



# Supervivencia y características de rebrotes en tocones de dos años de cultivos dendroenergéticos

## Survival rates and characteristics of spreads in two years stumps of crops with dendroenergy potential

Julio César Ríos-Saucedo<sup>1</sup>, Eduardo Acuña-Carmona<sup>2</sup>, Luis Manuel Valenzuela-Núñez<sup>3\*</sup>, Jorge Cancino-Cancino<sup>2</sup>, José Javier Corral-Rivas<sup>4</sup>, Rigoberto Rosales-Serna<sup>1</sup>

### RESUMEN

Varias especies de los géneros *Eucalyptus* y *Acacia* son adecuadas para la producción de biomasa útil en la generación de energía. El objetivo del presente estudio fue evaluar la supervivencia y características del rebrote en tocones de cuatro especies dendroenergéticas en tres diferentes densidades poblacionales. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, en tres sitios (Parcelas Collipulli, La Aguada y Pilpilco Abajo) con características edafoclimáticas contrastantes. Se estudió *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus denticulata*, *Eucalyptus nitens* y *Acacia dealbata* en tres densidades de plantación (5 000 árboles/ha; 10 000 árboles/ha y 15 000 árboles/ha). Se evaluó el porcentaje de supervivencia y las características del rebrote por tocón. Las variables especie, densidad de plantación y sitio de siembra afectaron los parámetros analizados. La densidad de plantación afectó el diámetro y altura de los rebrotes dominantes de tipo proventicio en las cuatro especies estudiadas. La mayor tasa de supervivencia de tocones (97 %), la presentó *Eucalyptus nitens* en Pipilco Abajo, con 79 % de supervivencia de rebrotes a una densidad de 5 000 árboles/ha. Sin embargo, en densidades de 15 000 árboles/ha, la supervivencia de rebrote fue de 29 %. *Acacia dealbata* es una especie reconocida por su capacidad de colonización, sin embargo, en La Aguada, con densidades de siembra de 5 000 árboles/ha y 10 000 árboles/ha, mostró baja tasa de supervivencia de tocones (19 % y 18 %, respectivamente) y de rebrotes (57 % y 63 %, respectivamente). La especie *Eucalyptus globulus* mostró altas tasas de supervivencia de tocones y rebrotes en todos los sitios evaluados, por lo que puede ser considerada como una buena opción para optimizar el sistema de monte bajo.

**PALABRAS CLAVE:** manejo de monte bajo, cultivos leñosos, bioenergía, sobrevivencia.

### ABSTRACT

Several species of the genera *Eucalyptus* and *Acacia* are suitable for biomass production useful in energy generation. The objective of this research was to evaluate the survival and characteristics of regrowth in stumps of four dendroenergetic species in three population densities. A randomized block design with three replications was used in three sites (Collipulli, La Aguada and Pilpilco Abajo plots) with contrasting edaphoclimatic characteristics. *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus denticulata*, *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* were studied in three plantation densities (5 000 trees/ha, 10 000 trees/ha and 15 000 trees/ha). The survival percentage and characteristics of stump regrowth characteristics of each stump were evaluated. The variables specie, plantation density and planting site affected the analyzed parameters. Plantation density affected the diameter and height of prevalent sprouts of proventitious shoots in all species. Highest stump survival rate (97 %) was presented by *Eucalyptus nitens* in Pipilco Abajo, with 79 % shoots survival of sprouts at a density of 5 000 trees/ha. However, at densities of 15 000 trees/ha, regrowth survival was 29%. The *Acacia dealbata* is a species characterized by its colonization capacity. However, at La Aguada, which had population densities of 5 000 trees/ha and 10 000 trees/ha, it showed a low stump (19% and 18 % respectively) and shoots (57 % and 63 % respectively) survival rate. The species *Eucalyptus globulus* showed high stump and shoot survival rates in all sites evaluated, therefore it can be considered a good option to optimize the scrub system.

**KEYWORDS:** management of coppice, woody crops, bioenergy, survival.

\*Correspondencia: luisvn70@hotmail.com/ Fecha de recepción: 18 de abril de 2018/ Fecha de aceptación: 16 de junio de 2019/ Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Campo Experimental Valle del Guadiana. <sup>2</sup>Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. <sup>3</sup>Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Biológicas, av. Universidad s/n fracc. Filadelfia, Gómez Palacio, Durango, México, C. P. 35010. <sup>4</sup>Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Ciudad Universitaria.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se buscan fuentes alternativas y renovables para la generación de energía eléctrica, con el fin de asegurar la sustentabilidad. Durante los últimos años, se incrementó el interés en la generación de energía a partir de la biomasa obtenida de diferentes especies vegetales (McKendry, 2002; Ramos-Llorente, 2013; Patiño-Martínez, 2014). Se ha considerado que las plantaciones de eucalipto pueden convertirse en un componente de importancia para la producción de biomasa útil en la generación de energía (Turnbull, 1999; Oliveira y col., 2014; Ferreira y col., 2017). El eucalipto es un árbol apreciado en el establecimiento de plantaciones forestales por su alta tasa de supervivencia, fácil regeneración y rápido crecimiento (García y Ruiz, 2003; Alonso y col., 2008; Catry y col., 2013; Moxham y col., 2018). También se incluye entre las plantas arbóreas de mayor importancia mundial para la producción de madera (Ruiz y Lopez, 2010; Farinaci y col., 2013; Quartucci y col., 2015).

Recientemente, se estimó una superficie mundial de 20.1 millones de hectáreas destinadas a plantaciones comerciales (Domingues y col., 2011). En zonas templadas de Australia y Chile, las especies del género *Eucalyptus*, principalmente *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* son preferidas en las plantaciones comerciales (Domingues y col., 2011; White y col., 2016). Otra especie de eucalipto con importancia económica es *Eucalyptus denticulata*, la cual, muestra similitud con *Eucalyptus nitens* para algunas características comerciales (Hamilton y col., 2011). Se ha demostrado que es posible obtener tasas altas de producción de biomasa en las plantaciones de estas especies con prácticas de silvicultura intensiva (Binkley y Stape, 2004).

