



FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN CONTROLADA APLICADOS AL ESTABLECIMIENTO DE *Pinus radiata* D. DON EN CHILE

CONTROLLED RELEASE FERTILIZERS APPLIED TO *Pinus radiata* D. DON IN CHILE

Javier Reyes-Millalón; Víctor Gerding; Oscar Thiers-Espinoza*

Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Instituto de Silvicultura. Isla Teja s/n. C. P. 5090000. Valdivia, Chile. Correo-e: othiers@uach.cl (*Autor para correspondencia).

Universidad Austral de Chile, Centro de Investigación en Suelos Volcánicos. Isla Teja s/n. C. P. 5090000. Valdivia, Chile.

RESUMEN

El uso de fertilizantes de liberación controlada (FLC) es incipiente y no se han publicado resultados de su uso en Chile. Se evaluó una aplicación de FLC al momento del establecimiento de *Pinus radiata* sobre un suelo ultisol en Valdivia, Chile. El estudio se realizó en tres sitios (año 2006) con variaciones del suelo donde se aplicaron seis tratamientos de FLC (10-20 g-planta⁻¹), un fertilizante tradicional hidrosoluble y un testigo sin fertilizar. Los datos se analizaron en un diseño de bloques al azar. La evaluación (2006-2010) consideró la supervivencia, el crecimiento de los árboles y la cobertura de malezas. La supervivencia fue 84 a 96 %, sin diferencias entre tratamientos ($P > 0.05$). Los FLC produjeron respuestas superiores en crecimiento que el testigo y similares a las del fertilizante hidrosoluble. Los mayores rendimientos de los árboles al cuarto año se obtuvieron con FLC (+42 % factor de producción). Los FLC dieron mejor respuesta con dosis mayores o periodos de liberación más prolongados. La respuesta fue diferente entre sitios, tanto por la estructura del suelo como por su oferta nutritiva. El crecimiento fue mermado con una cobertura de malezas mayor al 30 % en la plantación.

Recibido: 26 de agosto de 2011
Aceptado: 09 de mayo de 2012
doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.08.060
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE: Silvicultura de plantaciones, fertilización, ultisol, cultivo forestal.

ABSTRACT

The use of controlled release fertilizers (CRF) is emerging and there are no published results for their use in Chile. In this study, it was evaluated the use of a CRF at the time of establishment of *Pinus radiata* on an ultisol in Valdivia, Chile. The study was conducted in three different sites with soil variations (2006). Six CRF, a traditional water-soluble fertilizer and a control treatments were applied (10-20 g-plant⁻¹). Data were analyzed in a randomized block design. The evaluation (2006- 2010) considered survival, tree growth and weed covers. The survival was between 84 and 96 %, with no difference between treatments ($P > 0.05$). The CRF growth responses were higher than the control and similar to the water- soluble fertilizer. The highest yields of the trees during the fourth year were obtained with the CRF use (+42% input). The CRF gave better response with higher doses or more prolonged release periods. The response was different between sites, in both, soil structure and its nutrient supply. The growth was diminished with a weed cover higher than 30 % in the plantation.

KEYWORDS: Plantation silviculture, fertilization, ultisol, forest crop

INTRODUCCIÓN

Uno de los periodos más críticos para el desarrollo de las plantaciones forestales es el establecimiento, durante el cual existe una demanda nutritiva creciente (Miller, 1981). Por ello, durante dicho periodo, la fertilización y el control de malezas se utilizan como prácticas silviculturales. La fertilización estimula el crecimiento de los árboles y los hace más competitivos frente a las malezas, lo cual no impide realizar un control adecuado de éstas (Venegas & Palazuelos, 1999). La acción combinada de estas dos prácticas debiera provocar un mejor

INTRODUCTION

Establishment is one of the most critical periods for the development of forest plantations because of the growing nutritional demands (Miller, 1981). Therefore, during this period, fertilization and weed control are used as silvicultural practices. Fertilization stimulates trees growth and makes them more competitive against weeds, which does not prevent their proper control (Venegas & Palazuelos, 1999). The combined action of these two practices should lead to better trees growth, but the results differ depending on the site con-

crecimiento de los árboles; sin embargo, los resultados difieren dependiendo de las condiciones de cada sitio, como se ha observado en *Pinus radiata* D. Don (Gerding & Schlatter, 1988).

En Chile, la fertilización de *P. radiata* se intensificó durante la década de 1990 con la aplicación de fertilizantes hidrosolubles, cuyas dosis dependen de la demanda de los árboles, la oferta nutritiva del suelo y la eficiencia del fertilizante (Álvarez, Rodríguez, & Suárez, 1999). Estos fertilizantes presentan eficiencia baja y variable según el nutrimento y las condiciones del sitio. Por ello, como una buena alternativa a dicho problema se presentan los fertilizantes de liberación controlada (FLC) de tipo recubierto que se utilizan en diversos cultivos, debido a que liberan los nutrimentos de forma gradual (Landis, Dumroese, & Kasten, 2009; Rose, Haase, & Arellano, 2004). Estos fertilizantes están compuestos por un concentrado soluble de nutrimentos, cubierto por una capa insoluble al agua pero con cierta permeabilidad. El polímero que recubre al fertilizante es sensible a los factores ambientales (temperatura y humedad del suelo) y la reacción depende de la tecnología utilizada en cada producto (Jacobs, Salifu, & Seifert, 2005; Landis et al., 2005). Entre las ventajas de los FLC están el suministro de nutrimentos por un tiempo prolongado mediante una sola aplicación, una mayor eficiencia en la entrega de los nutrimentos y menores pérdidas por lixiviación. La tasa de liberación de nutrimentos se puede controlar buscando cubrir la demanda de las plantas con los elementos nutritivos necesarios para ellas (Landis et al., 2009). Por ello, la aplicación de estos fertilizantes se realiza normalmente con dosis inferiores a aquellas de los fertilizantes hidrosolubles tradicionales. Por otra parte, los FLC pueden disminuir el impacto ambiental por lixiviación o volatilización de elementos nutritivos y, dada su relación costo-eficiencia, también son económicamente rentables en muchos cultivos (Erro, Urrutia, San Francisco, & García-Mina, 2007; Iyer, Dobrahner, Lowery, & Vandettey, 2002).

En Chile, el uso de FLC ha sido limitado debido a que el costo por unidad de elemento es superior al de los fertilizantes hidrosolubles tradicionales. Por otra parte, no se han publicado resultados de aplicación forestal en Chile. En cambio, existe información sobre su uso para la producción en otros países, principalmente en viveros (Iyer et al., 2002; Jacobs, Rose, & Haase, 2003; Klooster, Cregg, Fernández, & Nzokou, 2010) y en el establecimiento de plantaciones (Fan, Moore, Shafii, & Osborne, 2002; Haase, Rose, & Trobaug, 2006; Jacobs, 2005; Olier et al., 2009). En estos estudios se ha observado que la aplicación de FLC genera ganancias en crecimiento con respecto a las plantas no fertilizadas o aquellas con fertilizantes hidrosolubles. En el presente trabajo se plantea como hipótesis que en el estableci-

ditions, as observed in *Pinus radiata* D. Don (Gerding & Schlatter, 1988).

In Chile, *P. radiata*'s fertilization was more intense during the 1990's with the application of water-soluble fertilizers, whose doses depend on tree demands, soil nutrient supply and fertilizer efficiency (Álvarez, Rodríguez, & Suárez, 1999). These fertilizers have low and variable efficiency depending on the nutrient and site conditions. Therefore, controlled release fertilizers (CRF) of the coated type are an alternative to this problem as they are used in various crops, because they release nutrients gradually (Landis, Dumroese, & Kasten, 2009; Rose, Haase, & Arellano, 2004). These fertilizers have a soluble nutrient concentrate enclosed by a water insoluble coating but with certain permeability. This polymer coating is sensitive to environmental factors (temperature and soil moisture) and the reaction depend on the technology used on each product (Jacobs, Salifu, & Seifert, 2005; Landis et al., 2005). Among the CRF advantages are: providing nutrients for a long time by a single application, higher efficiency in the nutrients delivery and less leaching losses. The nutrient release rate can be controlled by filling the plants demand with the nutrients needed for them (Landis et al., 2009). Therefore, the application of these fertilizers is normally at lower doses than those for traditional water-soluble fertilizers. Furthermore, the CRF can reduce leaching or volatilization of nutrients of environmental impact, and given their cost-effectiveness, they are also cost-effective in many crops (Erro, Urrutia, San Francisco & García-Mina, 2007; Iyer, Dobrahner, Lowery, & Vandettey, 2002).

The CRF's use in Chile has been limited because the cost per unit item exceeds that of traditional soluble fertilizers. Moreover, there are no published data related to their forest use in Chile. However, there is plenty of information on CRF's use for production in other countries, mainly in nurseries (Iyer et al., 2002; Jacobs, Rose, & Haase, 2003; Klooster, Cregg, Fernández, & Nzokou, 2010) and in the plantations establishment (Fan, Moore, Shafii, & Osborne, 2002; Haase, Rose, & Trobaug, 2006; Jacobs, 2005; Olier et al., 2009). In these previous reports, it has been observed that the use of CRFs has generated gains in growth compared to non-fertilized plants or in those with only water-soluble fertilization. The hypothesis of the present study is that in the *P. radiata* establishment, the application of controlled release fertilizers in small doses is equally or more effective than the use of traditional water-soluble fertilizers, considering applied doses of similar cost between both fertilizers. Therefore, within the framework of a four-year study, the objectives of this study were to evaluate the survival and trees development with different treatments of controlled release fertilizers and traditional fertilization, and deduce the influence of the test sites on the treatment effects.

miento de *P. radiata*, la aplicación de fertilizantes de liberación controlada en dosis pequeñas es tanto o más efectiva que la adición de fertilizantes hidrosolubles tradicionales, considerando dosis aplicadas de costo similar entre ambos fertilizantes. Por ello, en el marco de un ensayo de cuatro años, los objetivos de este estudio fueron evaluar la supervivencia y desarrollo de los árboles con tratamientos distintos de fertilizantes de liberación controlada y una fertilización tradicional, e inferir la influencia de los sitios del ensayo en el efecto de los tratamientos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El ensayo fue establecido en tres sitios cercanos a la ciudad de Valdivia, Chile: Las Palmas-1 (39° 44' 45.91" S - 73° 08' 40.83" O, 95 m), Las Palmas-2 (39° 44' 46.37" S - 73° 09' 05.84" O, 85 m) y Los Pinos (39° 44' 21.15" S - 73° 10' 48.66" O, 156 m). En Los Pinos se habilitó una pradera con pocos residuos leñosos; en Las Palmas, las plantaciones se establecieron en áreas con desechos ordenados en fajas de una cosecha reciente de *Pinus elliotii* Engelm (Las Palmas-1) y *P. radiata* (Las Palmas-2).

