríguez-Toro<sup>2</sup>; Yuri Burgos-Tornería<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Instituto Forestal, sede Biobío. Camino a Coronel km 7.5, San Pedro de la Paz-Chile.

<sup>2</sup>Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales, Victoria núm. 631, Concepción-Chile.

<sup>3</sup>Universidad de Concepción. Cooperativa de Productividad Forestal. Tel.: +56 41 285 32 63.

Email: edcartes@udec.cl (\*Corresponding author).

## Abstract

Given the growing demand for harvest residues for energy generation from *Pinus radiata* forest plantations in south-central Chile, models for estimating site-specific forest residue production are needed. In this study, allometric models were fitted to estimate the potential biomass resulting from the harvest of *P. radiata* plantations located in volcanic sand, recent volcanic ash and sedimentary soils, taking into consideration management gradients and site productivity, in characteristic sites of south-central Chile. The fitted models allowed estimating conversion factors and developing estimation models at individual tree and stand level. Results suggest that conversion factors for changing from stem biomass to potential residue biomass have a negative exponential relationship with tree size. Models fitted for estimating at individual tree level, starting with diameter and height variables, suggest that the models depend on soil origin, while in the case of stand-level estimates the fitted model is independent of soil origin, gradient management and productivity.

**Keywords:** Aboveground biomass, biomass and bioenergy, residues, biomass models, biomass conversion factors.

## Resumen

Dada la demanda creciente sobre los residuos de cosecha para la generación de energía en plantaciones forestales de *Pinus radiata* en la zona centro-sur de Chile, resulta necesario disponer de modelos que permitan la estimación sitio-específico de la producción de residuos. En este estudio se realizó el ajuste de modelos alométricos de estimación de la biomasa potencial de residuos de cosecha para plantaciones de *P. radiata*, en suelos de arenas volcánicas, cenizas volcánicas recientes y sedimentarios, considerando gradientes de manejo y productividad, en sitios característicos del centro-sur de Chile. Los modelos ajustados permitieron la estimación de factores de conversión, y modelos de estimación a nivel de árbol individual y rodal. Los resultados sugieren que los factores de conversión de biomasa fustal a biomasa potencial de residuos tienen una relación exponencial negativa con el tamaño de los individuos. Los modelos ajustados para la estimación a nivel de árbol individual, a partir de las variables diámetro y altura, sugieren que los modelos dependen del origen del suelo, mientras que para el caso de las estimaciones a nivel de rodal, el modelo ajustado resulta independiente del origen del suelo, gradiente de manejo y su productividad.

**Palabras clave:** Biomasa aérea, biomasa y bioenergía, residuos, modelos de biomasa, factores de conversión de biomasa.

## Introduction

The use of forest residues for bioenergy production has gained interest in recent years because it has the potential to generate additional revenue for the forest sector and diversify energy sources (Cambero, Sowlati, Marinescu, & Dominiket, 2015). This biomass can be obtained from the management of forest plantations via pruning and thinning, or through the residues produced during harvesting (Perlack et al., 2005).

A series of studies on *Pinus radiata* D. Don biomass began in the 1960s in Australia, New Zealand and South Africa in order to make estimates of forest productivity and nutrient capture (Baker & Attiwill, 1985; Madgwick, Jackson, & Knight, 1977; van Laar & van Lill, 1978; Will, 1964). Subsequent studies have been conducted to understand the productivity of this species in relation to site resources, partitioning of biomass components and ecophysiological modeling (Cromer, Barr, Williams, & McNaught, 1985; Rodríguez, Hofmann, Espinosa, & Ríos, 2003; Rubilar et al., 2010). However, the use of biomass produced by forest management has certain limitations, highlighted by the inefficiency of the collection methods and the need to quantify both the biomass that would be generated from management of *Pinus spp.* plantations and natural forests, and the degree of contribution to bioenergy generation (Acuña, Espinosa, Cancino, Rubilar, & Muñoz, 2010; Hacker, 2005).

Recent studies in Chile have made estimates of the biomass of harvest residues in *P. radiata* plantations from models fitted with databases from Australia and New Zealand, using growth and yield models as a basis (Corvalán & Hernández, 2011). Similarly, conversion factors for changing stem volume to total aboveground and harvest residue biomass have been used (Bertrán & Morales, 2008).

The aim of this study was to develop models to estimate harvest residue biomass at individual tree and stand level in adult *Pinus radiata* D. Don plantations, in characteristic soils of south-central Chile. The developed models will allow for estimating the energy potential of *P. radiata* plantations in south-central Chile at site-specific level, considering management conditions and the fate of harvest residues.

## Materials and methods

### Selection of the study areas and sampled trees

Selection of the sampled stands was made considering the productivity and management intensity for harvest-age *Pinus radiata* D. Don plantations, located in soils derived from volcanic sands (Xeropsamments), recent volcanic ash (Haploxerands) and marine sediments

## Introducción

El uso de los residuos forestales para la producción de bioenergía ha ganado interés en los últimos años, dado el potencial para la generación de ingresos adicionales al productor forestal y la diversificación de las fuentes energéticas (Cambero, Sowlati, Marinescu, & Dominiket, 2015). Esta biomasa puede obtenerse desde el manejo de las plantaciones forestales vía podas y aclareos o a través de los residuos producidos durante la cosecha (Perlack et al., 2005).

Una serie de estudios de biomasa para *Pinus radiata* D. Don se iniciaron en los años 1960 en Australia, Nueva Zelandia y Sudáfrica con el fin de realizar estimaciones de la productividad de los bosques y captura de nutrientes (Baker & Attiwill, 1985; Madgwick, Jackson, & Knight, 1977; van Laar & van Lill, 1978; Will, 1964). Posteriormente se desarrollaron estudios para comprender la productividad de esta especie con relación a los recursos del sitio, la partición de su biomasa y modelamiento ecofisiológico (Cromer, Barr, Williams, & McNaught, 1985; Rodríguez, Hofmann, Espinosa, & Ríos, 2003; Rubilar et al., 2010). Sin embargo, el uso de biomasa producida por el manejo forestal presenta ciertas limitaciones. Entre las principales, se destaca la ineficiencia de los métodos de recolección, así como la necesidad de cuantificar la biomasa que se generaría a partir del manejo de las plantaciones y bosques naturales de *Pinus spp.*, y el grado de contribución a la generación de bioenergía (Acuña, Espinosa, Cancino, Rubilar, & Muñoz, 2010; Hacker, 2005).

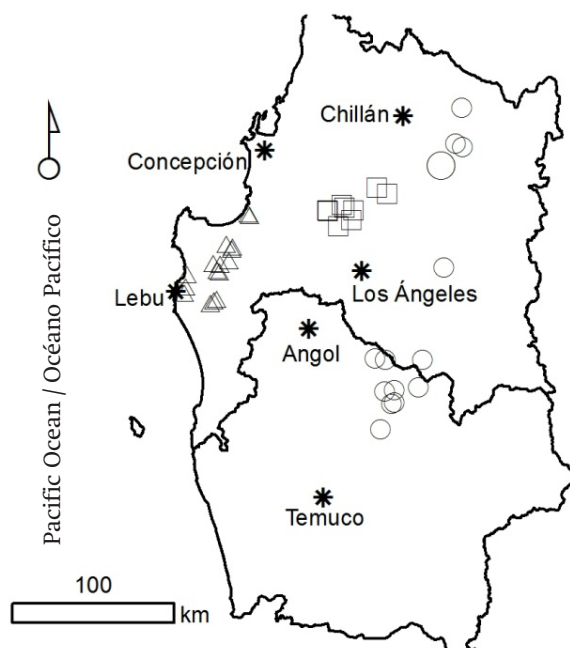
En estudios recientes en Chile se han realizado estimaciones de la biomasa de residuos de cosecha en plantaciones de *P. radiata* a partir de modelos ajustados con bases de datos de Australia y Nueva Zelandia, usando como base modelos de crecimiento y rendimiento (Corvalán & Hernández, 2011). Del mismo modo se han utilizado factores de conversión de volumen del fuste a biomasa aérea total y residuos de cosecha (Bertrán & Morales, 2008).