En Chile, existe interés en el establecimiento de plantaciones de eucalipto para la producción de biomasa con fines energéticos (Geldres y col., 2004). La superficie establecida con plantaciones de eucalipto alcanza 0.7 millones de ha destinadas principalmente a la

producción de madera y pulpa (Barros, 2013). La producción de biomasa en dendroenergía es la manera de generar energía eléctrica a partir de material lignocelulósico pelletizado, y esto se logra mediante cultivos dendroenergéticos establecidos en altas densidades, y por ende, el costo inicial es elevado. El estudio de rebrotes en este tipo de prácticas es fundamental para evitar los costos de replantación, e incrementar la producción de biomasa y aprovechar hasta por 5 turnos de corta.

El sistema de manejo de las plantaciones cuenta con poca investigación en la respuesta y el manejo al rebrote. El manejo de rebrotes es una técnica para producir biomasa después del primer ciclo de corta, evitando los costos de replantación (Sixto y col., 2008). Se ha demostrado que, en un periodo menor de 15 años, un rodal en rebrote produce el doble del volumen maderable comparado con uno establecido mediante regeneración sexual (Silva y col., 2011).

Para el manejo del monte bajo (rebrotes), se han generado recomendaciones, como dejar entre uno y tres rebrotes por tocón preferentemente de tipo proventicios (Geldres y col., 2004; Rodríguez y col., 2013).

Algunas especies del género *Acacia* también han mostrado potencial para la producción de biomasa, pero se recomienda un manejo cuidadoso, porque debido a su gran capacidad de colonización, son consideradas como plantas invasivas. En Chile, la especie *Acacia dealbata* se introdujo como planta ornamental y se dispersó en hábitats ribereños, en sitios con escombros y perturbados (Fuentes y col., 2011). En la actualidad, en este país la especie tiene escasa utilidad para la producción de biomasa dendroenergética, aunque muestra alta eficiencia biológica y productiva (Ferreira y col., 2014). Por lo tanto, se requiere de estudios para la identificación de especies de rápido crecimiento y eficiencia productiva; así como valores altos de supervivencia en rebrotes, para optimizar la pro-

ducción de biomasa en cultivos de corta rotación, bajo un sistema de monte bajo.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la supervivencia y características del rebrote en tocones de dos años de cuatro especies establecidas como cultivos dendroenergéticos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

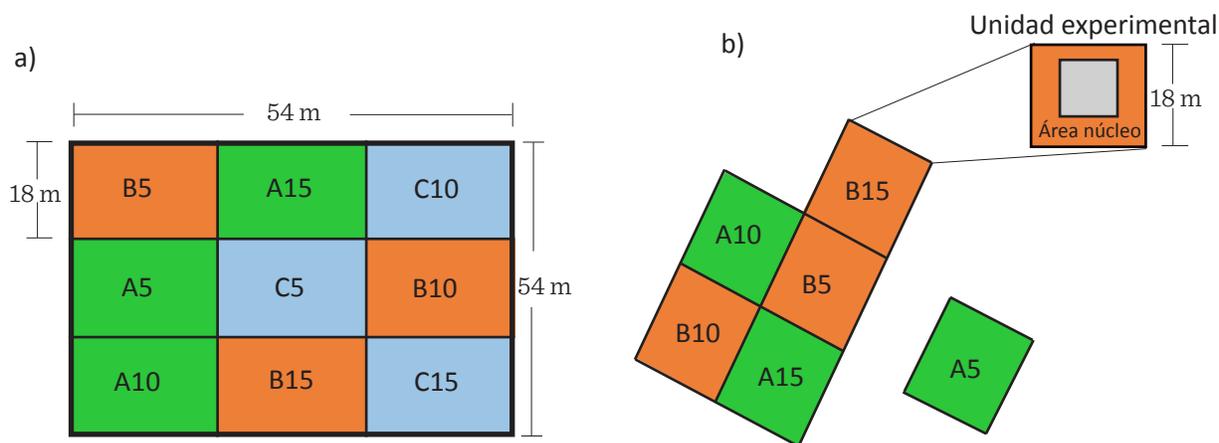
### Localización del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en agosto de 2010, en tres sitios con características edafoclimáticas contrastantes, i.e. Parcelas Collipulli: 38° 07'18.47" S 72°06'39.35" W, La Aguada 37°11' 53.42" S, 72°25'53.42" W y Pilpilco Abajo 37° 34'04.43" S 73°23'47.65" W. El sitio Parcelas Collipulli está ubicado en la IX región de Chile, en la comuna de Collipulli, posee suelos del tipo cenizas volcánicas recientes (trumaos), de textura franco-limosa; la temperatura mínima en invierno es de 4.1 °C y máxima en verano de 25.7 °C, con una precipitación media anual de 1 354. El sitio La Aguada pertenece a la comuna de Yumbel, presenta suelos arenales, derivados de arenas volcánicas, de textura franco-arenosa, con temperaturas que varían entre 4.4 °C (min) y 28.6 °C (max), con una precipitación media

anual de 1 093 mm. Pilpilco Abajo se encuentra en la comuna de Curanilahue; posee suelos profundos que se formaron sobre sedimentos marinos, de textura franco-arcillosa, con una temperatura mínima de 6.0 °C y máxima de 23.2 °C, registrando una precipitación media anual de 1 437 mm, ambos sitios pertenecientes a la VIII región (Novoa y col., 1989).

### Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Para los sitios Parcelas Collipulli y La Aguada, cada bloque fue un cuadrado de 54 m por lado con 9 unidades experimentales de 18 m por lado cada una (324 m<sup>2</sup>). Cada unidad, a su vez, consistió en una zona de amortiguamiento del efecto de borde y un núcleo cuadrado con 30 árboles útiles. En Pilpilco Abajo, dada la complejidad fisiográfica del terreno, se ubicaron 6 unidades experimentales por bloque. En los tres sitios, para evaluar el rebrote, todas las especies arbóreas establecidas se manejaron bajo una frecuencia de corte, en el segundo año de edad (Figura 1). Se plantó un número variable de especies por sitio, tres en Parcelas Collipulli (*Acacia dealbata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*) y La Aguada (*Acacia deal-*



■ Figura 1. Distribución y diseño de las unidades experimentales en los ensayos: a) Parcelas Collipulli y La Aguada, b) Pilpilco Abajo. Cada letra (A, B y C) y color representan la especie y los números (5, 10 y 15) la densidad de plantación.

Figure 1. Distribution and design of the experimental units in the trials: a) Collipulli and La Aguada plots, b) Pilpilco Abajo. Each letter (A, B and C) and color represents the species, and the numbers (5, 10 and 15) represent planting density.

bata, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus denticulata*), y dos en Pilpilco Abajo (*Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*), con tres densidades de plantación (5 000 árboles/ha; 10 000 árboles/ha y 15 000 árboles/ha). La selección de especies fue por interés de las empresas forestales participantes (Forestal Mininco “Yumbel”, MASISA “Pilpilco abajo” y Forestal Arauco “Parcelas Collipulli”), propietarias de las parcelas mencionadas.

### VARIABLES EVALUADAS

Para evaluar la supervivencia de los tocones, se contó el número de tocones rebrotados dentro del área núcleo (30 tocones) y se registró el número de rebrotes proventicios y adventicios de cada tocón. El tipo de rebrote se definió según sus características fisiológicas y posición; aquellos que brotaron en la corona del tocón y en posición horizontal fueron identificados como adventicios, en tanto que aquellos mejor unidos al tocón y en posición vertical, como rebrotes proventicios. La caracterización dendrométrica del rebrote, se basó en los dos principales rebrotes proventicios dominantes de cada tocón; se les midió la altura total (H) y el diámetro del cuello (Dac) a nivel del suelo (D; 0.1 m sobre el suelo).

### ANÁLISIS Y MODELO ESTADÍSTICO

Se utilizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilks (Mendes y Pala, 2003), para comprobar la distribución normal de los residuos del modelo estadístico. Los datos de supervivencia y características dendrométricas del rebrote, se analizaron mediante ANOVA. La comparación de medias se obtuvo con base en la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + SP_i + B_j + D_k + SP(B)_{ij} + SP(D)_{ik} + B(D)_{jk} + SP(B)(D)_{ijk} + E_{ijk}$$

$$i = 1, \dots, 4; j = 1, \dots, 3; k = 1, \dots, 3$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = valor de la variable dependiente, observado en la especie  $i$ , en el bloque  $j$ , y densidad  $k$ ;  $\mu$  = es la media general;  $SP_i$  = efecto del  $i$ -ésima especie;  $B_j$  = efecto del  $j$ -ésimo bloque;  $D_k$  =

efecto de la  $k$ -ésima densidad;  $SP(B)_{ik}$  = efecto de la interacción entre la  $i$ -ésima especie y  $j$ -ésimo bloque;  $SP(D)_{ik}$  = efecto de la interacción entre la  $i$ -ésima especie y la  $k$ -ésima densidad;  $B(D)_{jk}$  = efecto de la interacción entre el  $j$ -ésimo bloque y de la  $k$ -ésima densidad;  $SP(B)(D)_{ijk}$  = efecto de la interacción entre la  $i$ -ésima especie, el  $j$ -ésimo bloque y la  $k$ -ésima densidad.  $E_{ijk}$  = error del  $i$ -ésima especie, el  $j$ -ésimo bloque y la  $k$ -ésima densidad. El ANOVA se obtuvo con el apoyo del programa SAS Versión 9.2 (SAS Institute, 2008).

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sitio Pilpilco Abajo, registró el mayor nivel de supervivencia en todas las densidades de plantación, por lo que se observó igualdad estadística para el porcentaje de supervivencia a los dos años de establecimiento (Tabla 1). Con base en los resultados de supervivencia de Pilpilco Abajo, puede decirse que este ambiente mostró mayor potencial para la producción de biomasa dendroenergética, especialmente con la utilización de las especies *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus*, manejados como plantaciones unifustales de corta rotación.

Por otra parte, en el sitio Parcelas Collipulli, la especie *Eucalyptus globulus* presentó la mayor tasa de supervivencia del rebrote (89 %) en las tres densidades, a partir de los tocones obtenidos de los árboles cosechados a los dos años, que le permitió superar de forma significativa a *Eucalyptus nitens* y *Acacia dealbata*, con 25 % y 65 %, respectivamente (Tabla 2). En los otros dos sitios, todas las especies incluidas en el estudio presentaron valores estadísticamente iguales para la proporción de tocones que mostraron rebrotes, con valores entre 52 % y 78 %.

En Parcelas Collipulli y La Aguada, la especie *Acacia dealbata* mostró en promedio de las tres densidades de plantación valores de rebrotes entre el 65 % y 61 %, respectivamente (Tabla 2). Los resultados obtenidos fueron superiores a los que se registraron en otras especies de *Acacia*, en las que se observaron bajos porcentajes de rebrote después del cor-

te (37 % a 50 %), aunque después de seis meses se observó un incremento considerable hasta alcanzar el 85 % (Ríos-Saucedo y col., 2017). La especie *Eucalyptus globulus* presentó diferencia significativa ( $P < 0.05$ ), registrando mayor capacidad de supervivencia del rebrote en dos de los tres sitios de estudio, aun-

que únicamente se detectó significancia estadística en Parcelas Collipulli (Tabla 2). Se obtuvieron resultados similares en estudios de supervivencia realizados en *Eucalyptus globulus*, en los que se corroboró la capacidad de rebrote de esta especie, debido a su alto potencial de iniciación en las yemas epicórmicas y

■ **Tabla 1. Valores promedio y significancia de las variables evaluadas en las tres densidades de plantación por sitio.**

Table 1. Mean values and significance of evaluated variables in three planting densities by site.