Según la clasificación de Köppen, el clima es templado lluvioso con influencia mediterránea, con precipitación anual de 2,000 - 2,500 mm concentrada principalmente en los meses de invierno. La temperatura media anual es de 12.2 °C; la máxima media mensual de 23.3 °C (enero) y la mínima media mensual de 4.6 °C (agosto) (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIA], 1989). Los suelos son Typic Paleudult de la serie Los Ulmos (Centro de Investigación de Recursos Naturales [CIREN], 2001), originados de cenizas volcánicas antiguas depositadas sobre esquistos metamórficos y frecuentemente enriquecidos con otros materiales de transporte eólico. El perfil de suelo en cada sitio fue caracterizado según Schlatter, Grez, y Gerding (2003). De acuerdo con estos autores, mediante la prueba de textura al tacto, los tres suelos son francos arcillosos en la superficie y arcillosos francos en la profundidad, coincidiendo con la descripción de CIREN (2001). En los tres sitios el suelo fue profundo y presentó drenaje interno moderado en todo el perfil. La densidad aparente es similar a lo largo del perfil y entre sitios, con un rango de 0.8 a 0.9 g·cm⁻³.

En Los Pinos, el ensayo se realizó en una cumbre con una pendiente (0-13 %) expuesta a los vientos del noroeste dominantes de la zona. La morfología del suelo es: A (0-16 cm), color 5YR3/2, estructura subpoliédrica; BA (16-33 cm), color 5YR3/4, estructura subpoliédrica; B1 (33-60 cm), color 5YR4/4, estructura masiva; B2 (60-170+ cm), color 5YR4/4, estructura masiva. La consistencia del suelo varía de firme a friable y presenta

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study was conducted in three different sites near the city of Valdivia, Chile: Las Palmas- 1 (39° 44' 45.91" S - 73° 08' 40.83" W, 95 m), Las Palmas- 2 (39° 44' 46.37" S - 73° 09' 05.84" W, 85 m) and Los Pinos (39° 44' 21.15" S - 73° 10' 48.66" W, 156 m). A meadow with woody debris was enabled in Los Pinos; in Las Palmas, plantations were established in areas with ordered waste strips of a recent harvest of *Pinus elliotii* Engelm. (Las Palmas- 1) and *P. radiata* (Las Palmas- 2).

According to Köppen classification, the climate is temperate rainforest with Mediterranean influence, with an annual rainfall of 2,000 - 2,500 mm mainly during the winter months. The annual average temperature is 12.2 °C, the maximum monthly average is 23.3 °C (January) and the mean monthly minimum is 4.6 °C (August) (National Agricultural Research Institute [INIA], 1989). Soils are Typic Paleudult from Los Ulmos series (Research Center of Natural Resources [CIREN], 2001), originated from ancient volcanic ash deposited on metamorphic schists and often enriched with other aeolian transported materials. The soil profile at each site was characterized as Schlatter, Grez, and Gerding (2003) suggested. According to these authors, by feeling the texture, the three soils are clay loams on the surface and clayey in depth, coinciding with the description of CIREN (2001). At all three sites, the soil was deep and showed moderate internal drainage throughout the profile. The bulk density was similar throughout the profile and between sites, ranging from 0.8 to 0.9 g·cm⁻³.

In Los Pinos, the assay was performed in a summit with a slope (0-13 %) exposed to the prevailing north-western winds in the area. The morphology of the soil was: A (0-16 cm), 5YR3/2 color, subpolyhedral structure; BA (16-33 cm), 5YR3/4 color, subpolyhedral structure; B1 (33-60 cm), 5YR4/4 color, massive structure; B2 (60-170 + cm), 5YR4/4 color, massive structure. Soil consistency varied from firm to friable and showed a 15 % of organic matter in the A horizon. The BA horizon was compacted (penetration resistance: 3-3.5 kg·cm⁻², and in the other horizons: < 2 kg·cm⁻²). Fine roots content was from medium to low. The external drainage was moderate and the available water capacity reached 201 mm and was estimated up to a meter deep as Schlatter et al. (2003) suggested. Las Palmas- 1 was located in a summit with a 2 % slope. The soil horizons sequence was: A (0-10 cm), 5YR3/2 color, subpolyhedral structure; AB (10-26 cm), 5YR3/3 color, subpolyhedral structure; BA (26-40 cm), 5YR4/4-4/3 color, subpolyhedral to massive structure; B (40-180 + cm), 5YR4/4 color, massive structure. Soil consistency varied from firm to friable and

15 % de materia orgánica en el horizonte A. El suelo BA se encontraba compactado (resistencia a la penetración: $3\text{--}3.5\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$, y en los demás horizontes: $< 2\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$). El contenido de raíces finas es de mediano a poco. El drenaje externo es moderado y la capacidad de agua aprovechable, estimada hasta un metro de profundidad según Schlatter et al. (2003), alcanza 201 mm. Las Palmas-1 se situó en una cumbre con una pendiente de 2 %. El suelo presenta la secuencia de horizontes: A (0-10 cm), color 5YR3/2, estructura subpoliédrica; AB (10-26 cm), color 5YR3/3, estructura subpoliédrica; BA (26-40 cm), color 5YR4/4-4/3, estructura masiva a subpoliédrica; B (40-180+ cm), color 5YR4/4, estructura masiva. La consistencia del suelo varía de firme a friable y presenta 17 % de materia orgánica en el horizonte A. El contenido de raíces es denso en la superficie y mediano en la profundidad. El drenaje externo es lento y la capacidad de agua aprovechable, estimada hasta un metro de profundidad, es de 235 mm. La resistencia a la penetración fluctuó entre 1 y $1.5\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$. Las Palmas-2 se ubicó en una ladera alta con pendiente de 25 %. La secuencia de horizontes del suelo es: A (0-18 cm), color 5YR2.5/2 estructura subpoliédrica; AB (18-40 cm), 5YR4/3, estructura subpoliédrica; B (40-175+ cm), color 5YR4/4, estructura masiva. La consistencia del suelo varía de friable a firme y presenta 13 % de materia orgánica en el horizonte A. El contenido de raíces es denso en la superficie y mediano en la profundidad. El drenaje externo es rápido y la capacidad de agua aprovechable, estimada hasta un metro de profundidad, es de 238 mm. La resistencia a la penetración varió entre 1 y $1.5\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

En el Cuadro 1 se reporta un análisis químico del suelo superficial siguiendo las técnicas de Sadzawka et al. (2006). En dicho cuadro se aprecia que los suelos de los tres sitios presentan un adecuado nivel de nitrógeno y baja disponibilidad de fósforo. La tendencia es de mejor oferta nutritiva en Las Palmas-1 y condiciones nutricionales menos favorables en Los Pinos.

Establecimiento del ensayo

El ensayo se inició en septiembre del año 2006 utilizando plantas de *P. radiata* a raíz desnuda provenientes de cruzamientos controlados (Vergara, Ipinza, & Pérez, 1995). Las plantas seleccionadas al momento del establecimiento tenían altura entre 25 y 30 cm, diámetro de cuello de 4 a 6 mm y sin bifurcación en la mitad inferior del tallo. Se aplicaron ocho tratamientos: seis de fertilizantes de liberación controlada (A-F) con dosis entre 10 y $20\text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$, diferenciados por periodos de liberación de nutrimentos (tres, seis y nueve meses); un tratamiento con fertilizantes hidrosolubles tradicionales (G) cuya dosis se estimó según el método racional de la oferta del suelo y la demanda de las planta (Álvarez et al., 1999); y

showed 17 % of organic matter in the A horizon. The root content was dense on the surface and medium in depth. The external drainage was slow and available water capacity was of 235 mm (estimated up to one meter deep). The penetration resistance ranged between 1 and $1.5\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$. Las Palmas-2 was located on a high hill with a 25 % slope. The soil horizon sequence was: A (0-18 cm), 5YR2.5/2 color, subpolyhedral structure; AB (18-40 cm), 5YR4/3 color, subpolyhedral structure; B (40-175+ cm), 5YR4/4 color, massive structure. Soil consistency varied from friable to firm and showed a 13 % of organic matter in the A horizon. The root content was dense on the surface and medium in depth. The external drainage was fast and the available water capacity was of 238 mm (estimated up to one meter deep). The penetration resistance varied between 1 and $1.5\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Table 1 shows a chemical analysis of the superficial soil following Sadzawka et al. (2006) techniques. It can be observed that the soils of the three sites have adequate nitrogen levels and low phosphorus availability. The best nutritional conditions are in Las Palmas-1 and the less favorable in Los Pinos.

Trial establishment

The trial began in September 2006 using *P. radiata* plants with bare root from controlled crosses (Vergara, Ipinza, & Pérez, 1995). The selected plants were between 25-30 cm height at the time of establishment, 4-6 mm collar diameter and without bifurcation in the lower half of the stem. Eight treatments were applied: six of controlled release fertilizers (A-F) with doses between 10 and $20\text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$, differentiated by nutrient release periods (three, six and nine months); a treatment with traditional water soluble fertilizers (G), whose dose was estimated according to the plants soil supply and demand method (Álvarez et al., 1999); and a control unfertilized treatment (H) (Table 2). The treatments doses of the controlled release fertilizers were determined considering a cost no higher than the traditional water-soluble fertilizers.

Each treatment consisted of a 49 plants plot plus an edge row (32 additional plants) with a $3 \times 2\text{ m}$ spacing. The CRF were applied in the planting hole walls. A portion of the fertilizer was stuck in the walls and another part was at the bottom of the hole, keeping contact with the roots at all times. The traditional fertilizer was applied in two holes that were located at 15 cm from the plant without contact with the roots, to avoid toxicity in them.

In August 2006, a pre-plant chemical weed control throughout the trial area was performed, it was done by applying the systemic and non-selective glyphosate herbicide ($1,440\text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$) and the selective grass herbicides triclopyr ($45\text{ mL}\cdot\text{ha}^{-1}$) and fluroxypyr ($15\text{ mL}\cdot\text{ha}^{-1}$). Later on (January-February 2007), a mixture of the atrazine

CUADRO 1. Análisis químico de los suelos en los primeros 20 cm de profundidad.