El objetivo de este estudio fue desarrollar modelos de estimación de biomasa de residuos de cosecha a nivel de árbol individual y rodal en plantaciones adultas de *P. radiata*, en suelos característicos de la zona centro-sur de Chile. Los modelos desarrollados permitirán la estimación del potencial energético de plantaciones de la misma especie a nivel sitio-específico, considerando las condiciones de manejo y el destino de los residuos de cosecha.

## Materiales y métodos

### Selección de las áreas de estudio y árboles muestreados

Los rodales muestreados se seleccionaron considerando la productividad e intensidad de manejo para



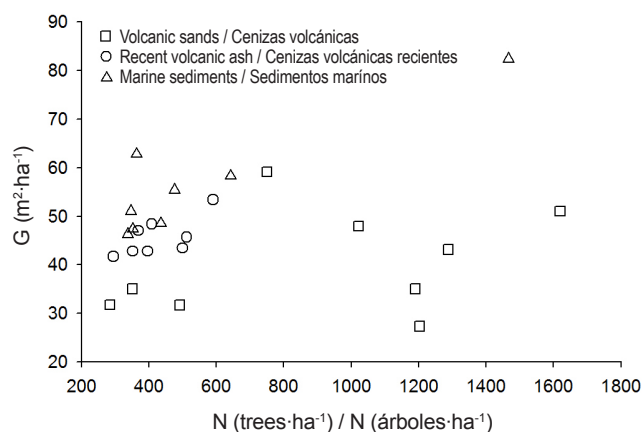
**Figure 1.** Geographical location and distribution of *Pinus radiata* D. Don stands sampled for each parent material evaluated. Squares represent stands in soils derived from volcanic sands, circles represent stands in soils derived from recent volcanic ash, and triangles represent stands in soils derived from marine sediments.

**Figura 1.** Ubicación y distribución geográfica de los rodales de *Pinus radiata* D. Don muestreados para cada material parental evaluado. Cuadrados representan rodales en suelos derivados de arenas volcánicas, círculos, en suelos derivados de cenizas volcánicas recientes, y triángulos, en suelos derivados de sedimentos marinos.

(Hapludults) (Figure 1). The stands were selected by means of a cluster analysis definition, using a stand basal area and density records database maintained by the main forestry companies in the region over the last 20 years.

From the variables basal area ( $G$ ,  $m^2 \cdot ha^{-1}$ ), as an expression of stand productivity, and density per hectare ( $N$ ,  $trees \cdot ha^{-1}$ ), as a reflection of management intensity, we selected, from the harvest supply, nine stands in soils derived from volcanic sands, eight stands in soils derived from recent volcanic ash and 10 stands in soils derived from marine sediments, for a total of 27 stands, representative of a productivity gradient and management conditions in each parent material (Figure 2).

In each of the representative stands of the selected clusters, and considering the preharvest inventories of each stand, we selected nine to 10 sample trees, which



**Figure 2.** Productivity (stand basal area,  $G$ ) and management (stand density,  $N$ ) parameters of harvest-age *Pinus radiata* D. Don stands, selected from cluster analysis of historical productivity records of the leading forestry companies in the region, for the three soil parent materials evaluated in the study.

**Figura 2.** Gradientes de productividad (área basal del rodal,  $G$ ) y manejo (densidad de rodal,  $N$ ) de los rodales de *Pinus radiata* D. Don, seleccionados a partir del análisis de conglomerados de registros históricos de productividad de las principales empresas forestales de la región en edad de cosecha para tres materiales parentales de suelo.

plantaciones en edad de cosecha de *Pinus radiata* D. Don, localizadas en suelos derivados de arenas volcánicas (Xeropsamments), cenizas volcánicas recientes (Haploxerands) y sedimentos marinos (Hapludults) (Figura 1). Los rodales fueron seleccionados por medio de la definición de un análisis de conglomerados, utilizando una base de datos de registros de área basal y densidad de rodales de las principales empresas forestales de la región de los últimos 20 años.

El área basal ( $G$ ,  $m^2 \cdot ha^{-1}$ ) considerada como una expresión de la productividad del rodal, y la densidad por hectárea ( $N$ ,  $árboles \cdot ha^{-1}$ ), como reflejo de la intensidad de manejo, se seleccionaron a partir de la oferta de cosecha: nueve rodales en suelos derivados de arenas volcánicas, ocho rodales de cenizas volcánicas recientes y 10 rodales de sedimentos marinos, completando un total de 27 rodales representativos de un gradiente de productividad y condiciones de manejo en cada material parental (Figura 2).

En cada uno de los rodales representativos de los conglomerados seleccionados, y considerando los inventarios de precosecha de cada rodal, se seleccionaron de nueve a 10 árboles muestra. Estos se distribuyeron dentro del rango de diámetro de cada rodal muestreado. A cada

were distributed within the diameter range of each sampled stand. The total height (H), diameter at breast height (D) and height of small end diameter (Hsed) of each selected individual were recorded. A total of 250 trees were sampled.

### Biomass sampling

It was conducted from destructive methods, estimating the following aboveground biomass components: stem wood and bark, branches, living foliage, dead foliage, cones and dead crown, for each sampled tree.

**Stem biomass.** Wood and bark biomass was estimated from the stem cutting height (0.15 m from the base) to the apex. Cross-section samples of each tree's stem were obtained, at every 2.5 m from the base of the stem to the small end diameter (SED = 8 cm), and at a spacing of 1 m from the SED to the apex. For each cross-section, diameters with and without bark were recorded, and basic density of wood and bark was determined. Cubing of the wood and bark volumes of each stem portion was performed. Biomass ( $\text{kg}\cdot\text{tree}^{-1}$ ) was estimated using the weighted average basic density of each stem portion. As the weighting factor, the area of the upper and lower cross-section of each stem section was used. Merchantable stem biomass corresponded to the wood biomass between the base and the SED, while the harvest residue biomass of the stem corresponded to the wood biomass between the SED and the apex, added to the bark biomass.

**Crown biomass.** Crown biomass estimates were differentiated between the living crown (branches, cones, living foliage and dead foliage) and dead crown (necromass). For the living crown, the insertion diameters of all living branches along the stem of each sample tree were measured. Then five dead branches from each tree, selected to represent the distribution of branch diameters of all trees selected in each stand, were obtained. The sample branches were taken to the laboratory to determine dry weight. For this purpose they were placed in ovens at 65 °C to constant weight, dry weight was recorded to the nearest 0.1 g, and the biomasses of the branch, cone, living foliage and dead foliage components were differentiated.