Sitio	Densidad (árboles/ha)	Supervivencia (%)		Número de rebrotes		Rebrotos dominantes	
		Cepas <sup>1</sup>	Rebrote <sup>2</sup>	Adventicios	Proventicios	Dac (mm) <sup>3</sup>	H (m) <sup>4</sup>
Parcelas Collipulli	5 000	75 <sup>a</sup>	62 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	10.0 <sup>a</sup>	0.9 <sup>a</sup>
	10 000	68 <sup>ab</sup>	59 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	9.0 <sup>a</sup>	0.9 <sup>a</sup>
	15 000	58 <sup>b</sup>	59 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	8.0 <sup>a</sup>	0.7 <sup>b</sup>
La Aguada	5 000	60 <sup>a</sup>	54 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	22.4 <sup>a</sup>	1.8 <sup>a</sup>
	10 000	57 <sup>a</sup>	67 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	15.2 <sup>ab</sup>	1.2 <sup>a</sup>
	15 000	72 <sup>a</sup>	70 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	14.7 <sup>b</sup>	1.2 <sup>a</sup>
Pilpilco Abajo	5 000	94 <sup>a</sup>	65 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	11.0 <sup>a</sup>	0.8 <sup>a</sup>
	10 000	91 <sup>a</sup>	60 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	12.0 <sup>a</sup>	0.8 <sup>a</sup>
	15 000	94 <sup>a</sup>	31 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	8.0 <sup>a</sup>	0.5 <sup>b</sup>

<sup>1</sup>Cepas: cepas de dos años, <sup>2</sup>Rebrotos: cepas rebrotadas, <sup>3</sup>Dac: diámetro a la altura del cuello, <sup>4</sup>H: altura total, <sup>a-c</sup>Letras distintas en cada columna representan diferencias significativas entre densidades.

■ **Tabla 2. Valores promedio y significancia entre especies por sitio para las variables evaluadas.**

Table 2. Mean values and significance between species by site for the evaluated variables values.

Sitio	Especie	Supervivencia (%)		Número de rebrotes		Rebrotos dominantes	
		Cepas <sup>1</sup>	Rebrote <sup>2</sup>	Adventicios	Proventicios	Dac (mm) <sup>3</sup>	H (m) <sup>4</sup>
Parcelas Collipulli	<i>Acacia dealbata</i>	74 <sup>Aa</sup>	65 <sup>b</sup>	5 <sup>b</sup>	5 <sup>b</sup>	8.4 <sup>b</sup>	0.8 <sup>b</sup>
	<i>Eucalyptus nitens</i>	66 <sup>Ba</sup>	25 <sup>c</sup>	3 <sup>b</sup>	2 <sup>c</sup>	7.0 <sup>c</sup>	0.5 <sup>c</sup>
	<i>Eucalyptus globulus</i>	61 <sup>Ba</sup>	89 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	11.5 <sup>a</sup>	1.1 <sup>a</sup>
La Aguada	<i>Acacia dealbata</i>	30 <sup>b</sup>	61 <sup>a</sup>	3 <sup>b</sup>	4 <sup>a</sup>	18.7 <sup>a</sup>	1.5 <sup>a</sup>
	<i>Eucalyptus denticulata</i>	74 <sup>a</sup>	52 <sup>a</sup>	6 <sup>ab</sup>	4 <sup>a</sup>	17.0 <sup>a</sup>	1.4 <sup>a</sup>
	<i>Eucalyptus globulus</i>	83 <sup>a</sup>	78 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	12.9 <sup>a</sup>	1.6 <sup>a</sup>
Pilpilco Abajo	<i>Eucalyptus nitens</i>	94 <sup>a</sup>	53 <sup>a</sup>	7 <sup>ns</sup>	4 <sup>b</sup>	9.0 <sup>a</sup>	0.6 <sup>b</sup>
	<i>Eucalyptus globulus</i>	91 <sup>a</sup>	52 <sup>a</sup>	7 <sup>ns</sup>	6 <sup>a</sup>	11.0 <sup>a</sup>	0.8 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Cepas: cepas de dos años, <sup>2</sup>Rebrotos: cepas rebrotadas, <sup>3</sup>Dac: diámetro a la altura del cuello, <sup>4</sup>H: altura total, <sup>a-c</sup>Letras diferentes en cada columna representan diferencias significativas entre especies; <sup>A,B</sup>Letras distintas en cada columna significan diferencias significativas entre porcentaje de supervivencia, número de rebrotes y rebrotos dominantes.

la presencia de lignotúber, con un porcentaje de supervivencia del 89 % (Catty y col., 2013).

El análisis descriptivo comparando las especies y densidad por cada sitio se presenta en la Tabla 3. Se obtuvo una tasa de supervivencia entre el 18 % y 97 % de tocones vivos y un 21 % y un 93 % en rebrotes; en la mayoría de las variables evaluadas se obtuvieron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre sitios, especies y densidades de plantación. Transcurridos dos años de establecimiento de la plantación, el sitio Pilpilco Abajo mostró el mayor porcentaje de supervivencia en tocones en las especies y densidades evaluadas, con valores entre 92 % y 97 % para *Eucalyptus nitens* y entre 90 % y 93 % para *Eucalyptus globulus*. En el sitio La Aguada, *Eucalyptus globulus* fue la especie con mayor porcentaje de supervivencia (91 %), en 5 000 árboles/ha, seguida por *Eucalyptus denticulata*, con 78 %, en 10 000 árboles/ha. En contraste, *Acacia dealbata* fue la especie que presentó el menor porcentaje de supervivencia, con valores inferiores a 30 % en las densidades de 5 000 árboles/ha y 10 000 árboles/ha.