Elementos	Los Pinos	Las Palmas-1	Las Palmas-2
pH H ₂ O	5.53 b	5.58 b	5.69 c
pH KCl	4.45 b	4.40 b	4.63 b
C total (%)	7.8 d	6.5 d	7.7 d
N total (%)	0.41 d	0.29 c	0.31 c
C/N	19.1 b	22.6 c	24.7 c
P Olsen (mg·kg ⁻¹)	2.4 a	2.2 a	2.4 a
Al extraíble (mg·kg ⁻¹)	1,660 d	1,180 d	1,930 d
Fe (mg·kg ⁻¹)	174 e	156 e	183 e
Mn (mg·kg ⁻¹)	53 d	72 d	34 d
Cu (mg·kg ⁻¹)	5.9 c	4.7 c	4.8 c
Zn (mg·kg ⁻¹)	1.1 c	1.5 c	0.7 c
B (mg·kg ⁻¹)	0.6 c	0.6 c	0.4 b
S (mg·kg ⁻¹)	21 d	13 c	21 d
Na [cmol(+).kg ⁻¹]	0.10 a	0.11 a	0.10 a
K [cmol(+).kg ⁻¹]	0.37 c	0.52 c	0.30 c
Ca [cmol(+).kg ⁻¹]	2.01c	3.88 d	2.28 c
Mg [cmol(+).kg ⁻¹]	0.66 c	1.23 d	0.62 c
Al intercambiable en KCl [cmol(+).kg ⁻¹]	0.51c	0.47 c	0.31 c
Suma de bases [cmol(+).kg ⁻¹]	3.15 b	5.73c	3.30 b
*CICE [cmol(+).kg ⁻¹]	3.65 b	6.20 c	3.61 b
Saturación Al (%)	14.0 d	7.5 c	8.7 c

*CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva. Letra contigua al valor de la variable indica niveles de referencia: a = muy bajo; b = bajo; c = medio; d = alto; e = muy alto. Fuente: Rodríguez (1991).

TABLE 1. Soils chemical analysis within the first 20 cm depth.

Chemical soil determinations	Los Pinos	Las Palmas-1	Las Palmas-2
H ₂ O pH	5.53 b	5.58 b	5.69 c
KCl pH	4.45 b	4.40 b	4.63 b
Total C (%)	7.8 d	6.5 d	7.7 d
Total N (%)	0.41 d	0.29 c	0.31 c
C/N	19.1 b	22.6 c	24.7 c
P Olsen (mg·kg ⁻¹)	2.4 a	2.2 a	2.4 a
Al extractable (mg·kg ⁻¹)	1,660 d	1,180 d	1,930 d
Fe (mg·kg ⁻¹)	174 e	156 e	183 e
Mn (mg·kg ⁻¹)	53 d	72 d	34 d
Cu (mg·kg ⁻¹)	5.9 c	4.7 c	4.8 c
Zn (mg·kg ⁻¹)	1.1 c	1.5 c	0.7 c
B (mg·kg ⁻¹)	0.6 c	0.6 c	0.4 b
S (mg·kg ⁻¹)	21 d	13 c	21 d
Na [cmol(+).kg ⁻¹]	0.10 a	0.11 a	0.10 a
K [cmol(+).kg ⁻¹]	0.37 c	0.52 c	0.30 c
Ca [cmol(+).kg ⁻¹]	2.01c	3.88 d	2.28 c
Mg [cmol(+).kg ⁻¹]	0.66 c	1.23 d	0.62 c
Al exchangeable in KCl [cmol(+).kg ⁻¹]	0.51c	0.47 c	0.31 c
Bases sum [cmol(+).kg ⁻¹]	3.15 b	5.73c	3.30 b
*ECEC [cmol(+).kg ⁻¹]	3.65 b	6.20 c	3.61 b
Al saturation (%)	14.0 d	7.5 c	8.7 c

*ECEC: effective cation exchange capacity. Letter next to variable indicates the value of reference levels: a = very low; b = low; c = medium; d = high; e = very high. Source: Rodríguez (1991).

un tratamiento testigo sin fertilizar (H) (Cuadro 2). Las dosis de los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada fueron determinadas considerando un costo no superior al de los fertilizantes hidrosolubles tradicionales.

Cada tratamiento estuvo constituido por una parcela de 49 plantas más una hilera de borde (32 plantas adicionales), con un espaciamiento de 3 x 2 m. Los FLC fueron aplicados en las paredes del hoyo de plantación. Una porción del fertilizante quedó adherido a las paredes y otra en el fondo del hoyo, manteniendo contacto con las raíces. El fertilizante tradicional fue aplicado en dos hoyos que se encontraban a una distancia de 15 cm de la planta sin contacto con las raíces, para evitar toxicidad en ellas.

En agosto de 2006 se realizó el control químico de malezas preplantación en toda el área del ensayo,

(2.5 %), clopyralid acid (0.5 %) and haloxyfop-R methyl ester (2 %) herbicides was applied around each tree, with 120 L·ha⁻¹ wetting. The applications were made manually done with a knapsack sprayer.

Trial Evaluation Methodology

Measurements were carried out from 2006 to 2010 (up to 46 months after the plantation establishment). The variables evaluated were: survival; total height (TH, m); diameter at breast height (DBH, cm); production factor ([PF = (DBH² * OH) / 10], dm³); up to 32 months the root collar diameter (RCD, mm) was used instead of the DBH; total basal area (TBA, m²·ha⁻¹) and crown volume ([CV = (p/12) (crown diameter)² (TH)], dm³). A foliage chemical analysis was performed as Sadzawka et al. (2007) recommended; the sampling was conducted in June 2008 according to Schlatter et al. (2003). Foliage

CUADRO 2. Dosis de fertilizantes y elementos nutritivos (g·planta⁻¹) aplicados en plantaciones de *P. radiata*.

Tratamiento	Productos	Dosis de fertilizante	N	P	K	Mg	Ca	S	B
A	Basacote Plus 3M	10	1.6	0.35	1.0	0.12	-	-	-
B	Basacote Plus 6M	10	1.6	0.35	1.0	0.12	-	-	-
C	Basacote Plus 6M	15	2.4	0.52	1.5	0.18	-	-	-
D	Basacote Plus 9M	10	1.6	0.35	1.0	0.12	-	-	-
E	Basacote Plus 9M	20	3.2	0.70	2.0	0.24	-	-	-
F	Starter:								
	Basacote Plus 6M	10	1.6	0.35	1.0	0.12	-	-	-
	Fosfato diamónico	10	1.8	2.01	-	-	-	-	-
G	Fertilización tradicional:								
	Nitromag	37	10.0	-	-	1.11	1.84	-	-
	Superfosfato triple	40	-	8.0	-	-	5.68	0.4	-
	Boronatrocálcita	10	-	-	-	-	-	-	0.13
H	Testigo sin fertilizar	-	-	-	-	-	-	-	-

M= Meses

TABLE 2. Types and doses of fertilizers (g·plant⁻¹) applied to *P. radiata* plantations.

Treatment	Products	Fertilizer doses	N	P	K	Mg	Ca	S	B
A	Basacote Plus 3M	10	1.6	0.35	1.0	0.12	-	-	-
B	Basacote Plus 6M	10	1.6	0.35	1.0	0.12	-	-	-
C	Basacote Plus 6M	15	2.4	0.52	1.5	0.18	-	-	-
D	Basacote Plus 9M	10	1.6	0.35	1.0	0.12	-	-	-
E	Basacote Plus 9M	20	3.2	0.70	2.0	0.24	-	-	-
F	Starter:								
	Basacote Plus 6M	10	1.6	0.35	1.0	0.12	-	-	-
	Diammonium phosphate	10	1.8	2.01	-	-	-	-	-
G	Traditional fertilization:								
	Nitromag	37	10.0	-	-	1.11	1.84	-	-
	Triple superphosphate	40	-	8.0	-	-	5.68	0.4	-
	Boronatrocálcite	10	-	-	-	-	-	-	0.13
H	Control without fertilization	-	-	-	-	-	-	-	-

M= Months

aplicando el herbicida sistémico y no selectivo glifosato ($1,440 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$) y los herbicidas selectivos de gramíneas triclopir ($45 \text{ mL} \cdot \text{ha}^{-1}$) y fluroxipir ($15 \text{ mL} \cdot \text{ha}^{-1}$). Posteriormente (enero-febrero, 2007), en torno a cada árbol, se aplicó una mezcla de los herbicidas atrazina (2.5 %), ácido clopyralid (0.5 %) y haloxifop-R ester metílico (2 %), con mojamiento de $120 \text{ L} \cdot \text{ha}^{-1}$. Las aplicaciones se realizaron de forma manual con una bomba de mochila.

Metodología de evaluación del ensayo

Las mediciones se realizaron durante el periodo 2006-2010 (hasta los 46 meses del establecimiento de la plantación). Las variables evaluadas fueron: supervivencia; altura total (At, m); diámetro a la altura del pecho (DAP, cm); factor de producción ($[FP = (DAP^2 \cdot At)/10]$, dm^3), hasta los 32 meses se utilizó el diámetro de cuello (DC, mm) en vez de DAP; área basal total (ABT, $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) y volumen de copa ($[VC = (\pi/12) (\text{diámetro de copa})^2 (At)]$, dm^3). También se realizó un análisis químico del follaje según Sadzawka et al. (2007); el muestreo se efectuó en junio de 2008, según Schlatter et al. (2003). La recolección de follaje se realizó al final del segundo periodo vegetativo, un año después del periodo máximo de liberación (nueve meses) de los FLC.