For each sampled stand a regression model was fitted for the branch and living foliage components, using as the independent variable the insertion diameter of the branch. The model used to estimate the biomass of these components corresponded to a potential linearized structure model [1] with bias correction, using the correction factor proposed by Baskerville (1972) [2]. The fitted models were used to determine the biomass of each sample tree from the branch insertion diameters. For the cone and dead foliage components, the average biomass among the sampled branches of

individuo seleccionado se registró su altura total (H), diámetro a 1.3 m desde el nivel del suelo (D) y altura del diámetro límite de utilización (Hdlu), para un total de 250 árboles muestras.

### Muestreo de biomasa

La biomasa de cada árbol se muestreó a partir de métodos destructivos, estimando los componentes de biomasa aérea: madera y corteza del fuste, ramas, follaje vivo, follaje muerto, conos y copa muerta.

**Biomasa de fuste.** Se estimó la biomasa de madera y corteza, desde la altura de corte del fuste (0.15 m desde la base) hasta el ápice. Se obtuvieron muestras de la sección transversal del fuste de cada árbol, a cada 2.5 m desde la base del fuste al diámetro límite de utilización (DLU=8 cm), y a espaciamiento de 1 m desde el DLU hasta el ápice. Para cada sección transversal se registraron los diámetros con y sin corteza, y se determinó la densidad básica de madera y corteza. Se realizó la cubicación de los volúmenes de madera y corteza de cada porción del fuste. Se estimó la biomasa ( $\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$ ) utilizando la densidad básica promedio ponderada de cada porción del fuste. Como factor de ponderación, se utilizó el área de la sección transversal superior e inferior de cada sección del fuste. La biomasa de fuste comercial correspondió a la biomasa de madera entre la base y el DLU, mientras que la biomasa de residuos de cosecha del fuste correspondió a la biomasa de madera entre el DLU y el ápice, sumado a la biomasa de corteza.

**Biomasa de copa.** Las estimaciones de la biomasa de copa se diferenciaron en copa viva (ramas, conos, follaje vivo y follaje muerto) y copa muerta (necromasa). En la copa viva, se realizó la medición de los diámetros de inserción de todas las ramas vivas a lo largo del fuste de cada árbol muestra. Posteriormente se obtuvieron cinco ramas muestras de cada árbol, para representar la distribución de diámetros de ramas de todos los árboles seleccionados en cada rodal. Las ramas muestra fueron llevadas al laboratorio para determinar el peso seco. Para ello se dispusieron en hornos a 65 °C hasta peso constante, se registró su peso seco con precisión de 0.1 g y se diferenciaron las biomásas entre los componentes de ramas, conos, follaje vivo y follaje muerto.

Para cada rodal muestreado se ajustó de un modelo de regresión para los componentes ramas y follaje vivo, utilizando como variable independiente el diámetro de inserción de la rama. El modelo utilizado para la estimación de biomasa de estos componentes correspondió a un modelo de estructura potencial linealizado [1] con corrección de sesgo, utilizando el factor de corrección propuesto por Baskerville (1972) [2]. Los modelos ajustados fueron utilizados para la determinación de la biomasa de cada árbol muestra a

each stand was used, given the null relationship to insertion diameter. The average values were multiplied by the number of living branches of each sample tree to obtain the biomass of these components.

$$\ln(\text{Br}_{\text{Ra}_i;\text{Fv}_i}) = b_0 + b_1 \times \ln(d_{\text{Ra}_i}) + e_i \quad [1]$$

where:

$\text{Br}_{\text{Ra}_i;\text{Fv}_i}$  = biomass of branch  $i$  (g), in the branch (Ra) and living foliage (Fv) components

$b_0, b_1$  = regression coefficients

$d_{\text{Ra}_i}$  = insertion diameter of branch (mm)

$e_i$  = residue

$$f_{c_j} = e^{(\text{MSE}/2)} \quad [2]$$

where:

$f_{c_j}$  = bias correction factor of the fitted model

MSE = mean squared error of the fitted model

Necromass was estimated by collecting all the dead branches of each sampled tree, which were weighed in the field to the nearest 20 g. Subsequently, an approximately 1,000 g sample was obtained and then weighed in the field to the nearest 0.1 g. The necromass sample was taken to the laboratory and dried in an oven at 65 °C to constant weight, and its dry weight was recorded to the nearest 0.1 g. From the dry and wet weight of each necromass sample, the total necrosis of each sampled tree was determined [3].

$$B_{\text{Necro}_i} = \text{TWW}_{\text{Necro}_i} \times \frac{\text{DWS}_{\text{Necro}_i}}{\text{WWS}_{\text{Necro}_i}} \quad [3]$$

where:

$B_{\text{Necro}_i}$  = biomass of the necromass component of tree  $i$  (kg)

$\text{TWW}_{\text{Necro}_i}$  = total wet weight of the necromass of tree  $i$  (kg)

$\text{WWS}_{\text{Necro}_i}$  = wet weight of the necromass sample of tree  $i$  (g)

$\text{DWS}_{\text{Necro}_i}$  = dry weight of the necromass sample of tree  $i$  (g)

### Estimation of the potential biomass of harvest residues

The potential biomass of each tree's harvest residues was estimated by adding the dry weight of the non-merchantable stem wood (between SED and apex), stem bark, branch, living foliage, dead foliage, cone and necromass components.

### Conversion factor for potential biomass of harvest residues

The biomass conversion factor was estimated using the ratio of potential harvest residue biomass to

partir de los diámetros de inserción de ramas. En el caso de los componentes de conos y follaje muerto se utilizó la biomasa promedio entre las ramas muestreadas de cada rodal, dada la nula relación con el diámetro de inserción. Los valores promedio fueron multiplicados por la cantidad de ramas vivas de cada árbol muestra para la obtención de la biomasa de estos componentes.

$$\ln(\text{Br}_{\text{Ra}_i;\text{Fv}_i}) = b_0 + b_1 \times \ln(d_{\text{Ra}_i}) + e_i \quad [1]$$

donde:

$\text{Br}_{\text{Ra}_i;\text{Fv}_i}$  = biomasa de rama  $i$  (g) en los componentes rama (Ra) y follaje vivo (Fv)

$b_0, b_1$  = coeficientes de regresión

$d_{\text{Ra}_i}$  = diámetro de inserción de rama (mm)

$e_i$  = residuo

$$f_{c_j} = e^{(\text{ECM}/2)} \quad [2]$$

donde:

$f_{c_j}$  = factor de corrección del sesgo del modelo ajustado

ECM = error cuadrático medio del modelo ajustado

La necromasa se estimó mediante la colecta de todas las ramas muertas de cada árbol muestreado, las cuales se pesaron en campo con precisión de 20 g. Posteriormente se pesó en campo una muestra de aproximadamente 1,000 g, con precisión de 0.1 g. La muestra de necromasa fue llevada al laboratorio y secada en horno a 65 °C hasta peso constante, y se registró su peso seco con precisión de 0.1 g. A partir del peso seco y húmedo de cada muestra de necromasa se determinó la necromasa total de cada árbol muestreado [3].

$$B_{\text{Necro}_i} = \text{PHT}_{\text{Necro}_i} \times \frac{\text{PSM}_{\text{Necro}_i}}{\text{PHM}_{\text{Necro}_i}} \quad [3]$$

donde:

$B_{\text{Necro}_i}$  = biomasa del componente de necromasa del árbol  $i$  (kg)

$\text{PHT}_{\text{Necro}_i}$  = peso húmedo total de la necromasa del árbol  $i$  (kg)

$\text{PHM}_{\text{Necro}_i}$  = peso húmedo de la muestra de necromasa del árbol  $i$  (g)

$\text{PSM}_{\text{Necro}_i}$  = peso seco de la muestra de necromasa del árbol  $i$  (g)