En Parcelas Collipulli, la densidad de plantación más favorable para *Acacia dealbata* fue en la de 5 000 árboles/ha, con un 77 % de supervivencia de tocones, seguida por la densidad más alta de 15 000 árboles/ha, con un 74 %. Los eucaliptos, -especialmente *Eucalyptus nitens*- mostraron valores de supervivencia similares a los observados en *Acacia dealbata* en las densidades de 5000 árboles/ha y 10 000 árboles/ha. En la densidad de 15 000 árboles/ha se redujo significativamente la supervivencia en *Eucalyptus nitens* (51 %) y *Eucalyptus globulus* (48 %), en comparación con *Acacia dealbata* (74 %).

En Pilpilco Abajo, se registró bajo nivel de rebrote en *Eucalyptus nitens* (29 %) y *Eucalyptus globulus* (35 %), ambas especies en la densidad de 15 000 árboles/ha. A pesar que este sitio presentó la mayor tasa de supervivencia de tocones en la frecuencia de corte estu-

diada (2 años), esto pudo ser causado por deficiencias en el manejo silvícola después del aprovechamiento (extracción), dañando el tocón o dejándolo expuesto a la radiación solar. Para el número de rebrotes adventicios, la especie *Eucalyptus globulus* mostró valores significativos en Parcelas Collipulli (8) y La Aguada (9) (Tabla 2). En esta última localidad, *Eucalyptus denticulata* registró en promedio 6 rebrotes por tocón. De la misma forma, la especie *Eucalyptus globulus* registró un número significativamente mayor de rebrotes proventicios, con respecto al resto de las especies evaluadas en los tres sitios, en Parcelas Collipulli (7), Pilpilco Abajo (6) y en La Aguada (5) (Tabla 2). Se corroboró que todas las especies mostraron características de brotación aceptables para su uso en el sistema de monte bajo, en el cual se requiere de uno a tres retoños para estimular el crecimiento en altura de los rebrotes (Geldres y col., 2004). Se debe considerar que un número mayor de rebrotes proventicios y adventicios requiere un manejo silvícola apropiado, para evitar estrés de los rebrotes en crecimiento. Se recomienda dar prioridad a los rebrotes proventicios, eliminando los retoños adventicios y rebrotes proventicios con doble flecha, bifurcación y curvatura en el fuste (Geldres y col., 2004).

La densidad de plantación no presentó diferencias significativas sobre el número de rebrotes proventicios en ninguna de las especies (Tabla 3). La respuesta observada en este estudio está en función de la planta madre (tocón), ya que el crecimiento inicial del rebrote parte de las reservas de nutrientes. Trabajos similares reportan que es factible el uso de los rebrotes proventicios, los cuales muestran un crecimiento vigoroso y superan entre 10 % y 20 % el diámetro del cuello y la altura observada en los rebrotes adventicios (Brassiolo y col., 2007). Por tal motivo, las especies de este estudio, pueden ser manejadas a partir de rebrotes proventicios para la producción de biomasa, para la elaboración de pellets o chipeada para la generación de energía eléctrica.

El sitio Parcelas Collipulli, registró diferencias significativas en las variables dendrométricas evaluadas; para el diámetro a la altura del cuello (Dac), la especie *Eucalyptus globulus* mostró el valor promedio más alto con 11.5 mm, superando significativamente a las especies (Tabla 2) *Acacia dealbata* (8.4 mm) y *Eucalyptus nitens* (7.0 mm). En los otros dos sitios incluidos en el estudio, se observó igualdad estadística para el Dac, con valores entre 12.9 mm y 18.7 mm en La Aguada, y de 9.0 mm a 11.0 mm en Pilpilco Abajo.

En el sitio La Aguada se obtuvieron los valores más altos de Dac, y disminución paulatina de esta variable conforme se incrementó la densidad de plantación (Tabla 1). Los valores se redujeron de 22.4 mm en 5 000 ár-

boles/ha hasta alcanzar un nivel significativamente inferior, de 14.7 mm, en la densidad de 15 000 árboles/ha. En los otros dos sitios se observaron valores bajos (8.0 mm) en la densidad mayor (15 000 árboles/ha) y 10.0 mm y 11.00 en la menor (5 000 árboles/ha). En otros estudios se registró efecto significativo de la densidad de plantación sobre el diámetro normal (Dap: diámetro a la altura del pecho), y se estableció que la disminución de la cantidad de plantas/ha incrementó la tasa de crecimiento del diámetro en *Eucalyptus globulus* (Ferrere y col., 2005).

En este estudio, en altura, *Eucalyptus globulus* presentó los valores más altos en todos los sitios, que resultaron estadísticamente superiores al resto de las especies en Parce-

■ **Tabla 3. Supervivencia observada en tocones de dos años y rebrotes en diferentes especies, densidades de plantación y sitios.**

Table 3. Survival observed in two-year stumps and shoots in different species, planting densities and sites.