El control de malezas se evaluó con el fin de determinar si la presencia de éstas tuvo influencia en la respuesta de las plantas a los fertilizantes. La cobertura de las malezas se midió considerando una superficie de 1 m^2 en cada árbol. En esta misma superficie se midió la altura de las malezas representativas (mayor cobertura). Con los datos de altura y cobertura se obtuvo la variable volumen.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron en un diseño de bloques al azar mediante análisis de varianza de un factor, a nivel general y por sitio, para las variables de At, DAP, FP, ABT y supervivencia de *P. radiata*, y para la presencia de malezas (cobertura, altura y volumen). Previo al análisis, los datos de supervivencia fueron transformados con la función supervivencia = $\arcsen p^{1/2}$, donde p es la proporción de supervivencia (Sokal & Rohlf, 1979). También se realizó la prueba de multicomparación de medias de Scheffé con 95 % de confiabilidad ($P < 0.05$), para identificar las diferencias significativas entre tratamientos. Para observar la relación de dependencia entre el crecimiento de los árboles y la maleza, se ajustó una función de regresión (R^2 , $P < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos de la fertilización

En el Cuadro 3 se observa que la supervivencia de los árboles en los tres sitios fue alta, desde 84 % hasta 95.9 %, sin diferencias significativas entre tratamientos

collection was done at the end of the second growing season, a year after the CRF maximum release period (nine months).

Weed control was evaluated to determine if their presence influenced the response of plants to fertilizers. Weed coverage was measured considering an area of 1 m^2 in each tree. In this same area the representative weed height was measured (more coverage). Volume was obtained from the height and coverage data.

Statistical Analysis

Data were analyzed in a randomized block design using variance analysis for one factor (ANOVA), in a general and site level, for the variables TH, DBH, PF, TBA, *P. radiata* survival and for weeds presence (coverage, height and volume). Prior to the analysis, the survival data were processed with the survival function = $\arcsin p^{1/2}$, where p is the survival proportion (Sokal & Rohlf, 1979).

In order to identify significant differences between treatments, a Scheffé mean multicomparison test with 95 % confidence ($P < 0.05$) was performed. Additionally, a regression function was adjusted (R^2 , $P < 0.05$) to observe the dependency relationship between the trees and weeds growth.

RESULTS AND DISCUSSION

Fertilization effects

Table 3 shows that the trees survival was high at the three different sites, from 84 to 95.9 %, with no significant differences between treatments ($P < 0.05$). Regardless of the treatment, this high survival rate showed that there was no fertilizer toxicity effect. This is especially important with those CRF because they were in direct contact with the roots.

The joint analysis of the three sites indicated that the DBH, TH, TBA and PF showed a good level of plants growth (Table 3). In all treatments the PF reached higher levels than in the control ($P < 0.05$), except for A and C. The F (Starter) showed the best treatment response, being 42 % higher than the control. The same trend was found in the other variables. It is also important to mention the high variability of the response to treatment between sites.

Trees with traditional fertilizer (Table 3) responded similarly to that reported for *P. radiata* in the same area of study (Valdivia) (Albaugh, Rubilar, Álvarez, & Allen, 2004; Gerding, Schlatter, & Barriga, 1986). However, some treatments with CRF showed higher performance and efficiency with small doses (Table 2) yielding performances similar to those obtained with traditional fertilizer applications. Given the small doses used, although the CRFs would be 100 % efficient, the number of elements

CUADRO 3. Supervivencia y variables dasométricas según tratamiento en *Pinus radiata* al cuarto año de crecimiento (media $\pm$ S).

Tratamiento	Supervivencia (%)	DAP (cm)	Altura total (m)	Factor de producción (dm ³ ·árbol ⁻¹)	Área basal total (m ² ·ha ⁻¹)
A	93.2 $\pm$ 10.0 a	7.3 $\pm$ 0.5 bc	5.2 $\pm$ 0.4 ab	30.0 $\pm$ 6.5 bc	6.8 $\pm$ 0.9 bc
B	95.2 $\pm$ 2.0 a	7.9 $\pm$ 0.7 ab	5.2 $\pm$ 0.6 ab	34.1 $\pm$ 8.8 ab	7.8 $\pm$ 1.3 ab
C	84.0 $\pm$ 9.0 a	7.3 $\pm$ 1.0 bc	5.0 $\pm$ 0.7 bc	29.5 $\pm$ 10.6 bc	6.8 $\pm$ 1.8 bc
D	91.2 $\pm$ 3.0 a	7.7 $\pm$ 1.1 ab	5.2 $\pm$ 0.7 ab	33.6 $\pm$ 12.8 ab	7.6 $\pm$ 2.0 ab
E	92.5 $\pm$ 4.0 a	7.9 $\pm$ 0.8 a	5.3 $\pm$ 0.6 a	36.0 $\pm$ 9.2 a	8.0 $\pm$ 1.3 a
F	95.2 $\pm$ 1.0 a	8.2 $\pm$ 1.3 a	5.3 $\pm$ 0.7 a	38.5 $\pm$ 15.2 a	8.5 $\pm$ 2.4 a
G	93.2 $\pm$ 7.0 a	7.9 $\pm$ 0.8 a	5.2 $\pm$ 0.5 ab	34.6 $\pm$ 10.0 ab	7.9 $\pm$ 1.6 a
H	95.9 $\pm$ 2.0 a	7.1 $\pm$ 1.2 c	4.8 $\pm$ 0.7 c	27.1 $\pm$ 11.3 c	6.4 $\pm$ 2.0 c

Valores con la misma letra en una columna no difieren significativamente según la multicomparación de medias de Scheffé ($P < 0.05$). $\pm$ Desviación estándar de la media.

TABLE 3. Survival and mensuration variables according to *Pinus radiata* treatment in the fourth year of growth (mean $\pm$ S).

Treatment	Survival (%)	DBH (cm)	Total height (m)	Production factor (dm ³ ·tree ⁻¹)	Total basal area (m ² ·ha ⁻¹)
A	93.2 $\pm$ 10.0 a	7.3 $\pm$ 0.5 bc	5.2 $\pm$ 0.4 ab	30.0 $\pm$ 6.5 bc	6.8 $\pm$ 0.9 bc
B	95.2 $\pm$ 2.0 a	7.9 $\pm$ 0.7 ab	5.2 $\pm$ 0.6 ab	34.1 $\pm$ 8.8 ab	7.8 $\pm$ 1.3 ab
C	84.0 $\pm$ 9.0 a	7.3 $\pm$ 1.0 bc	5.0 $\pm$ 0.7 bc	29.5 $\pm$ 10.6 bc	6.8 $\pm$ 1.8 bc
D	91.2 $\pm$ 3.0 a	7.7 $\pm$ 1.1 ab	5.2 $\pm$ 0.7 ab	33.6 $\pm$ 12.8 ab	7.6 $\pm$ 2.0 ab
E	92.5 $\pm$ 4.0 a	7.9 $\pm$ 0.8 a	5.3 $\pm$ 0.6 a	36.0 $\pm$ 9.2 a	8.0 $\pm$ 1.3 a
F	95.2 $\pm$ 1.0 a	8.2 $\pm$ 1.3 a	5.3 $\pm$ 0.7 a	38.5 $\pm$ 15.2 a	8.5 $\pm$ 2.4 a
G	93.2 $\pm$ 7.0 a	7.9 $\pm$ 0.8 a	5.2 $\pm$ 0.5 ab	34.6 $\pm$ 10.0 ab	7.9 $\pm$ 1.6 a
H	95.9 $\pm$ 2.0 a	7.1 $\pm$ 1.2 c	4.8 $\pm$ 0.7 c	27.1 $\pm$ 11.3 c	6.4 $\pm$ 2.0 c

Values with the same letter in a column do not differ significantly by Scheffé's mean multicomparison ($P < 0.05$). $\pm$ Mean standard deviation.

($P < 0.05$). Esta alta tasa de supervivencia, independientemente del tratamiento, demuestra que no hubo efecto de toxicidad de los fertilizantes. Esto es especialmente importante con aquellos de liberación controlada porque estuvieron en contacto directo con las raíces.

El análisis conjunto de los tres sitios indicó que el DAP, At, ABT y FP presentaron un buen nivel de crecimiento en las plantas (Cuadro 3). El FP en todos los tratamientos, con excepción del A y el C, alcanzó niveles mayores que en el testigo ($P < 0.05$). El tratamiento con mejor respuesta fue el F (Starter), siendo 42 % superior que el testigo. La misma tendencia se encontró en las otras variables. También destaca la alta variabilidad de la respuesta a los tratamientos entre sitios.

Los árboles con fertilizante tradicional (Cuadro 3) respondieron en forma similar a lo reportado para *P. radiata* en la misma zona de estudio (Valdivia) (Albaugh, Rubilar, Álvarez, & Allen, 2004; Gerding, Schlatter, & Barriga, 1986). Sin embargo, algunos tratamientos con FLC permitieron mayor rendimiento y eficiencia con pequeñas dosis (Cuadro 2) alcanzando desempeños similares a los obtenidos con la aplicación del fertilizante tradicional. Aunque los FLC tuviesen 100 % de eficiencia, dadas las pequeñas dosis aplicadas, la cantidad de elementos

that the plant would receive would be less than those obtained with traditional fertilizers (which has efficiency levels close to 50 % in nitrogen and 10 % in phosphorus in these type of soils (Typic Paleudult) (Rodríguez, Pinochet, & Matus, 2001). The high efficiency of CRFs would be given by their delivery system, where the plant responds better to regular small amounts than to a higher amount at the beginning of the growth period.

The trees growth with some CRF treatments was as high as those with traditional fertilization, exceeding the results observed by Gerding et al. (1986) in the same soil type. However, these increases are lower than those observed by Albaugh et al. (2004) at the third year in a site with young volcanic ash soil (Mesic Typic Haploxerand), which is more fertile than the one used for this study.

The best treatments with controlled release fertilizers have common characteristics: the highest dose applied (20 g·tree⁻¹) and the highest release period (nine months) (Table 3). Differences between a long period of release of nutrients treatment with a higher doses (20 g·tree⁻¹) treatment, indicate that the effect of the dose is more relevant than the period of release. In our case, a higher dose had a positive effect, although it must be considered that a very high dose could affect the growth and

que recibiría la planta sería menor que con el fertilizante tradicional, el cual tiene niveles de eficiencia cercanos al 50 % en nitrógeno y 10 % en fósforo en este tipo de suelos (Typic Paleudult) (Rodríguez, Pinochet, & Matus, 2001). La alta eficiencia de los FLC estaría dada por su sistema de entrega, donde la planta responde mejor a pequeñas cantidades periódicas que frente a una mayor cantidad al inicio del periodo de crecimiento.

El crecimiento de los árboles con algunos tratamientos de FLC fue tan alto como aquellos con fertilización tradicional, superando los resultados observados por Gerdling et al. (1986) en el mismo tipo de suelo. En cambio, estos crecimientos son menores a los observados por Albaugh et al. (2004) al tercer año en un sitio con suelo de cenizas volcánicas jóvenes (Mesic Typic Haploxerand), el cual tiene mayor fertilidad que el de esta investigación.