### Estimación de la biomasa potencial de residuos de cosecha

La biomasa potencial de residuos de cosecha de cada árbol se estimó mediante la suma del peso seco de los componentes de madera del fuste no comercial (entre DLU y ápice), corteza del fuste, ramas, follaje vivo, follaje muerto, conos y necromasa.

merchantable stem biomass, expressed as a percentage. From the observed values the fitting of a regression model proposed by Jenkins, Chojnacky, Heath, & Birdsey (2003) [4] was performed for each parent material, using diameter at breast height (1.3 m above ground level) as the independent variable.

$$BCF_{PHR_i} = \frac{B_{PHR_i}}{B_{MS_i}} \times 100 = \text{Exp} \left( b_0 + \frac{b_1}{D_i} \right) + e_i \quad [4]$$

where:

$BCF_{PHR_i}$  = biomass conversion factor for estimating potential harvest residue biomass (%)

$B_{PHR_i}$  = potential harvest residue biomass of tree  $i$  (kg·tree<sup>-1</sup>)

$B_{MS_i}$  = biomass of the merchantable stem portion of tree  $i$  (kg·tree<sup>-1</sup>)

Exp = exponential function

$b_0, b_1$  = regression coefficients

$D_i$  = diameter at breast height of tree  $i$  (cm)

$e_i$  = residue

#### Fitting of estimation models for the potential harvest residue biomass

The fitting of a regression model in a potential linearized structure [5] was performed using the independent variable "D<sup>2</sup>H", with incorporation of indicator variables (for each parent material) and subsequent use of the bias correction factor [2].

$$\ln(B_{PHR_i}) = b_0 + b_1 \times \ln(D_i^2 H_i) + e_i \quad [5]$$

where:

$B_{PHR_i}$  = potential harvest residue biomass of tree  $i$

$D_i$  = diameter at breast height of tree  $i$  (cm)

$H_i$  = total height of tree  $i$

$b_0, b_1$  = regression coefficients

$e_i$  = residue

Using the models fitted at individual tree level and stand tables for preharvest inventories, scaling up the potential harvest residue biomass to stand level was performed. Fitting of a regression model [6] was then performed using indicator variables for each parent material.

$$B_{PHR_j} = b_0 + b_1 \times G_j + e_j \quad [6]$$

where:

$B_{PHR_j}$  = potential harvest residue biomass of stand  $j$  (Mg·ha<sup>-1</sup>)

$G_j$  = basal area of stand  $j$  (m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>)

$b_0, b_1$  = regression coefficients

$e_j$  = residue

#### Factor de conversión para biomasa potencial de residuos de cosecha

El factor de conversión de biomasa se estimó mediante el cociente de la biomasa potencial de residuos de cosecha y la biomasa del fuste comercial, expresado en forma porcentual. A partir de los valores observados se ajustó de un modelo de regresión propuesto por Jenkins, Chojnacky, Heath, y Birdsey (2003) [4] para cada material parental, utilizando el diámetro del árbol a 1.3 m desde el nivel del suelo como variable independiente

$$FCB_{PRC_i} = \frac{B_{PRC_i}}{B_{FC_i}} \times 100 = \text{Exp} \left( b_0 + \frac{b_1}{D_i} \right) + e_i \quad [4]$$

donde:

$FCB_{PRC_i}$  = factor de conversión de biomasa para la estimación del potencial de residuos de cosecha (%)

$B_{PRC_i}$  = biomasa potencial de residuos de cosecha del árbol  $i$  (kg·árbol<sup>-1</sup>)

$B_{FC_i}$  = biomasa de la porción comercial del fuste del árbol  $i$  (kg·árbol<sup>-1</sup>)

Exp = función exponencial

$b_0, b_1$  = coeficientes de regresión

$D_i$  = diámetro del árbol a 1.3 m desde el nivel del suelo del árbol  $i$  (cm)

$e_i$  = residuo

#### Ajuste de modelos de estimación para la biomasa potencial de residuos de cosecha

Se realizó el ajuste de un modelo de regresión en una estructura potencial linealizada [5], utilizando para el ajuste de los modelos la variable independiente "D<sup>2</sup>H", con incorporación de variables indicadoras (para cada material parental) y posterior uso del factor de corrección de sesgo [2].

$$\ln(B_{PRC_i}) = b_0 + b_1 \times \ln(D_i^2 H_i) + e_i \quad [5]$$

donde:

$B_{PRC_i}$  = biomasa potencial de residuos de cosecha del árbol  $i$

$D_i$  = diámetro del árbol a 1.3 m desde el nivel del suelo del árbol  $i$  (cm)

$H_i$  = altura total del árbol  $i$

$b_0, b_1$  = coeficientes de regresión

$e_i$  = residuo

El escalamiento de la biomasa potencial de residuos de cosecha en rodal se hizo con modelos ajustados a nivel de árbol individual y con las tablas de rodal de los inventarios de precosecha. Luego se realizó el ajuste de un modelo de regresión [6], utilizando variables indicadoras para cada material parental.

## Results and discussion

### Distribution of aboveground biomass

At individual tree level, on average for the three parent materials evaluated,  $73.1 \pm 6.1$  % of total aboveground biomass corresponds to stem wood biomass and  $19.3 \pm 6.2$  % to crown biomass, while the potential harvest residue biomass reaches on average  $29.2 \pm 7.8$  % of total aboveground biomass (Table 1).

Results for the distribution of stem wood biomass and crown biomass (necromass + living foliage + dead foliage + cones) are similar to those obtained by Canga, Dieguez-Aranda, Afif-Khouri, and Cámara-Obregón (2013) in *P. radiata* plantations in Asturias, Spain, where stem wood biomass and crown biomass accounted for 72 and 18 % of total aboveground biomass respectively. Merino, Rey, Brañas, and Rodríguez-Soalleiro (2003) report that in adult *P. radiata* plantations in Galicia, Spain that 70 and 22 % of aboveground biomass corresponds to stem wood biomass and crown biomass, respectively. Balboa-Murias, Rodríguez-Soalleiro, Merino, and Álvarez-González (2006) report for *P. radiata* that  $72.5 \pm 5.1$  % of total aboveground biomass corresponds to stem wood biomass, and 18.7 % to crown biomass. The minimal differences between the different studies and parent materials may correspond to differences in site management and productivity activities associated with the type of soil (Schalatter & Gerding, 1999).

$$B_{PRC_j} = b_0 + b_1 \times G_j + e_j \quad [6]$$

donde:

$B_{PRC_j}$  = biomasa potencial de residuos de cosecha del rodal  $j$  ( $Mg \cdot ha^{-1}$ )

$G_j$  = área basal del rodal  $j$  ( $m^2 \cdot ha^{-1}$ )

$b_0, b_1$  = coeficientes de regresión

$e_j$  = residuo

## Resultados y discusión

### Distribución de la biomasa aérea

A nivel de árbol individual, y en promedio para los tres materiales parentales evaluados,  $73.1 \pm 6.1$  % de la biomasa aérea total corresponde a biomasa de madera del fuste, y  $19.3 \pm 6.2$  %, a biomasa de copa, mientras que la biomasa potencial de residuos de cosecha alcanza en promedio  $29.2 \pm 7.8$  % de la biomasa aérea total (Cuadro 1).

