

EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE PLANTACIONES DENDROENERGÉTICAS DE *Eucalyptus globulus*, SEGÚN DENSIDAD DE PLANTACIÓN Y TURNO DE ROTACION EN SUELOS CONTRASTANTES DE LA REGIÓN DEL BIO BIO, CHILE.

Rodríguez, A.¹; Cancino, J.¹; Acuña, E.¹; Rubilar, R.^{1,2} y Muñoz, F.¹

RESUMEN

En Chile la oferta de recursos naturales no renovables no alcanza a abastecer el mercado energético interno, incrementando el costo de los sistemas de producción dada la variabilidad del precio de los combustibles fósiles en el mercado internacional.

La implementación de alternativas como es el caso de las energías renovables a través de las plantaciones dendroenergéticas, incentiva la oferta de biomasa en la contribución a la matriz energética primaria de Chile, sin embargo, la información del crecimiento y rendimiento de estas plantaciones del alta densidad en Chile, continua siendo escasa y fragmentada, más aún, cuando éstas son sensibles a la especie, la densidad de plantación, turno de rotación y tipo de suelo. Para elegir la especie a establecer se debe entender su relación suelo-planta, la fenología en términos del crecimiento vegetativo, la exigencia nutricional, como la resistencia a estreses de tipo biótico y abióticos.

El objetivo general de esta investigación se centró en evaluar la productividad en biomasa de plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus globulus*. La evaluación del crecimiento en biomasa se obtiene de un diseño aleatorio en arreglo factorial, donde se evalúa el turno de rotación (24, 36 o 48 meses), la densidad de plantación (5.000, 10.000 y 15.000 arb/ha) y el tipo de suelo (arenales, sedimentos marinos ó trumaos), monitoreando los horizontes orgánicos y minerales, para evaluar la sustentabilidad nutricional del sitio.

En el trabajo se expone resultados preliminares de ensayos establecidos en el 2010 de *E. globulus*, el cual comprende los primeros 24 meses de establecimiento. El *E. globulus* independiente de la densidad nominal (5.000, 10.000 o 15.000 arb/ha) produce la misma cantidad de biomasa por tipo de suelo, aun cuando se presentan algunas moderadas diferencias en área basal.

En consideración, debido a los altos costos de establecimiento que conllevan plantaciones de 10.000 y 15.000 arb/ha, más la alta mortalidad presente en este último, con plantaciones de 5.000 arb/ha se obtendría una cantidad de biomasa que no se diferenciaría estadísticamente de las anteriores, tanto en suelos arenales como en sedimentos marinos. Sin embargo, en suelos trumaos una densidad de 10.000 arb/ha presentaría la misma productividad que la de 15.000 arb/ha, y a su vez presenta una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) en contraste a lo obtenido a una densidad de plantación de 5.000 arb/ha.

Palabras clave: Silvicultura de plantaciones, biocombustibles de segunda generación

¹ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Laboratorio de Biomasa y Bioenergía, Universidad de Concepción, Chile. jrodriguez@udec.cl

² Cooperativa de Productividad Forestal, Universidad de Concepción, Laboratorio de Nutrición y Productividad Forestal, Universidad de Concepción, Concepción. Chile.

SUMMARY

In Chile the supply of non-renewable natural resources is not enough to supply the internal energy market, increasing the cost of production systems due to variability of fossil fuel prices in the international market.

The implementation of alternatives such as renewable energy through unconventional wood energy plantations biomass supply incentives in contributing to primary energy matrix Chile, however, the growth and yield information of these high density plantations in Chile remains weak and fragmented, especially when they are sensitive to the species, planting density, rotation length and soil type. To choose the species to establish one must understand the phenology in terms of vegetative growth, nutritional requirement, such as resistance to biotic stresses and abiotic type.

The overall objective of this research is focused on evaluating the biomass productivity of *Eucalyptus globulus* wood energy plantations. Evaluation of growth in biomass is obtained from a randomized factorial arrangement, which assesses the shift rotation (24, 36 or 48 months), planting density (5,000, 10,000 and 15,000 trees/ha) and soil type (sand, marine sediments or clays), monitoring organic and mineral horizons, to assess the nutritional sustainability of the site.

In the current paper presents preliminary results of the tests laid down in 2010 by *E. globulus*, which comprises the first 24 months of establishment. From where *E. globulus* independent of the nominal density (5,000, 10,000 or 15,000 trees/ha) produces the same amount of biomass on soil type, even though they show some modest differences in basal area.

In consideration, due to the high costs involved in establishing plantations of 10,000 and 15,000 trees/ha, plus the high mortality present in the latter, with plantation of 5,000 trees/ha would get an amount of biomass not differ statistically of the above, both in sandy soils and in marine sediments. However, in clays soils density of 10,000 trees/ha would have the same productivity than 15,000 trees/ha, and in turn have a statistically significant ($p < 0.05$) in contrast to obtained at a planting density of 5,000 trees/ha.