Los mejores tratamientos con fertilizantes de liberación controlada tienen características comunes, la mayor dosis aplicada ($20 \text{ g} \cdot \text{árbol}^{-1}$) y el mayor periodo de liberación (nueve meses) (Cuadro 3). Las diferencias entre los tratamientos del mayor periodo de liberación de nutrientes en favor de aquel con mayor dosis ($20 \text{ g} \cdot \text{árbol}^{-1}$) indicarían que el efecto de la dosis es más relevante que el periodo de liberación. En nuestro caso, una dosis mayor tuvo un efecto positivo, aunque se debe considerar que una cantidad muy elevada también podría afectar el crecimiento y supervivencia de las plantas (Jacobs et al., 2003; Klooster et al., 2010).

El éxito del tratamiento F (Starter, periodo de liberación de seis meses) puede explicarse por una dosis mayor y por su composición química que aportan gran cantidad de fósforo con respecto a los demás fertilizantes de liberación controlada (Cuadro 2), ya que es el elemento más deficitario de los suelos (Cuadro 1) (Rodríguez, 1991). El fósforo es un elemento nutritivo que induce un desarrollo radical mayor, el cual participa en la absorción de nutrientes (Vance, Uhde-Stone, & Allan, 2003; Zerihun & Montagu, 2004). El efecto de la fertilización con fósforo puede generar notables diferencias en el crecimiento de las plantaciones, especialmente en suelos cuyas propiedades químicas los inducen a tener tasas altas de retención de este elemento (Trichet et al., 2009).

En el Cuadro 4 se puede observar que, de acuerdo con el análisis químico foliar, *P. radiata* tuvo, en general, un buen estado nutritivo al segundo año en todos los casos. Casi todos los macroelementos mostraron niveles satisfactorios a excepción del fósforo y el magnesio. El fósforo presentó niveles bajos ocasionando que la relación N/P fuera inadecuada (alta) y el magnesio presentó un nivel marginal (Will, 1985). En cambio, todos los microelementos presentaron niveles adecuados.

El estado nutritivo para las plantas en su segunda temporada de crecimiento no difiere en gran medi-

plant survival (Jacobs et al., 2003; Klooster et al., 2010).

The treatment F success (Starter, six months release period), may be explained by a higher dose and chemical composition that provide large amount of phosphorus with respect to other controlled release fertilizers (Table 2), since it is the more scarce element in soils (Table 1) (Rodríguez, 1991). Phosphorus is a nutritional element that induces root development, which is involved in the nutrients absorption (Vance, Uhde-Stone, & Allan, 2003; Zerihun & Montagu, 2004). The fertilization effect with phosphorus can result in significant differences in the plantations growth, especially in soils whose chemical properties induce them to have high retention rates of this element (Trichet et al., 2009).

Table 4 shows that in accordance with the foliar chemical analysis, *P. radiata* was, overall, in good nutritional status for the second year in all cases. Almost all macroelements showed satisfactory levels except phosphorus and magnesium. Phosphorus showed low levels causing the N/P ratio was inadequate (high) and magnesium showed a marginal level (Will, 1985). On the other hand, all microelements showed adequate levels.

The nutritional status for plants in their second season of growth does not differ significantly between treatments, although it is noted that the unfertilized control tends to have a lower nutritional value (Table 4). However, these slight differences between treatments do not explain the difference in tree growth, as their nutritional status is mostly in a satisfactory or good interval, except for phosphorus and magnesium. Such growth differences may be due to the initial stimulus generated by the fertilizers application in the nursery, where they use additional nutrients than those naturally present in soil (Haase et al., 2006; Olliet et al., 2009). However, from the second season the plants just stocked up from soil nutrients supply and, therefore, they showed nutritional homogeneity between treatments.

Over the time, it was observed a typical exponential trees growth, as evidenced by the production factor (Figure 1). With the fertilizer treatments, there was a higher growth from the first year. The trend indicates that with the use of controlled release fertilizers there is a similar growth to that with traditional fertilizers, but higher than the control. In terms of percentages, the differences in growth of the best treatments compared to the control were lower in the last two seasons. According to Albaugh et al. (2004), this is a situation where growth gains are partially lost because the plantations growth curves, both fertilized and unfertilized, converge at a future point (Miller, 1981). Therefore, the growth gains from fertilization must be exploited before the growth of fertilized trees will decay to the unfertilized trees level. This results in a rotation age shortening or in earlier silvicultural interventions such as thinning or pruning.

da entre tratamientos, aunque se observa que el testigo sin fertilizar tiende a presentar un nivel nutritivo menor (Cuadro 4). Sin embargo, estas leves diferencias entre tratamientos no explican la diferencia en crecimiento de los árboles, ya que el estatus nutricional de estos se encuentra mayoritariamente en un rango satisfactorio o bueno, excepto en fósforo y magnesio. Tales diferencias en crecimiento se pueden deber al estímulo inicial generado por la aplicación de fertilizantes en el establecimiento, donde existe un aprovechamiento de nutrientes adicionales a los otorgados naturalmente por el suelo (Haase et al., 2006; Oliet et al., 2009). En cambio, a partir de la segunda temporada las plantas sólo se abastecieron de la oferta nutritiva del suelo y por ello poseen homogeneidad nutricional entre tratamientos.

En los árboles se apreció a lo largo del tiempo un crecimiento exponencial típico, como lo demuestra el factor de producción (Figura 1). En los tratamientos con fertilización hubo mayor crecimiento desde el primer año. La tendencia indica que con fertilizantes de liberación

The evaluation period is part of the plantations initial stage, so there must be a continuous monitoring of the trees growth during next years in order to assess their changes during the most critical stages in which the nutritional demand increases and the closing crowns occur. For this type of trials, it is convenient to carry out long-term studies (Oliet et al., 2009).

Site Effect

The site influences *P. radiata* growth but not its survival, coinciding with the previous observations by Gerdling et al. (1986) in similar sites. This species is climatically well adapted and in general, fertile soils are good, considering that they are deep, medium texture, rich in organic matter, with high available water capacity, well-structured and with good internal drainage. The main limitations are the high acidity levels and extractable aluminum, which influence the low phosphorus and bases levels.

Los Pinos had lower productivity with respect to Las Palmas sites (Table 5), which may be because Los Pi-

CUADRO 4. Análisis químico foliar al segundo año de crecimiento de *Pinus radiata*, en cuatro tratamientos por sitio.

Sitio-Tratamiento	Elementos mayores (%)						Elementos menores (mg·kg ⁻¹)				
	N	P	N/P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Los Pinos - A	2.07	0.09	23.0	0.72	0.17	0.09	83	337	7.6	41	17
Los Pinos - F	1.83	0.09	20.3	0.65	0.24	0.10	59	323	6.2	42	15
Los Pinos - G	1.79	0.11	16.3	0.80	0.21	0.09	63	287	6.9	37	20
Los Pinos - H	1.77	0.09	19.7	0.64	0.26	0.10	66	333	6.6	47	14
Las Palmas 1 - A	1.83	0.09	20.3	0.85	0.20	0.09	66	321	6.6	39	19
Las Palmas 1 - F	1.81	0.08	22.6	0.85	0.22	0.09	68	346	6.2	34	17
Las Palmas 1 - G	1.77	0.10	17.7	0.88	0.20	0.09	62	280	6.6	41	17
Las Palmas 1 - H	1.84	0.11	16.7	0.84	0.22	0.09	65	285	6.2	37	16
Las Palmas 2 - A	1.78	0.10	17.8	0.76	0.28	0.11	69	239	6.2	40	18
Las Palmas 2 - F	1.79	0.08	22.4	0.72	0.24	0.11	63	398	5.9	39	19
Las Palmas 2 - G	1.70	0.11	15.5	0.74	0.24	0.09	64	351	6.2	35	23
Las Palmas 2 - H	1.75	0.10	17.5	0.80	0.26	0.10	84	263	5.9	41	15

TABLE 4. *Pinus radiata* foliar chemical analysis during the second year of growth, four treatments per site.

Site- Treatment	Macroelements (%)						Microelements (mg·kg ⁻¹)				
	N	P	N/P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Los Pinos - A	2.07	0.09	23.0	0.72	0.17	0.09	83	337	7.6	41	17
Los Pinos - F	1.83	0.09	20.3	0.65	0.24	0.10	59	323	6.2	42	15
Los Pinos - G	1.79	0.11	16.3	0.80	0.21	0.09	63	287	6.9	37	20
Los Pinos - H	1.77	0.09	19.7	0.64	0.26	0.10	66	333	6.6	47	14
Las Palmas 1 - A	1.83	0.09	20.3	0.85	0.20	0.09	66	321	6.6	39	19
Las Palmas 1 - F	1.81	0.08	22.6	0.85	0.22	0.09	68	346	6.2	34	17
Las Palmas 1 - G	1.77	0.10	17.7	0.88	0.20	0.09	62	280	6.6	41	17
Las Palmas 1 - H	1.84	0.11	16.7	0.84	0.22	0.09	65	285	6.2	37	16
Las Palmas 2 - A	1.78	0.10	17.8	0.76	0.28	0.11	69	239	6.2	40	18
Las Palmas 2 - F	1.79	0.08	22.4	0.72	0.24	0.11	63	398	5.9	39	19
Las Palmas 2 - G	1.70	0.11	15.5	0.74	0.24	0.09	64	351	6.2	35	23
Las Palmas 2 - H	1.75	0.10	17.5	0.80	0.26	0.10	84	263	5.9	41	15

controlada se mantendría un crecimiento similar al del fertilizante tradicional, pero superior al testigo. En términos porcentuales, las diferencias en crecimiento de los mejores tratamientos respecto del testigo fueron menores en las dos últimas temporadas. Según Albaugh et al. (2004), esta es una situación en la que las ganancias del crecimiento se pierden en forma parcial, ya que las curvas de crecimiento de las plantaciones, tanto fertilizadas como no fertilizadas, convergen en un punto futuro (Miller, 1981). Por ello, las ganancias alcanzadas en crecimiento por la fertilización deben ser aprovechadas antes de que los crecimientos de los árboles fertilizados decaigan al nivel de los no fertilizados. Esto deriva en un acortamiento de la edad de rotación o en hacer intervenciones silviculturales más tempranas, como aclareos y podas.