Los resultados de la distribución de la biomasa de madera del fuste y biomasa de copa (necromasa + follaje vivo + follaje muerto + conos) son similares a los obtenidos por Canga, Dieguez-Aranda, Afif-Khouri, y Cámara-Obregón (2013), quienes reportan 72 y 18 % de la biomasa aérea total, respectivamente, en plantaciones de *P. radiata* en Asturias- España. Merino, Rey, Brañas, y Rodríguez-Soalleiro (2003) reportan para plantaciones adultas de *P. radiata* en

**Table 1. Distribution of total aboveground biomass at individual tree level for adult *Pinus radiata* D. Don plantations for each soil parent material evaluated.**

**Cuadro 1. Distribución de la biomasa aérea total a nivel de árbol individual, para plantaciones adultas de *Pinus radiata* D. Don para cada material parental de suelo evaluado.**

Biomass component/ Componente de biomasa	Parent material/Material parental		
	Volcanic sands/ Arenas volcánicas	Recent volcanic ash/ Cenizas volcánicas recientes	Marine sediments/ Sedimentos marinos
Stem wood/Madera del fuste	70.01 ± 5.99 b	74.12 ± 5.47 a	75.19 ± 5.60 a
Stem bark/Corteza del fuste	7.56 ± 2.16 a	7.62 ± 1.80 a	7.61 ± 1.85 a
Necromass/Necromasa	7.19 ± 4.18 a	4.50 ± 3.64 b	3.99 ± 2.07 b
Branches/Ramas	8.09 ± 4.10 a	7.71 ± 3.90 a	7.08 ± 3.52 a
Living foliage/Follaje vivo	3.88 ± 1.47 a	2.66 ± 0.99 b	2.90 ± 1.23 b
Dead foliage/Follaje muerto	0.24 ± 0.46 ab	0.33 ± 0.29 a	0.16 ± 0.11 b
Cones/Conos	3.03 ± 2.95 a	3.05 ± 4.07 a	3.07 ± 2.99 a
Potential harvest residue biomass/ Biomasa potencial de residuos de cosecha	34.18 ± 8.50 a	27.3 ± 6.40 b	26.18 ± 5.52 b

Average values ± standard deviation are indicated. Volcanic sands n = 84; Recent volcanic ash n = 73; Marine sediments n = 93.

Se indican valores promedio ± desviación estándar. Arenas volcánicas n = 84; Cenizas volcánicas recientes n = 73; Sedimentos marinos n = 93.

### Conversion factor for potential harvest residue biomass

Potential harvest residue biomass estimates represent on average  $43.3 \pm 19.3$  % of merchantable stemwood biomass, considering an SED = 8 cm. The estimated conversion factor has a close relationship with tree size, which agrees with what was proposed by Jenkins et al. (2003), where for smaller-sized individuals the proportion of biomass distributed to merchantable stemwood is less than for larger-sized individuals (Table 2, Figure 3).

### Estimation of potential harvest residue biomass at individual tree level

The results of fitting models for estimating potential harvest residue biomass for each tree, performed by means of indicator variables (dummy variables), suggest a differentiated fit between parent materials of volcanic origin (volcanic sands and recent volcanic ash) and those derived from marine sediments, difference of the intercept  $P = 0.0254$ , difference of the slope  $P = 0.0375$  (Table 3, Figure 4). This may be related to soil fertility levels and more favorable weather conditions for the development of the species in the case of soils derived from marine sediments (Schalatter & Gerding, 1999).

The structure of the fitted estimation model has been mainly used for estimating total aboveground biomass (Moore, 2010) and stem wood and bark biomass (Canga et al. 2013), not only for *P. radiata* but also for other species (Ter-Mikaelian & Korzukhin, 1997), and a good

Galicia-España, que 70 y 22 % de la biomasa aérea correspondería a biomasa de madera del fuste y biomasa de copa, respectivamente. Balboa-Murias, Rodríguez-Soalleiro, Merino, y Álvarez-González (2006) reportan para *P. radiata*, que  $72.5 \pm 5.1$  % de la biomasa total correspondería a biomasa de madera del fuste, y 18.7 %, a biomasa de copa. Las diferencias mínimas entre los diferentes estudios y materiales parentales pudieran corresponder a las diferencias en actividades de manejo y productividad de sitio asociada al tipo de suelo (Schalatter & Gerding, 1999).

### Factor de conversión para biomasa potencial de residuos de cosecha

Las estimaciones de la biomasa potencial de residuos de cosecha representan en promedio  $43.3 \pm 19.3$  % de la biomasa de madera comercial del fuste, considerando un DLU = 8 cm. El factor de conversión estimado tiene una estrecha relación con el tamaño del árbol, lo cual concuerda con lo propuesto por Jenkins et al. (2003), quienes indican que la proporción de biomasa distribuida a madera del fuste comercial resulta menor en individuos de menor tamaño que en los de mayor tamaño (Cuadro 2, Figura 3).

### Estimación de la biomasa potencial de residuos de cosecha-árbol individual

Los resultados del ajuste de modelos para la estimación de la biomasa potencial de residuos de cosecha para árbol individual, realizado por medio de variables indicadoras ("dummy variables"), sugieren un ajuste diferenciando entre materiales parentales de

**Table 2. Fitted models for estimating the conversion factor for changing stem biomass to potential harvest residue biomass ( $BCF_{PHR}$ ) for *Pinus radiata* D. Don plantations for the parent materials evaluated.**

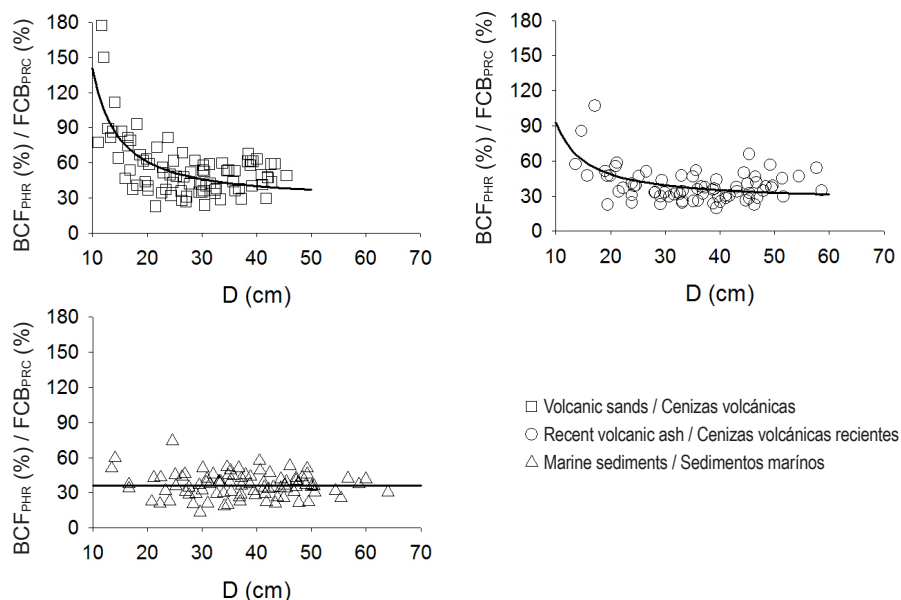
**Cuadro 2. Modelos ajustados para la estimación del factor de conversión de biomasa fustal a biomasa potencial de residuos de cosecha ( $FCB_{PRC}$ ) para plantaciones de *Pinus radiata* D. Don para los materiales parentales evaluados.**

Parent material/ Material parental	Fitted model/ Modelo ajustado	N	MSE/ECM	R <sup>2</sup>
Volcanic sands/ Arenas volcánicas	$BCF_{PHR} = \text{Exp} \left( 3.2703 + \frac{16.7641}{D} \right)$	84	319.2	0.91
	$FCB_{PRC} = \text{Exp} \left( 3.2703 + \frac{16.7641}{D} \right)$			
Recent volcanic ash/ Arenas volcánicas recientes	$BCF_{PHR} = \text{Exp} \left( 3.2249 + \frac{13.0864}{D} \right)$	73	152.6	0.91
	$FCB_{PRC} = \text{Exp} \left( 3.2249 + \frac{13.0864}{D} \right)$			
Marine sediments/ Sedimentos marinos	$BCF_{PHR} = 36.2$ $FCB_{PRC} = 36.2$	93	105.6	---

n: number of observations for fitting the model. MSE: mean squared error of the fitted model. R<sup>2</sup>: coefficient of determination of the fitted model.

n: número de observaciones para el ajuste del modelo. ECM: error cuadrático medio del modelo ajustado. R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación del modelo ajustado.