Sitios	Variable	Parcelas Collipulli			La Aguada			Pilpilco abajo	
		Densidad	Ad	En	Eg	Ad	Ed	Eg	Eg
Supervivencia tocón (%)	5000	77 <sup>Aa</sup>	78 <sup>Aa</sup>	71 <sup>Aa</sup>	19 <sup>Aa</sup>	70 <sup>Ba</sup>	91 <sup>Ca</sup>	91 <sup>Aa</sup>	97 <sup>Aa</sup>
	10000	70 <sup>Aa</sup>	69 <sup>Aa</sup>	64 <sup>Bb</sup>	18 <sup>Aa</sup>	78 <sup>Ba</sup>	74 <sup>Bb</sup>	90 <sup>Aa</sup>	92 <sup>Aa</sup>
	15000	74 <sup>Aa</sup>	51 <sup>Bb</sup>	48 <sup>Bc</sup>	56 <sup>Ab</sup>	77 <sup>Ba</sup>	85 <sup>Ca</sup>	93 <sup>Aa</sup>	94 <sup>Aa</sup>
Supervivencia rebrotes (%)	5000	73 <sup>Aa</sup>	21 <sup>Ba</sup>	93 <sup>Ca</sup>	57 <sup>Aa</sup>	34 <sup>Ba</sup>	72 <sup>Ca</sup>	51 <sup>Aa</sup>	79 <sup>Ba</sup>
	10000	58 <sup>Ab</sup>	27 <sup>Ba</sup>	91 <sup>Ca</sup>	63 <sup>Aa</sup>	61 <sup>Ab</sup>	77 <sup>Ba</sup>	69 <sup>Aa</sup>	53 <sup>Bb</sup>
	15000	65 <sup>Aab</sup>	29 <sup>Ba</sup>	84 <sup>Ca</sup>	64 <sup>Aa</sup>	63 <sup>Ab</sup>	84 <sup>Bb</sup>	35 <sup>Ab</sup>	29 <sup>Bc</sup>
No. rebrotes adventicios	5000	6 <sup>Aa</sup>	8 <sup>Aa</sup>	12 <sup>Ba</sup>	2 <sup>Aa</sup>	4 <sup>Ba</sup>	10 <sup>Ca</sup>	8 <sup>Aa</sup>	8 <sup>Aa</sup>
	10000	6 <sup>Aa</sup>	3 <sup>Bb</sup>	10 <sup>Ca</sup>	6 <sup>Ab</sup>	7 <sup>Ab</sup>	7 <sup>Ab</sup>	6 <sup>Ab</sup>	6 <sup>Aa</sup>
	15000	7 <sup>Aa</sup>	3 <sup>Bb</sup>	7 <sup>Cb</sup>	12 <sup>Ac</sup>	8 <sup>Bb</sup>	8 <sup>Bb</sup>	8 <sup>Aa</sup>	7 <sup>Aa</sup>
No. rebrotes proventicios	5000	5 <sup>Aa</sup>	2 <sup>Ba</sup>	8 <sup>Ca</sup>	5 <sup>Aa</sup>	5 <sup>Aa</sup>	6 <sup>Aa</sup>	7 <sup>Aa</sup>	4 <sup>Ba</sup>
	10000	5 <sup>Aa</sup>	3 <sup>Aa</sup>	7 <sup>Bab</sup>	5 <sup>Aa</sup>	5 <sup>Aa</sup>	5 <sup>Aa</sup>	6 <sup>Aab</sup>	4 <sup>Aa</sup>
	15000	5 <sup>Aa</sup>	3 <sup>Ab</sup>	6 <sup>Ab</sup>	6 <sup>Aa</sup>	5 <sup>Aa</sup>	5 <sup>Aa</sup>	5 <sup>Ab</sup>	4 <sup>Aa</sup>
Dac (mm)	5000	8.9 <sup>Aa</sup>	8.7 <sup>Aa</sup>	12.3 <sup>Ba</sup>	35.7 <sup>Aa</sup>	19.6 <sup>Ba</sup>	20.0 <sup>Ba</sup>	13.2 <sup>Aa</sup>	10.9 <sup>Aa</sup>
	10000	8.9 <sup>Aa</sup>	6.5 <sup>Aa</sup>	12.3 <sup>Ba</sup>	19.2 <sup>Ab</sup>	16.4 <sup>Ba</sup>	19.2 <sup>Aa</sup>	13.3 <sup>Aa</sup>	10.1 <sup>Ba</sup>
	15000	7.7 <sup>Aa</sup>	7.0 <sup>Aa</sup>	9.8 <sup>Ab</sup>	12.7 <sup>Ac</sup>	16.5 <sup>Ba</sup>	17.1 <sup>Ba</sup>	10.6 <sup>Aa</sup>	8.0 <sup>Ba</sup>
Altura (m)	5000	0.8 <sup>Aa</sup>	0.5 <sup>Ba</sup>	1.2 <sup>Ca</sup>	2.5 <sup>Aa</sup>	1.7 <sup>Aa</sup>	1.6 <sup>Aa</sup>	0.9 <sup>Aa</sup>	0.7 <sup>Aa</sup>
	10000	0.9 <sup>Aa</sup>	0.5 <sup>Ba</sup>	1.2 <sup>Ca</sup>	1.5 <sup>Ab</sup>	1.4 <sup>Aa</sup>	1.5 <sup>Aa</sup>	1.0 <sup>Aa</sup>	0.6 <sup>Ba</sup>
	15000	0.7 <sup>Aa</sup>	0.5 <sup>Aa</sup>	0.9 <sup>Bb</sup>	0.9 <sup>Ac</sup>	1.4 <sup>Aa</sup>	1.5 <sup>Ba</sup>	0.8 <sup>Aa</sup>	0.4 <sup>Bb</sup>

Ad: es *Acacia dealbata*, En es *Eucalyptus nitens*, Ed: es *Eucalyptus denticulata*, Eg: es *Eucalyptus globulus*; distintas letras mayúsculas muestran diferencias significativas entre especies; distintas letras minúsculas muestran diferencias significativas entre densidad de plantación, Dac es el diámetro a la altura del cuello de los rebrotes.

las Collipulli (1.1 m) y Pilpilco Abajo (0.8 m) (Tabla 2). Aunque en La Aguada fue mayor (1.6 m), resultó estadísticamente igual a lo observado en *Acacia dealbata* (1.5 m) y en *Eucalyptus denticulata* (1.4 m). En otros estudios, se observó reducción considerable del número de rebrotes conforme se incrementó la altura, aunque se omitió la diferenciación de los tipos de rebrotes (Solimani, 2011). En todos los sitios de evaluación de este estudio, se observó efecto negativo al incrementar la densidad de plantación sobre la altura del rebrote (Tabla 1). En Parcelas Collipulli y Pilpilco Abajo, con *Eucalyptus globulus*, la mayor altura de los rebrotes se obtuvo en las densidades de 5 000 árboles/ha (1.2 m 0.9 m, respectivamente) y 10 000 árboles/ha (1.2 m y 1.0 m, respectivamente) (Tabla 3); mientras que, en la densidad de 15 000 árboles/ha se registró una reducción significativa para esta variable (0.9 m y 0.8 m, respectivamente). En otros estudios, con la misma especie, se estableció que la densidad de plantación tuvo efecto menos marcado sobre la altura de la planta, en comparación con el aumento del diámetro normal (Dap) (Ferrere y col., 2005). Es necesario ajustar el manejo fores-

tal para incluir acciones encaminadas al control del consumo ejercido por la fauna silvestre (lagomorfos).