El periodo evaluado es parte de la etapa inicial de las plantaciones, por lo que se debe continuar realizando un monitoreo del crecimiento de estos árboles durante los próximos años, para evaluar cómo varían en etapas más críticas donde aumenta la demanda nutritiva y ocurre el cierre de copas. Para este tipo de ensayos es conveniente realizar estudios de largo plazo (Oliet et al., 2009).

Efecto del sitio

El sitio muestra influencia en el crecimiento de *P. radiata* pero no en la supervivencia, coincidiendo con lo observado anteriormente en sitios similares por Gerding et al. (1986). Esta especie está climáticamente

nos soil was more resistant to penetration and with high aluminum saturation. This type of soil can limit root development and it is reflected in lower fine roots content. The lesser root development may also explain the higher growth gains in the fertilized treatments compared to the unfertilized ones (Table 5). As soil constraints hinder a proper exploration, having less surface absorption, trees should respond better to an additional nutrients input and a longer delivery time. Additionally, Los Pinos had more exposure to the wind, which can impede the plants water balance.

Las Palmas- 1 is a very favorable site because of its soil structure and nutrimental supply, besides, fertilization had a positive effect on growth and therefore it showed higher growth than the other sites. This site allows observing the fertilizers effect without any physical soil structural restraints, which is very useful to select the best treatments for the plantations intensive management on sites with similar characteristics. Treatment with F fertilizer outperformed surpassing the control in DBH, PF and TBA, which might be due to the presence of higher amount of phosphorus in the fertilizer (Table 2). Las Palmas- 2 showed an intermediate situation in the trial, but with more similarity to Las Palmas- 1. The differences between them can be due to the soil nutritional supply rather than its structural aspect.

Plantations were very well established with good weed control and showed a superior total height. In the third

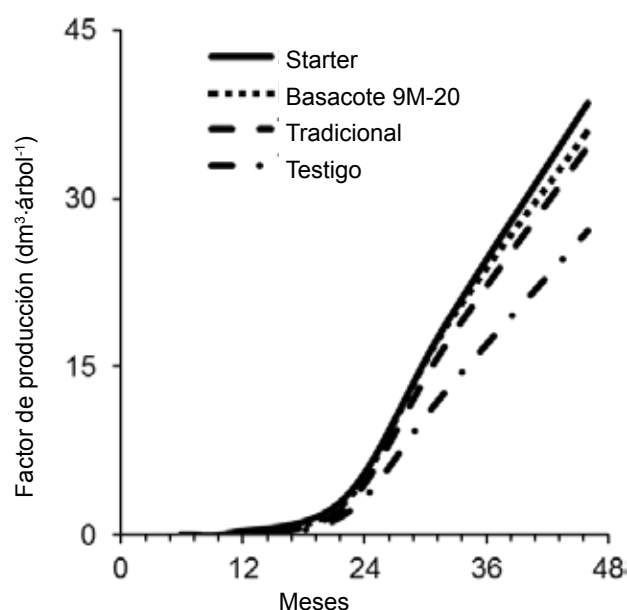


FIGURA 1. Crecimiento de *Pinus radiata* durante sus primeros 46 meses en factor de producción (hasta los 32 meses se utilizó el diámetro de cuello para calcularlo, después el DAP) de dos tratamientos con fertilizantes de liberación controlada (Starter [F] y Basacote 9M-20 [E]), el tratamiento con fertilización tradicional (G) y el testigo sin fertilizar (H).

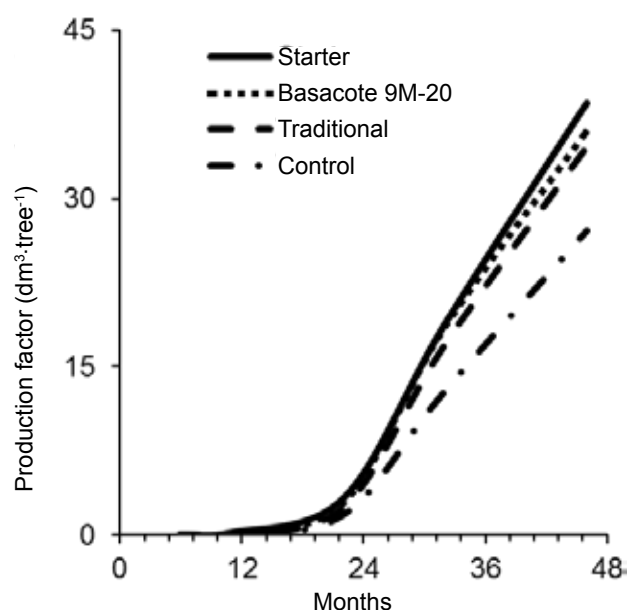


FIGURE 1. *Pinus radiata* growth during their first 46 months in production factor (root collar diameter was used to calculate it up to 32 months, then DBH was used) with two treatments using controlled release fertilizers (Starter [F] and Basacote 9M-20 [E]), treatment with traditional fertilization (G) and unfertilized control (H).

bien adaptada y los suelos presentan buena fertilidad en general, considerando que son suelos profundos, de textura media, ricos en materia orgánica, con elevada capacidad de agua aprovechable, bien estructurados y con buen drenaje interno. Las limitaciones principales son los altos grados de acidez y aluminio extraíble, los cuales influyen en los niveles bajos de fósforo y bases.

En el Cuadro 5 se puede apreciar que Los Pinos tuvo menor productividad con respecto a los sitios de Las Palmas, lo cual puede deberse a que el suelo del primero tiene mayor resistencia a la penetración y alta saturación de aluminio. Este tipo de suelo puede limitar

year, the weed cover differed between sites ($P < 0.05$) and showed high variability within treatments. At each site, there were no differences between treatments in the coverage, height and volume of weeds mean values. In Los Pinos, the weeds showed the lowest coverage ($30 \% \pm 18 \%$) than in the other two sites. Las Palmas- 1 had a $47 \% \pm 23 \%$ and in Las Palmas-2 a $54 \% \pm 21 \%$ average coverage. Weeds measured less than 50 cm height at each of the three sites. In Las Palmas-1 and - 2, the volume of weeds per tree was around 120 dm^3 and in Los Pinos the volume was a third of that value. As it was expected, the weeds presence on the third and fourth year was not a decisive factor on the fertility treatments response, since sites with higher trees

CUADRO 5. Supervivencia y variables dasométricas de *Pinus radiata* por sitio, al cuarto año de crecimiento.

Tratamiento	Supervivencia (%)	DAP (cm)	Altura total (m)	Factor de producción ($\text{dm}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$)	Área basal total ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$)
Los Pinos					
A	98.0	$6.7 \pm 1.2 \text{ bc}$	$4.7 \pm 0.5 \text{ abc}$	$22.5 \pm 9.6 \text{ b}$	5.7 bcd
B	93.9	$7.1 \pm 1.3 \text{ ab}$	$4.5 \pm 0.4 \text{ bcd}$	$24.6 \pm 10.3 \text{ ab}$	6.4 abc
C	85.7	$6.2 \pm 1.2 \text{ cd}$	$4.3 \pm 0.5 \text{ de}$	$17.3 \pm 8.6 \text{ bc}$	4.8 cd
D	91.8	$7.7 \pm 1.2 \text{ a}$	$4.9 \pm 0.5 \text{ ab}$	$30.3 \pm 10.8 \text{ a}$	7.4 a
E	95.9	$7.6 \pm 1.1 \text{ ab}$	$5.0 \pm 0.5 \text{ a}$	$30.1 \pm 10.0 \text{ a}$	7.2 ab
F	95.9	$6.7 \pm 1.2 \text{ bc}$	$4.5 \pm 0.4 \text{ bc}$	$21.9 \pm 9.2 \text{ b}$	5.7 bc
G	85.7	$7.0 \pm 1.1 \text{ abc}$	$4.6 \pm 0.5 \text{ abc}$	$24.2 \pm 10.0 \text{ ab}$	6.2 abc
H	95.9	$5.7 \pm 1.0 \text{ d}$	$4.1 \pm 0.5 \text{ e}$	$14.4 \pm 6.4 \text{ c}$	4.1 d
Promedio	93 ± 4.8	6.8 ± 1.2	4.6 ± 0.5	23.2 ± 9.4	6.0 ± 1.1
Las Palmas 1					
A	100.0	$7.6 \pm 1.4 \text{ c}$	$5.5 \pm 0.7 \text{ b}$	$34.1 \pm 16.0 \text{ c}$	7.3 c
B	93.9	$8.4 \pm 1.1 \text{ abc}$	$5.7 \pm 0.8 \text{ ab}$	$42.1 \pm 14.9 \text{ abc}$	8.8 abc
C	73.5	$8.0 \pm 1.4 \text{ bc}$	$5.5 \pm 0.5 \text{ a}$	$36.9 \pm 14.7 \text{ bc}$	8.0 bc
D	93.9	$8.8 \pm 1.2 \text{ ab}$	$5.9 \pm 0.5 \text{ ab}$	$47.7 \pm 15.8 \text{ ab}$	9.7 ab
E	93.9	$8.8 \pm 1.1 \text{ ab}$	$5.9 \pm 0.4 \text{ ab}$	$46.6 \pm 12.3 \text{ abc}$	9.6 ab
F	95.9	$9.1 \pm 1.2 \text{ a}$	$6.0 \pm 0.7 \text{ a}$	$51.6 \pm 17.8 \text{ a}$	10.3 a
G	95.9	$8.6 \pm 1.4 \text{ abc}$	$5.7 \pm 0.7 \text{ ab}$	$44.2 \pm 18.4 \text{ abc}$	9.3 abc
H	98.0	$7.8 \pm 1.6 \text{ bc}$	$5.5 \pm 0.7 \text{ ab}$	$35.9 \pm 17.3 \text{ bc}$	7.7 bc
Promedio	93.1 ± 8.2	8.4 ± 1.3	5.7 ± 0.6	42.4 ± 16.0	8.8 ± 1.1
Las Palmas 2					
A	81.6	$7.6 \pm 1.5 \text{ bc}$	$5.4 \pm 0.7 \text{ a}$	$33.2 \pm 14.6 \text{ abc}$	7.3 bc
B	98.0	$8.1 \pm 1.2 \text{ ab}$	$5.2 \pm 0.5 \text{ ab}$	$35.7 \pm 12.0 \text{ ab}$	8.2 ab
C	91.8	$7.8 \pm 1.4 \text{ ab}$	$5.2 \pm 0.7 \text{ ab}$	$34.2 \pm 14.8 \text{ ab}$	7.7 ab
D	87.7	$6.6 \pm 1.5 \text{ c}$	$4.6 \pm 0.7 \text{ c}$	$22.8 \pm 12.5 \text{ c}$	5.7 c
E	87.7	$7.3 \pm 2.0 \text{ abc}$	$4.8 \pm 1.2 \text{ abc}$	$31.3 \pm 11.5 \text{ bc}$	7.4 bc
F	93.8	$8.7 \pm 1.2 \text{ a}$	$5.3 \pm 0.6 \text{ a}$	$42.1 \pm 13.7 \text{ a}$	9.4 a
G	97.9	$8.1 \pm 1.4 \text{ ab}$	$5.1 \pm 0.7 \text{ ab}$	$35.4 \pm 14.6 \text{ ab}$	8.2 ab
H	93.8	$7.7 \pm 1.4 \text{ ab}$	$4.8 \pm 0.6 \text{ bc}$	$31.1 \pm 13.6 \text{ bc}$	7.6 abc
Promedio	91.6 ± 5.6	7.7 ± 1.5	5.1 ± 0.7	33.2 ± 13.4	7.7 ± 1.1