**Figure 3. Relationship between the conversion factor for changing stem biomass to potential harvest residue biomass ( $BCF_{PHR}$ , in %) at individual tree level, and diameter at breast height ( $D$ , in cm), for *Pinus radiata* D. Don plantations in each parent material evaluated.**

**Figura 3. Relación entre el factor de conversión de biomasa fustal a biomasa potencial de residuos de cosecha ( $FCB_{PRC}$ , en %) a nivel de árbol individual, y el diámetro del fuste a 1.3 m desde el nivel del suelo ( $D$ , en cm), para plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en cada material parental evaluado.**

fit for estimating potential harvest residue biomass at individual tree level has been observed.

The fitted estimation model uses variables that can be quickly measured in the field, allowing easy applicability to make estimates at individual tree level and later scaling up to stand level. In addition, it is one of the broader-scope studies regarding biomass assessment for harvest-age *P. radiata*, for estimating the potential residues that would be generated after harvesting activities in plantations of this species.

#### Estimation of potential harvest residue biomass at stand level

Several studies have fitted biomass estimation models at individual tree level at the local and regional scale (Canga et al. 2013, Jenkins et al. 2003, Merino et al. 2003; Moore, 2010; Rodríguez et al. 2003; Rubilar et al. 2010). However, few are those that after scaling biomasses up to stand level for *P. radiata* fit estimation models at this scale (Bi et al. 2010; Corvalán & Hernández, 2011). On the other hand, there are those who have explored some relationships (Cromer et al., 1985; Madgwick et al. 1977; Madgwick, 1985), where they identify variables such as average stand height, basal area and stand density as predictors of biomass at stand level.

origen volcánico (arenas volcánicas y cenizas volcánicas recientes), de aquellos derivados de sedimentos marinos, (diferencia del intercepto  $P = 0.0254$ , diferencia de la pendiente  $P = 0.0375$ ) (Cuadro 3, Figura 4). Esto pudiera estar relacionado con los niveles de fertilidad de suelo y condiciones climáticas más favorables para el desarrollo de la especie en el caso de suelos derivados de sedimentos marinos (Schalatter & Gerding, 1999).

La estructura del modelo de estimación ajustado ha sido utilizado principalmente para la estimación de la biomasa aérea total (Moore, 2010), de la biomasa de madera y corteza del fuste (Canga et al. 2013), no solo para *P. radiata* sino también para otras especies (Ter-Mikaelian & Korzukhin, 1997); también se ha observado un buen ajuste para la estimación de la biomasa potencial de residuos de cosecha a nivel de árbol individual.

El modelo de estimación ajustado utiliza variables de medición rápida en campo, lo que permite una aplicabilidad fácil para realizar las estimaciones a nivel de árbol individual y posterior escalamiento a nivel rodal. Además, corresponde a uno de los estudios de mayor envergadura en lo que respecta a la evaluación de biomasa para *P. radiata* en edad de cosecha, para la estimación de potencial de residuos generados tras las actividades de cosecha en plantaciones de esta especie.

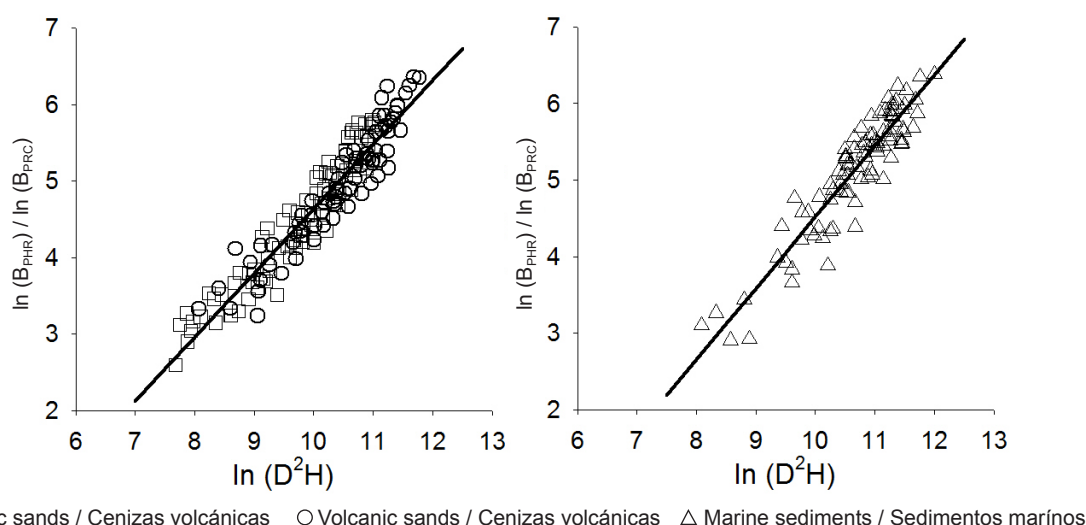
**Table 3. Models for estimating potential harvest residue biomass for adult *Pinus radiata* D. Don plantations at individual tree level, for the parent materials evaluated.**

**Cuadro 3. Modelos de estimación de biomasa potencial de residuos de cosecha para plantaciones adultas de *Pinus radiata* D. Don a nivel de árbol individual, para los materiales parentales evaluados.**

Parent material/ Material parental	Fitted model/ Modelo ajustado	n	MSE/ECM	R <sup>2</sup>	Final model/ Modelo final
VS and RVA/ AV y CVR	$\ln(B_{PHR}) = -3.74850 + 0.83850 \times \ln(D^2H)$ $\ln(B_{PRC}) = -3.74850 + 0.83850 \times \ln(D^2H)$	157	0.07144.0000	0.90.0	$B_{PHR} = 0.02441 \times (D^2H)^{0.83850}$ $B_{PRC} = 0.02441 \times (D^2H)^{0.83850}$
MS/SM	$\ln(B_{PHR}) = -3.74850 + 0.83850 \times \ln(D^2H)$ $\ln(B_{PRC}) = -3.74850 + 0.83850 \times \ln(D^2H)$	93	0.08529.0000	0.86.0	$B_{PHR} = 0.00876 \times (D^2H)^{0.92962}$ $B_{PRC} = 0.00876 \times (D^2H)^{0.92962}$

VS: Volcanic sands. RVA: Recent volcanic ash. MS: Marine sediments. n: number of observations for the model fit. MSE: mean squared error of the fitted model. R<sup>2</sup>: coefficient of determination of the fitted model.

AV: Arenas volcánicas. CVR: Cenizas volcánicas recientes. SM: Sedimentos marinos. n: número de observaciones para el ajuste del modelo. ECM: Error cuadrático medio del modelo ajustado. R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación del modelo ajustado.