De los dos sitios donde se estableció *Acacia dealbata*, Parcelas Collipulli registró la mayor tasa de supervivencia de tocones en las tres densidades de plantación, con valores entre 70 % y 77 % (Tabla 3). En el sitio Parcelas Collipulli, la densidad de 5 000 árboles/ha fue la que obtuvo el mayor promedio de supervivencia, 75 % para las tres especies, seguido por la densidad de 10 000 árboles/ha con 68 % (Tabla 1). Estos resultados son consistentes con los reportados por Esquivel y col. (2013), quienes evaluaron la supervivencia en plantaciones de corta rotación en densidades de 5 000 árboles/ha; 7 500 árboles/ha y 10 000 árboles/ha, encontrando que al incrementar la densidad de plantación, aumentó también la mortalidad en los cultivos, esto atribuido a la competencia por espacio y nutrientes del suelo. Sin embargo, *Acacia dealbata* fue la especie que presentó menos afectación en la tasa de supervivencia, por la densidad de siembra (Tabla 4), acompañada por una buena tasa de rebrotes proventicios,

■ **Tabla 4. Producción de rebrotes en función de la densidad de plantación final y el número de rebrotes por tocón en Parcelas Collipulli.**

Table 4. Shoot production based on the final plantation density and the number of shoots by stump at Parcelas Collipulli.

<b><i>Eucalyptus nitens</i></b>				
Densidad	Supervivencia %	Densidad final	Rebrotes proventicios por tocón	Núm. de rebrotes
5 000	78	3 900	2	7 800
10 000	69	6 900	3	20 700
15 000	51	7 650	3	22 950
<b><i>Acacia dealbata</i></b>				
Densidad	Supervivencia	Densidad final	Rebrotes proventicios	Núm. de rebrotes
5 000	77	3 850	5	19 250
10 000	70	7 000	5	35 000
15 000	74	11 100	5	55 500
<b><i>Eucalyptus globulus</i></b>				
Densidad	Supervivencia	Densidad final	Rebrotes proventicios	Núm. de rebrotes
5 000	71	3 550	8	28 400
10 000	64	6 400	7	44 800
15 000	48	7 200	6	43 200

lo que hace de esta especie una inversión rentable. En las tres especies de eucalipto (*Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus denticulata*) es importante considerarse densidades de siembra de 10 000 árboles/ha a 15 000 árboles/ha para obtener una mayor rentabilidad (Tabla 3).

## CONCLUSIONES

El éxito del establecimiento de especies forestales, bajo un sistema de monte bajo, está relacionado con la elección de especies de fácil brotación, y el mantener la supervivencia en las primeras etapas de crecimiento de la plantación inicial. El sitio, reflejado en las condiciones edafoclimáticas difiere significativamente para obtener el mayor número de tocones vivos al momento de la cosecha y desarrollo de rebrotes. En ciclos posteriores, la densidad mayor puede ser la más rentable para la generación de energía a partir de la

producción de biomasa. La especie *Eucalyptus globulus* mostró altas tasas de supervivencia en todos los sitios, por lo que puede ser considerada como una buena opción para optimizar el sistema productivo de biomasa por unidad de superficie a partir de rebrotes. Dicha especie mostró altas tasas de supervivencia al final del ciclo de corta (2 años), un alto nivel de brotación en dos de los sitios y producción de numerosos rebrotes preventivos; así como, el mayor incremento del diámetro en dos de los sitios, y altura de los rebrotes dominantes en los tres sitios estudiados. *Acacia dealbata* puede ser utilizada en algunos sitios como especie de monte bajo, para la producción de biomasa dendroenergética, aunque es necesario asegurar la supervivencia en el primer ciclo de corta (tocones vivos) mediante la aplicación de métodos de silvicultura intensiva.

## REFERENCIAS

- Alonso, S., Asensio, V., Casaleiro, A. B. y Montalvo, J. (2008). Control de eucalipto y reforestación con especies caducifolias: innovación y efectos ecológicos. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. (28):37-42.
- Barros, S. (2013). Introducción de especies de *Eucalyptus* a Chile. Reseña histórica. *Ciencia e Investigación Forestal*. 19(3): 69-94.
- Binkley, D. and Stape, J. L. (2004). Sustainable management of *Eucalyptus* plantations in a changing world. In N. Borralho, J. S. Pereira, C. Marques, J. Coutinho, M. Madeira, and M. Tomé (Eds.), *Eucalyptus in a Changing World. Proceedings of an IUFRO Conference, Aveiro, Portugal* (pp. 11-17). Portugal: RAIZ, Instituto Investigação de Floresta e Papel.
- Brassiolo, M. M., Gomez, C. y Abt, M. (2007). Regeneración de un rodal de Tipa blanca utilizando brotes de cepas [Método de Monte Bajo]. *Revista de Ciencia y Tecnología*. 3(3): 44-53.
- Catry, F. X., Moreira, F., Tujeira, R., and Silva, J. S. (2013). Post-fire survival and regeneration of *Eucalyptus globulus* in forest plantations in Portugal. *Forest Ecology and Management*. 310:194-203.
- Domingues, R. M. A., Patinha, D. J. S., Sousa, G. D. A., Villaverde, J. J., Silva, C. M., Freire, C. S. R., and Pascoal-Neto, C. (2011). *Eucalyptus* biomass residues from agroforest and pulping industries as sources of high-value triterpenic compounds. *Cellulose Chemistry and Technology*. 45(7-8): 475-481.
- Esquivel, E., Rubilar, R., Sandoval, S., Acuña, E., Cancino, J., Espinosa, M. y Muñoz, F. (2013). Efecto de plantaciones dendroenergéticas en el carbono a nivel de suelo, en dos suelos contrastantes de la Región de Biobío, Chile. *Revista Árvore*. 37(6): 1135-1144.
- Farinaci, J. S., da-Ferreira L. C., and Batistella, M. (2013). Forest transition and ecological modernization: *eucalyptus* forestry beyond good and bad. *Ambiente & Sociedade*. 16(2): 25-46.
- Ferreira, M., Costa, S., Cavalcante, R., Castro, R., Oliveira, V., Carneiro, A. O., ..., and Pimenta, A. (2017). Biomass and energy production at short rotation *eucalyptus* clonal plantations deployed in rio grande do norte. *Revista Árvore*. 41(5).
- Ferreira, T., Paiva, J. M., and Pinho, C. (2014). Performance assessment of invasive *Acacia dealbata* as a fuel for a domestic pellet boiler. *Chemical Engineering Transactions*. 42(1): 73-78.
- Ferrere, P., Lopez, G. A., Boca, R. T., Galetti, M. A., Esparrach, C. A., and Pathauer, P. S. (2005). Initial