Valores con la misma letra no difieren significativamente según la multicomparación de medias de Scheffé ($P < 0.05$). $\pm$ Desviación estándar de la media.

el desarrollo radical reflejándose en un menor contenido de raíces finas. El menor desarrollo radical puede explicar también las mayores ganancias en crecimiento de los tratamientos con fertilización en comparación con el tratamiento sin fertilizar (Cuadro 5). Como las restricciones del suelo dificultan una exploración radical adecuada, al tener menos superficie de absorción, los árboles deben responder mejor a un aporte adicional de nutrientes y a un tiempo de entrega más prolongado. Adicionalmente, para el sitio de Los Pinos se debe considerar que tiene mayor exposición al viento, lo cual puede dificultar el balance hídrico de las plantas.

performance showed higher weeds presence. However, weed coverage explains the *P. radiata* growth decrease at an earlier age when such coverage reaches higher values than 30 % during the second year (Figure 2). This fact coincides with trends observed by Gerding and Schlatter (1988), that in order to achieve the *P. radiata* potential growth on these sites (soil and climate) it would be enough to control the weeds in two thirds of the surface around the plant (approximately 1 m²) in the first two years, while a control on the entire surface would be unnecessary. Weed competition control is essential when fertilizing during the plantation establishment (Gerding et

TABLE 5. Survival and *Pinus radiata* mensuration variables per site during the fourth year of growth.

Treatment	Survival (%)	DBH (cm)	Total height (m)	Production factor (dm ³ ·tree ⁻¹)	Total basal area (m ² ·ha ⁻¹)
Los Pinos					
A	98.0	6.7 ± 1.2 bc	4.7 ± 0.5 abc	22.5 ± 9.6 b	5.7 bcd
B	93.9	7.1 ± 1.3 ab	4.5 ± 0.4 bcd	24.6 ± 10.3 ab	6.4 abc
C	85.7	6.2 ± 1.2 cd	4.3 ± 0.5 de	17.3 ± 8.6 bc	4.8 cd
D	91.8	7.7 ± 1.2 a	4.9 ± 0.5 ab	30.3 ± 10.8 a	7.4 a
E	95.9	7.6 ± 1.1 ab	5.0 ± 0.5 a	30.1 ± 10.0 a	7.2 ab
F	95.9	6.7 ± 1.2 bc	4.5 ± 0.4 bc	21.9 ± 9.2 b	5.7 bc
G	85.7	7.0 ± 1.1 abc	4.6 ± 0.5 abc	24.2 ± 10.0 ab	6.2 abc
H	95.9	5.7 ± 1.0 d	4.1 ± 0.5 e	14.4 ± 6.4 c	4.1 d
Average	93 ± 4.8	6.8 ± 1.2	4.6 ± 0.5	23.2 ± 9.4	6.0 ± 1.1
Las Palmas 1					
A	100.0	7.6 ± 1.4 c	5.5 ± 0.7 b	34.1 ± 16.0 c	7.3 c
B	93.9	8.4 ± 1.1 abc	5.7 ± 0.8 ab	42.1 ± 14.9 abc	8.8 abc
C	73.5	8.0 ± 1.4 bc	5.5 ± 0.5 a	36.9 ± 14.7 bc	8.0 bc
D	93.9	8.8 ± 1.2 ab	5.9 ± 0.5 ab	47.7 ± 15.8 ab	9.7 ab
E	93.9	8.8 ± 1.1 ab	5.9 ± 0.4 ab	46.6 ± 12.3 abc	9.6 ab
F	95.9	9.1 ± 1.2 a	6.0 ± 0.7 a	51.6 ± 17.8 a	10.3 a
G	95.9	8.6 ± 1.4 abc	5.7 ± 0.7 ab	44.2 ± 18.4 abc	9.3 abc
H	98.0	7.8 ± 1.6 bc	5.5 ± 0.7 ab	35.9 ± 17.3 bc	7.7 bc
Average	93.1 ± 8.2	8.4 ± 1.3	5.7 ± 0.6	42.4 ± 16.0	8.8 ± 1.1
Las Palmas 2					
A	81.6	7.6 ± 1.5 bc	5.4 ± 0.7 a	33.2 ± 14.6 abc	7.3 bc
B	98.0	8.1 ± 1.2 ab	5.2 ± 0.5 ab	35.7 ± 12.0 ab	8.2 ab
C	91.8	7.8 ± 1.4 ab	5.2 ± 0.7 ab	34.2 ± 14.8 ab	7.7 ab
D	87.7	6.6 ± 1.5 c	4.6 ± 0.7 c	22.8 ± 12.5 c	5.7 c
E	87.7	7.3 ± 2.0 abc	4.8 ± 1.2 abc	31.3 ± 11.5 bc	7.4 bc
F	93.8	8.7 ± 1.2 a	5.3 ± 0.6 a	42.1 ± 13.7 a	9.4 a
G	97.9	8.1 ± 1.4 ab	5.1 ± 0.7 ab	35.4 ± 14.6 ab	8.2 ab
H	93.8	7.7 ± 1.4 ab	4.8 ± 0.6 bc	31.1 ± 13.6 bc	7.6 abc
Average	91.6 ± 5.6	7.7 ± 1.5	5.1 ± 0.7	33.2 ± 13.4	7.7 ± 1.1

Values with the same letter do not differ significantly by Scheffé's mean multicomparison ($P < 0.05$). ± Mean standard deviation.

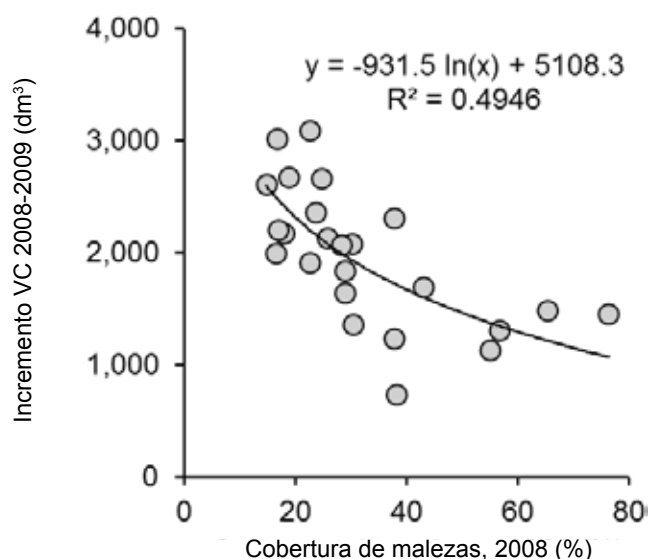


FIGURA 2. Incremento en volumen de copa (VC) de plantaciones de *Pinus radiata* del segundo al tercer año (período de crecimiento 2008-2009) en relación a la cobertura de malezas en el segundo año (año 2008). Cada punto representa el promedio de un tratamiento por sitio.

Las Palmas-1 presenta crecimiento superior a los otros sitios siendo un sitio favorable por una mejor estructura del suelo y oferta nutritiva, aunado a esto, la fertilización tuvo efecto positivo en el crecimiento. Este sitio permite ver el efecto de los fertilizantes sin restricciones físicas estructurales del suelo, lo que ayudaría a seleccionar los mejores tratamientos para el manejo intensivo de plantaciones en sitios con características similares. El tratamiento con el fertilizante F obtuvo mejores resultados superando al testigo en DAP, FP y ABT, lo que puede deberse al mayor aporte de fósforo de dicho fertilizante (Cuadro 2). Las Palmas-2 es una situación intermedia en el ensayo, pero con más similitud con Las Palmas-1. Las diferencias entre ambos pueden explicarse más por la oferta nutritiva del suelo que por un aspecto estructural de éste.

Las plantaciones se establecieron adecuadamente con un buen control de malezas y tuvieron una altura muy superior a éstas. Al tercer año, la cobertura de malezas presentó diferencias entre sitios ($P < 0.05$) y alta variabilidad dentro de los tratamientos. En cada sitio, no se apreciaron diferencias de los valores medios de cobertura, altura y volumen de malezas entre tratamientos. En Los Pinos, la maleza tuvo menor cobertura (30 % $\pm$ 18 %) que en los otros dos sitios. Las Palmas-1 presentó cobertura promedio de 47 % $\pm$ 23 % y Las Palmas-2 de 54 % $\pm$ 21 %. Las malezas midieron menos de 50 cm de altura en los tres sitios. En Las Palmas-1 y Las Palmas-2, el volumen de malezas por árbol estuvo en torno a los 120 dm³ y en Los Pinos el volumen fue un tercio de ese valor. La presencia de maleza al tercer y cuar-

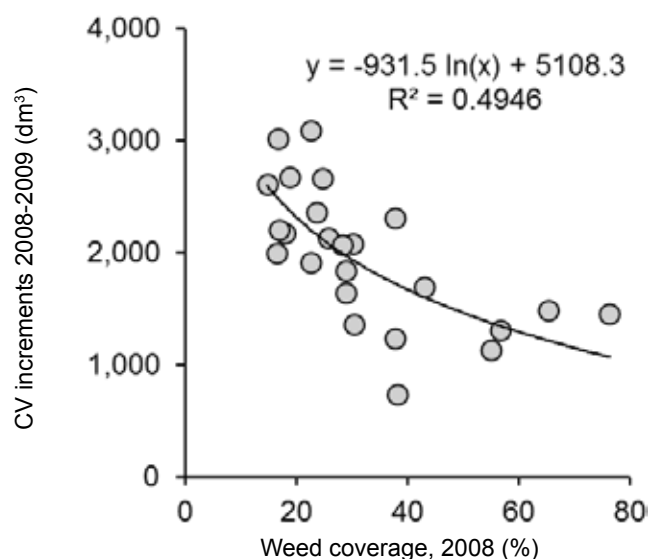


FIGURE 2. *Pinus radiata* crown volume (CV) increments from second to third year (growth period 2008-2009) in relation to weeds coverage in the second year (2008). Each point represents the average of a treatment site.

al., 1986; Venegas & Palazuelos, 1999; Woods, Nambiar, & Smethurst, 1992).