**Figure 4. Relationship between potential harvest residue biomass ( $\ln B_{PHR}$ ) and the independent variable ( $\ln D^2H$ ) at individual tree level for adult *Pinus radiata* D. Don plantations, clustered as a result of regression analysis with indicator variables.**

**Figura 4. Relación entre la biomasa potencial de residuos de cosecha ( $\ln B_{PRC}$ ) y variable independiente ( $\ln D^2H$ ), a nivel de árbol individual para plantaciones adultas de *Pinus radiata* D. Don, agrupados como resultado del análisis de regresión con variables indicadoras.**

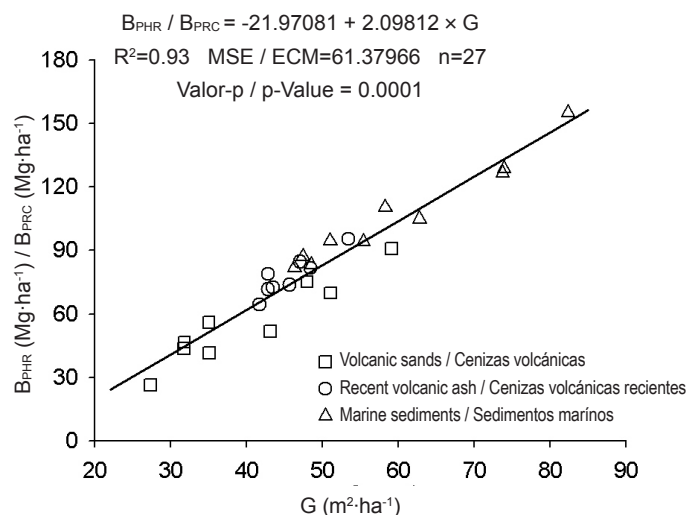
In arriving at estimates for potential harvest residue biomass at stand level, using estimation models at individual tree level together with stand tables, a close relationship with stand basal area (G), independent of parent material, was observed (Figure 5). Bi et al. (2010) report basal area as one of the variables to be incorporated into biomass estimation models, by components and total aboveground biomass.

From the fitted relationship it would be possible to estimate potential harvest residue biomass, independent of the silvicultural management activities that are carried out in *P. radiata* plantations, their productivity and soil parent material.

With the proposed models at individual tree and stand level, estimates of potential harvest residue biomass can

#### Estimación de la biomasa potencial de residuos de cosecha-rodal

Varios estudios han realizado el ajuste de modelos de estimación de biomasa a nivel de árbol individual a escala local y regional (Canga et al. 2013, Jenkins et al. 2003, Merino et al. 2003; Moore, 2010; Rodríguez et al. 2003; Rubilar et al. 2010). Sin embargo, resultan escasos aquellos que luego de escalar las biomásas a nivel de rodal para *P. radiata* realizan el ajuste de modelos de estimación a esta escala (Bi et al. 2010; Corvalán & Hernández, 2011). Por otro lado, hay quienes han explorado algunas relaciones (Cromer et al., 1985; Madgwick et al. 1977; Madgwick, 1985), donde identifican variables como la altura media de rodal, área basal y densidad de rodal, como variables predictoras de la biomasa a nivel de rodal.



**Figure 5. Fitted relationship between potential harvest residue biomass at stand level ( $B_{PHR}$ ) and stand basal area ( $G$ ), for adult *Pinus radiata* D. Don plantations.**

**Figura 5. Relación ajustada entre la biomasa potencial de residuos de cosecha a nivel de rodal ( $B_{PRC}$ ) y área basal del rodal ( $G$ ), para plantaciones adultas de *Pinus radiata* D. Don.**

be made. However, biomass that is currently removed from harvested sites, for energy purposes, is the combinatorial result of harvesting methods, collection and potential residue biomass. Future validation, with field data, of the biomass of residues that would be exported after operational removal activities in *Pinus radiata* stands is necessary.

## Conclusions

The fitting of an estimation model of the conversion factor for changing stem biomass to potential harvest residue biomass for *P. radiata* suggests a fit dependent on the parent material, where the species has a differentiated aboveground biomass distribution. However, it is independent of stand productivity and management.

The fitted models for estimating potential harvest residue biomass for *P. radiata* at individual tree level suggest a fit dependent on the origin of the soil parent material. In the case of the estimation model fits at stand level, there is a close relationship with stand basal area, regardless of productivity levels, management regime and parent materials evaluated.

The fitted models would be applicable in a wide range of management and productivity conditions, for *P. radiata* plantations in south-central Chile. However, for studies aimed at estimating potential harvest residue biomass, subsequent validation with field-collected data on the biomass of harvest residues removed during post-harvest activities is recommended. This is because the biomass that is currently removed would not only have a relationship to potential harvest residue biomass, but also to the harvesting and material collection methods,

Al realizar las estimaciones de la biomasa potencial de residuos de cosecha a nivel de rodal, utilizando los modelos de estimación a nivel árbol individual junto a las tablas de rodal, se observó una estrecha relación con el área basal del rodal ( $G$ ), independiente del material parental (Figura 5). Bi et al. (2010) reportan el área basal como una de las variables a incorporar dentro de modelos de estimación de biomasa tanto por componentes como para la biomasa aérea total.

A partir de la relación ajustada sería posible estimar la biomasa potencial de residuos de cosecha independiente, de las actividades de manejo silvícola realizadas en plantaciones de *P. radiata*, su productividad y material parental del suelo.

Con los modelos propuestos a nivel de árbol individual y rodal, es posible realizar estimaciones de la biomasa potencial de residuos de cosecha; sin embargo, la biomasa que actualmente se remueve desde los sitios cosechados, con fines energéticos, es resultado de la combinatoria de los métodos de cosecha, recolección y biomasa potencial de residuos. La validación a futuro de la biomasa de residuos, que sería exportada tras las actividades de remoción operacional en rodales de la especie, es necesaria pero con información de campo.

## Conclusiones

El ajuste de un modelo de estimación del factor de conversión de biomasa fustal a biomasa potencial de residuos de cosecha para *P. radiata* sugiere un ajuste dependiente del material parental, donde la especie presenta una distribución de la biomasa aérea diferenciada; sin embargo, el mismo resulta independiente de la productividad y manejo de los rodales.

which would determine the efficiency of the harvest residue collection operations.

### Acknowledgments

The authors thank Forestal Arauco S.A., Empresas CMPC, Masisa S.A., Cooperativa de Productividad Forestal, the Faculty of Forest Sciences at the Universidad de Concepción and CORFO, which through the Bioenercel Technology Consortium funded and facilitated the development of this research. The main author thanks CONICYT for funding his Ph.D. studies (folio 21100729).