- density effect on *Eucalyptus globulus* growth in a Nelder modified trial. *Forest Systems*. 14(2): 174-184.
- Fuentes, R., Pauchard, A., Cavieres, L., and García, R. (2011). Survival and growth of *Acacia dealbata* vs. native trees across an invasion front in south-central Chile. *Forest Ecology and Management*. 261(6): 1003-1009.
- García, O. and Ruiz, F. (2003). A growth model for eucalypt in Galicia, Spain. *Forest Ecology and Management*. 173(1): 49-62.
- Geldres, E., Shlatter, J. E. y Marcoleta, A. (2004). Monte Bajo, opción para tres especies de Eucaliptos en segunda rotación, un caso en la provincia de Osorno, Décima Región, Chile. *Bosque*. 25(3): 57-62.
- Hamilton, M. G., Dutkowski, G. W., Joyce, K. R., and Potts, B. M. (2011). Meta-analysis of racial variation in *Eucalyptus nitens* and *E. denticulata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 41: 217-230.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*. 83(1): 47-54.
- Mendes, M. and Pala, A. (2003). Type I error rate and power of three normality tests. *Pakistan Journal of Information and Technology*. 2(2): 135-139.
- Moxham, C., Duncan, M., and Moloney, P. (2018). Tree health and regeneration response of Black Box (*Eucalyptus largiflorens*) to recent flooding. *Ecological Management & Restoration*. 19(1): 58-65.
- Novoa, Y., Villaseca, S., Del-Canto, P., Rouanet, J., Sierra, C. y Del-Pozo, A. (1989). *Mapa Agroclimático de Chile*. Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. 221 Pp.
- Oliveira, A., Neves, A., Vinícius, R., Cavalcante, R., Pappaspyrou, L., Pereira, R. y Rocha, B. (2014). Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. *Revista Árvore*. 38(2): 375-381.
- Patiño-Martínez, P. E. (2014). Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. *Innovaciencia*. 2(1): 45-52.
- Quartucci, F., Schweier, J., and Jaeger, D. (2015). Environmental analysis of *Eucalyptus* timber production from short rotation forestry in Brazil. *Journal International of Forest Engineering*. 26(3): 225-239.
- Ramos-Llorente, J. J. (2013). La biomasa se abre camino entre las renovables. *Energética*. 21: 70-71.
- Ríos-Saucedo, J., Acuña-Carmona, E., Cancino-Cancino, J., Rubilar-Pons, R., Corral-Rivas, J. y Rosales-Serna, R. (2017). Dinámica de brotación y densidad básica de la madera en rebrotes de tres especies dendroenergéticas. *Agrociencia*. 51(2): 215-227.
- Rodríguez, A., Cancino, J., Acuña, E., Rubilar, R. y Muñoz, F. (2013). Evaluación del crecimiento de plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus* spp., según densidad de plantación y turno de rotación, en suelos contrastantes de la región del Bío Bío, Chile. *Ciencia e Investigación Forestal INFOR*. 19(1): 7-18.
- Ruiz, F. and Lopez, G. (2010). *Review of cultivation history and uses of eucalypts in Spain*. Conference of *Eucalyptus* species management, history, status and trends in Ethiopia. Addis Ababa, Ethiopia. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/258112099\\_Review\\_of\\_cultivation\\_History\\_and\\_Uses\\_of\\_Eucalypts\\_in\\_Spain](https://www.researchgate.net/publication/258112099_Review_of_cultivation_History_and_Uses_of_Eucalypts_in_Spain). Fecha de consulta: 4 de abril de 2018.
- SAS Institute (2008). SAS/STAT 9.2 User's guide. SAS Institute Cary, NC. [En línea]. Disponible en: <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statugstatmodel/61751/PDF/default/statugstatmodel.pdf>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2014.
- Silva, C. E., Salgado, O. D. y González, B. (2011). Evaluación de la capacidad de rebrotes de dos especies arbóreas en el bosque tropical seco en Nandrola, Pacífico Sur. *La Calera*. 8(11): 57-61.
- Sixto, H., Hernández, M. J., Barrio, M., Carrasco, J., and Cañellas, I. (2008). Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Forest Systems*. 16(3): 277-294.
- Solimani, N. (2011). Evaluation physiographic factors on oak sprout structure in mountain forest of west of Iran. *Advances in Environmental Biology*. 5(9): 2906-2912.
- Turnbull, J. W. (1999). Eucalypt plantations. *New Forests*. 17(1-3): 37-52.
- White, D. A., Beadle, C. L., Worledge, D., and Honeysett, J. L. (2016). Wood production per evapotranspiration was increased by irrigation in plantations of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*. *New Forests*. 47(2): 303-317.