CONCLUSIONS

Treatment with controlled release fertilizers -Starter (F) and Basacote 9M (E)- resulted in *P. radiata* higher growth than the unfertilized control and similar to that when using traditional water-soluble fertilizers, with variations according to soil type. Controlled release fertilizers with a broader delivery period or a higher dose improved growth response. Also, the trees growth improved when fertilizer has higher phosphorus concentrations. Fertilizations didn't influence tree's survival. Response differences between soils are explained by their structure and natural nutrimental supply. Weed competition affects *P. radiata* growth when weed coverage exceeds one third of the plantation surface (1m²) in the first two years.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to COMPO Expert Chile and Forestry Experimental Center of the Universidad Austral de Chile for their support in conducting the trial.

End of English Version

to año no fue un factor decisivo en la respuesta de los tratamientos de fertilización, como era lo esperado, ya que los sitios con mayor rendimiento en los árboles presentaron mayor presencia de malezas. Sin embargo, la cobertura de malezas explica la merma del crecimiento de *P. radiata* a más temprana edad cuando dicha cobertura alcanza valores mayores al 30 % en el segundo año (Figura 2). Coincidiendo con la tendencia observada por Gerding y Schlatter (1988), para alcanzar el potencial de crecimiento de *P. radiata* en estos sitios (suelo y clima) bastaría con un control de malezas que alcance dos tercios de la superficie en torno a la planta (en aproximadamente 1 m²) en los primeros dos años, mientras que un control en toda la superficie sería innecesario. El control de la competencia de malezas es indispensable cuando se aplica fertilización en el establecimiento de la plantación (Gerding et al., 1986; Venegas & Palazuelos, 1999; Woods, Nambiar, & Smethurst, 1992).

CONCLUSIONES

Los tratamientos con fertilizantes de liberación controlada Starter (F) y Basacote 9M (E) permiten un mayor crecimiento de *P. radiata* que el testigo sin fertilizar y similar al fertilizante hidrosoluble tradicional, con variaciones según el suelo. Los fertilizantes de liberación controlada con un periodo de entrega más amplio o una mayor dosis permiten mejor respuesta en el crecimiento. También se favorece el crecimiento de los árboles cuando se tiene un mayor aporte de fósforo por el fertilizante. La supervivencia de los árboles no fue influida por las fertilizaciones. Las diferencias de respuesta entre suelos son explicadas por la estructura y la oferta nutritiva natural de éstos. La competencia de malezas afecta el crecimiento de *P. radiata* cuando la cobertura de malezas supera un tercio de la superficie de la tasa de plantación (1 m²) en los primeros dos años.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a COMPO Expert Chile y al Centro Experimental Forestal de la Universidad Austral de Chile por el apoyo en la realización del ensayo.

REFERENCIAS

- Albaugh, T. J., Rubilar, R., Álvarez, J., & Allen, H. L. (2004). Radiata pine response to tillage, fertilization, and weed control in Chile. *Bosque*, 25(2), 5–16. Obtenido de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002004000200002&script=sci_abstract&lng=en
- Álvarez, J., Rodríguez, J., & Suárez, D. (1999). Mejoramiento de la productividad de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, a través de un modelo racional de fertilización. *Bosque*, 20(1), 23–36. Obtenido de <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v20n1/art03.pdf>
- Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (2001). *Estudio Agrológico X Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos*. Santiago, Chile: Autor.
- Erro, J., Urrutia, O., San Francisco, S. J., & García-Mina, M. (2007). Development and agronomical validation of new fertilizer compositions of high bioavailability and reduced potential nutrient losses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 7831–7839. doi: 10.1021/jf0708490
- Fan, Z., Moore, J. A., Shafii, B., & Osborne, B. J. (2002). Three-year response of ponderosa pine seedlings to controlled-release fertilizer applied at planting. *Western Journal of Applied Forestry*, 3, 154–164. Obtenido de http://www.cnr.uidaho.edu/iftnc/Bibliography/2002_Fan,%20Z.%20et%20al.%20Supplemental%20Report%20No.%203Three-ear%20Response%20of%20Ponderosa%20.pdf
- Gerding, V., Schlatter, J. E., & Barriga, J. (1986). Fertilización para el establecimiento de *Pinus radiata* D. Don en Valdivia. *Bosque*, 7(2), 121–128. Obtenido de <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v7n2/art08.pdf>
- Gerding, V., & Schlatter, J. (1988). Fertilización para el establecimiento de *Pinus radiata* D. Don en Valdivia. Evaluación al quinto año. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Haase, D. L., Rose, R., & Trobaug, H. J. (2006). Field performance of three stock sizes of Douglas-fir container seedlings grown with slow-release fertilizer in the nursery growing medium. *New Forests*, 31, 1–24. Obtenido de <http://classes.forestry.oregonstate.edu/for442/sites/default/files/images/2006%20Haase%20et%20al%20New%20For%20slow%20release%20fert.pdf>
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (1989). *Mapa agroclimático de Chile*. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura.
- Iyer, J., Dobrahner, J., Lowery, B., & Vandettey, J. (2002). Slow release fertilizers in bareroot nurseries. In R. K. Dumroese, L. E. Riley, & T. D. Landis (Eds.), *National proceedings: Forest and conservation nursery associations 1999, 2000, and 2001* (pp. 112–119). USA: USDA, Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Jacobs, D. (2005). Variation in nutrient release of polymer-coated fertilizers. In R. K. Dumroese, L. E. Riley, & T. D. Landis (Eds.), *National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations 2004* (pp. 113–116). USA: USDA, Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Jacobs, D. F., Rose, R., & Haase, D. L. (2003). Development of Douglas-fir seedling root architecture in response to localized nutrient supply. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 118–125. doi: 10.1139/X02-160
- Jacobs, D. F., Salifu, K. F., & Seifert, J. R. (2005). Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting. *Forest Ecology and Management*, 214, 28–39. doi: 10.1016/j.foreco.2005.03.053
- Klooster, W. S., Cregg, B. M., Fernández, R. T., & Nzokou, P. (2010). Growth and photosynthetic response of pot-in-pot-grown conifers to substrate and controlled-release fertilizer. *HortScience*, 45, 36–42. Obtenido de <http://hortsci.ashspublishings.org/content/45/1/36.full.pdf+html>
- Landis, T., Dumroese, R., & Kasten, R. (2009). Using polymer-coated controlled-release fertilizers in the nursery and after outplanting. *Forest Nursery Notes* 29(1), 5–12. Obtenido de http://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2009_landis_t001.pdf
- Miller, H. G. (1981). Forest fertilization: Some guiding concepts. *Forestry*, 54, 157–167. doi: 10.1093/forestry/54.2.157
- Oliet, J., Planelles, R., Artero, F., Valverde, R., Jacobs, D., & Segura, M. (2009). Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: Relative influence of seedling morphology and mineral nutrition. *New Forests*, 37, 313–331. doi: 10.1007/s11056-008-9126-3
- Rodríguez, J. (1991). *Manual de fertilización*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Rodríguez, J., Pinochet, D., & Matus, F. J. (2001). *Fertilización de los cultivos*. Santiago, Valdivia, Talca, Chile: LOM Ediciones.
- Rose, R., Haase, D., & Arellano, E. (2004). Fertilizantes de entrega controlada: Potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque*, 25(2), 89–100. Obtenido de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002004000200009&script=sci_arttext
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., Mora, M., Flores, H., & Neaman, A. (2006). *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile*. Santiago, Chile: Instituto de investigaciones Agropecuarias.
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Demanet, R., Flores, P. H., Grez, R., Mora, G. M. L., & Neaman, A. (2007). *Métodos de análisis de tejidos vegetales* (2a ed.). Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Schlatter, J., Grez, R., & Gerding, V. (2003). *Manual para el reconocimiento de suelos*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Sokal, R., & Rohlf, F. J. (1979). *Biometría: Principios y métodos estadísticos en la investigación biológica*. Madrid, España: Blume.
- Trichet, P., Bakker, M., Augusto, L., Alazard, P., Merzeau, D., & Saur, E. (2009). Fifty years of fertilization experiments on *Pinus pinaster* in Southwest France: The importance of phosphorus as a fertilizer. *Forest Science*, 55(5), 390–402. Obtenido de <http://gpf-sud-gironde.e-monsite.com/medias/files/trichet-50-ans-d-experimentation-de-fertilisation-phosphatee.pdf>
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157, 423–447. doi: 10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x
- Venegas, R., & Palazuelos, R. (1999). Control químico de malezas arbustivas y arbóreas en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque*, 20(1), 79–88. Obtenido de <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v20n1/art08.pdf>
- Vergara, R., Ipinza, R., & Pérez, E. (1995). *Manual de cruzamientos controlados para Pinus radiata* D. Don. Valdivia, Chile: Cooperativa de Mejoramiento Genético, UACH, CONAF y empresas forestales.
- Will, G. M. (1985). *Nutrient deficiencies and fertiliser use in New Zealand exotic forests*. New Zealand: Forest Research Institute.
- Woods, P., Nambiar, E., & Smethurst, P. (1992). Effect of annual weeds on water and nitrogen availability to *Pinus radiata* trees in a young plantation. *Forest ecology and management*, 48, 145–163. doi: 10.1016/0378-1127(92)90127-U
- Zerihun, A., & Montagu, K. D. (2004). Belowground to aboveground biomass ratio and vertical root distribution responses of mature *Pinus radiata* stands to phosphorus fertilization at planting. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(9), 1883–1894. doi: 10.1139/x04-069