### End of English version

### References / Referencias

- Acuña, E., Espinosa, M., Cancino J., Rubilar, R., & Muñoz, R. (2010). Estimating the bioenergy potential of *Pinus radiata* plantations in Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 37(1), 93-102. doi: 10.4067/S0718-16202010000100009
- Baker, T., & Attiwill, P. (1985) Above-ground nutrient distribution and cycling in *Pinus radiata* D. Don and *Eucalyptus obliqua* L'Hérit. Forests in Southeastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 13(1-2), 41-52. doi: 10.1016/0378-1127(85)90 004-0
- Balboa-Murias, M. A., Rodríguez-Soalleiro, R., Merino, A., & Álvarez-González, J. G. (2006). Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. *Forest Ecology and Management*, 237, 29-38. doi: 10.1016/j.foreco.2006.09.024
- Baskerville, G. L. (1972). Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 2(1), 49–53. DOI: 10.1139/x72-009
- Bertrán, J., & Morales, E. (2008). *Potencial de generación de energía por residuos del manejo forestal en Chile*. CNE/CTZ. ByB Impresores Santiago de Chile. Disponible en: [https://energypedia.info/images/2/25/Potencial\\_Biomasa\\_Forestal\\_Chile\\_GTZ.pdf](https://energypedia.info/images/2/25/Potencial_Biomasa_Forestal_Chile_GTZ.pdf)
- Bi, H., Long, Y., Turner, J., Lei, Y., Snowdon, P., Li, Y., Harper, R., Zerihun, A., & Ximenes, F. (2010). Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. *Forest Ecology and Management*, 259, 2301–2314. doi: 10.1016/j.foreco. 2010.03.003
- Cambero, C., Sowlati, T., Marinescu, M., & Dominik, R. (2015). Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain. *International Journal of Energy Research*, 39, 439-452. doi: 10.1002/er.3233
- Canga, E., Dieguez-Aranda, I., Afif-Khoury, E., & Cámara-Obregón, A. (2013). Above-ground biomass equations for *Pinus radiata* D. Don in Asturias. *Forest Systems*, 22(3), 408-415. doi: 10.5424/fs/2013223-04143

Los modelos ajustados para la estimación de la biomasa potencial de residuos de cosecha para *P. radiata* a nivel de árbol individual indican un ajuste dependiente del origen material parental del suelo. En el caso de los ajustes de modelos de estimación a nivel de rodal, sugieren una estrecha relación con el área basal del rodal, independiente de los niveles de productividad, manejo y materiales parentales evaluados.

Los modelos ajustados serían aplicables en una gran amplitud de condiciones de manejo y productividad, para plantaciones de *P. radiata* del centro-sur de Chile. Sin embargo, para estudios orientados a la estimación de la biomasa potencial de residuos de cosecha, se recomienda la posterior validación con datos colectados de campo, sobre la biomasa de residuos de cosecha removidos en actividades de postcosecha. Esto debido a que la biomasa que actualmente es removida, no solo tendría relación con la biomasa potencial de residuos, sino también con los métodos de cosecha y acopio del material, lo que determinaría la eficiencia en las faenas de recolección de residuos.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a Forestal Arauco S.A., Empresas CMPC, Masisa S.A., Cooperativa de Productividad Forestal, Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción y CORFO, quienes a través del Consorcio Tecnológico Bioenercel financiaron y facilitaron el desarrollo de esta investigación. El autor principal agradece a CONICYT por financiamiento para estudios de doctorado, folio 21100729.

### Fin de la versión en español

- Corvalán, P., & Hernández, J. (2011). *Tablas de estimación de biomasa aérea bruta en pie para plantaciones de Pino Insigne en Chile*. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Santiago, Chile. Disponible en: [http://www.researchgate.net/publication/263592530\\_Tablas\\_de\\_estimacin\\_de\\_biomasa\\_area\\_bruta\\_en\\_pie\\_para\\_plantaciones\\_de\\_Pino\\_Insigne\\_en\\_Chile](http://www.researchgate.net/publication/263592530_Tablas_de_estimacin_de_biomasa_area_bruta_en_pie_para_plantaciones_de_Pino_Insigne_en_Chile)
- Cromer, R. N., Barr, N. J. Williams, E. R., & McNaught, A. M. (1985). Response to fertiliser in a *Pinus radiata* Plantation 1: Above-ground biomass and wood density. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 15(1), 59-70. Disponible en: [http://www.scionresearch.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0011/30701/NZJFS1511985CROMER59\\_70.pdf](http://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0011/30701/NZJFS1511985CROMER59_70.pdf)
- Hacker, J. J. (2005). Effects of logging residue removal on forest sites: A literature review. Eau Claire, WI, USA: Resource Analytics and West Central Wisconsin Regional Planning Commission. Disponible en: <http://dnr.wi.gov/topic/forestbusinesses/documents/loggingresiduereport.pdf>

- Jenkins, J. C., Chojnacky, D. C., Heath L. S., & Birdsey, R. A. (2003). National-Scale Biomass Estimators for United States Tree Species. *Forest Science*, 49(1), 12-35. Disponible en: [http://biology.kenyon.edu/courses/biol229/jenkins\\_2003.pdf](http://biology.kenyon.edu/courses/biol229/jenkins_2003.pdf)
- Madgwick, H. A. I., Jackson, D. S., & Knight, J. (1977). Above-ground dry matter, energy, and nutrient contents of trees in an age series of *Pinus radiata* plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 7(3), 445-468. Disponible en: [http://www.scionresearch.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0007/37465/NZJFS731977MADGEWICK445-468.pdf](http://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0007/37465/NZJFS731977MADGEWICK445-468.pdf)
- Madgwick, H. A. I. (1985). Dry matter and nutrient relationships in stand of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 15(3), 324-36. Disponible en: <http://www.scionresearch.com/general/publications/nzjfs/previous-volumes/nzjfs-volume-15>
- Merino, A., Rey, C., Brañas, J., & Rodríguez-Soalleiro, R. (2003). Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales*, 12(2), 85-98. Disponible en: <http://www.inia.es/inia/contenidos/publicaciones/index.jsp?intranet=0&idcategoria=1380#>
- Moore, J. R. (2010). Allometric equations to predict the total above-ground biomass of radiata pine trees. *Annals of Forest Science*, 67, 806-817. doi: 10.1051/forest/2010042
- Perlack, R. D., Wright, L. L., Turhollow, A. F., Graham, R. L., Stokes, B. J., & Erbach, D. C. (2005). *Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: The technical feasibility of a billion-ton annual supply*. U.S. Department of Energy and U.S. Department of Agriculture, Oak ridge, Tennessee, USA. Disponible en: [http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/final\\_billionton\\_vision\\_report2.pdf](http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/final_billionton_vision_report2.pdf)
- Rodríguez, R., Hofmann, G., Espinosa, M., & Ríos, D. (2003). Biomass partitioning and leaf area of *Pinus radiata* trees subjected to silvopastoral and conventional forestry in the VI region, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76(3), 437-449. doi: 10.4067/S0716-078X2003000300008
- Rubilar, R. A., Allen, H. L., Álvarez, J. S., Albaugh, T. J., Fox, T. R., & Stape, J. L. (2010). Silvicultural manipulation and site effect on above and belowground biomass equations for young *Pinus radiata*. *Biomass and Bioenergy*, 34(12), 1825-1837. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.07.015
- Schalatter, J., & Gerding, V. (1999). Productividad en el ejemplo de seis sitios característicos de la VIII Región con *Pinus radiata* D. Don. *Bosque*, 20(1), 65-77. Disponible en: <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v20n1/art07.pdf>
- Ter-Mikaelian, M. T., & Korzukhin, M. D. (1997). Biomass equation for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 97, 1-24. doi: 10.1016/S0378-1127(97)00019-4
- van Laar, A., & van Lill, W. S. (1978). A biomass study in *Pinus radiata* D. Don. *South African Forestry Journal*, 107(1), 71-76. doi: 10.1080/20702620.1978.10433508
- Will, G. M. (1964). Dry matter production and nutrient uptake by *Pinus radiata* in New Zealand. *Commonwealth Forestry Association*, 43(1), 57-70. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/42603103>