Keywords: Forestry plantations, second generation biofuels

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón mineral) participan en un 76% de la cantidad total de energía que se requiere en Chile, y de ésta, más del 90% se obtiene de importaciones. En contraste a la demanda energética de recursos naturales no renovables, Chile posee un sector forestal consolidado (Wompner, 2010), que le permitiría en un futuro autoabastecerse para la cogeneración de energía (Figueroa, 2009) liderando la fuente de energía renovable no convencional a partir de biomasa lignocelulósica, que no genera presión alguna sobre la oferta y demanda de los alimentos para consumo humano (Montoya, 2009) como acontece con los biocombustibles de primera generación (Suárez y Martín, 2010).

En la actualidad la producción de energía renovable no convencional a partir de biomasa lignocelulósica en Chile, presenta una participación creciente del 19,2% en la matriz energética nacional de consumo primario (Rodríguez, 2011). El Ministerio de Energía de Chile, con base a la política ambiental de incrementar el uso de combustibles de segunda generación, incentiva el uso de biomasa lignocelulósica en procesos de cogeneración (en mezcla con carbón mineral), y a través de la implementación de estas políticas ambientales se espera aumente la demanda de biomasa proveniente de plantaciones dendroenergéticas, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero con base a la ejecución de Proyectos Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) (Naciones Unidas, 1998). Al incrementarse las plantas de cogeneración de energía en Chile aumentaría la demanda de biomasa lignocelulósica.

La oferta actual a partir de desechos de plantaciones forestales o aserríos compuesta por materiales heterogéneos permite obtener una adecuada materia prima para la generación de bioenergía (Spatari *et al.*, 2010), sin embargo, la biomasa lignocelulósica proveniente de plantaciones dendroenergéticas ofrece un producto de mayor homogeneidad y poder calorífico (Díez y Quintero, 2008). El establecimiento de plantaciones dendroenergéticas generaría una mayor participación del sector forestal en la economía energética nacional, sin embargo, aún no se tiene claridad si es realmente significativo el aporte en términos ambientales y sociales (Young y Steffen, 2008). Por otra parte, la tasación del potencial energético de la biomasa lignocelulósica a escala industrial deriva de la transformación, prensado y estandarización de la misma, desconociendo la procedencia y el rendimiento en función del potencial energético que se obtiene por unidad de superficie, lo cual demanda de estudios que evalúen las especies forestales, los niveles de densidad de plantación, turnos de rotación y tipos de suelos, que permitan dilucidar la cantidad de biomasa que alcanzan las plantaciones forestales bajo diferentes tipos de manejo silvícola y productividad del sitio (Lemenih y Bekele, 2004).

En consecuencia, surge el interés en evaluar diversas especies para la generación de energía, basada en plantaciones forestales con manejos por fuera del ámbito silvícola tradicional; altas densidades de plantación en turnos de corta duración. Se espera además que los turnos de corta duración estimulen una mayor cantidad y calidad de rebrote (Wirthensohn y Sedgley, 1998), lo que disminuiría los costos de establecimiento al aprovecharse la misma cepa en cortas sucesivas, siendo el turno de rotación un factor fundamental para proyectar el tiempo al cual se alcanzaría el nivel óptimo de productividad (Del Fierro, 2001; González, 2000). Aunque la capacidad de rebrote depende de múltiples factores que se deben al manejo silvicultural, la edad de corta, y en mayor grado, al componente genético en particular (Ramírez y Schlatter, 1998). Una alternativa es la evaluación de plantaciones dendroenergéticas en turnos de corta rotación, las cuales presentan retornos de inversión de mayor liquidez que la que se obtiene con plantaciones forestales en presencia de turnos de rotación de mayor duración, como la oportunidad de ampliar la oferta a inversionistas agropecuarios al desarrollar proyectos forestales en suelos no aptos para la agricultura (Grigoletti, 2003; Mochiutti, 2007); a la vez que se disminuye la presión sobre el uso de cultivos agrícolas para la obtención de energía.

Las empresas con mayor participación en el sector forestal chileno (Forestal ARAUCO, Forestal Mininco y MASISA) se han interesado en la ejecución de éste tipo de investigaciones para la generación y cogeneración de energía a partir de biomasa lignocelulósica, fortaleciendo el compromiso con la participación conjunta dentro de un consorcio científico y tecnológico

denominado Consorcio Tecnológico BioEnercel S.A. (Belisário, 2010), en donde participa el Grupo de Investigación de Biomasa y BioEnergía de la Facultad de Ciencias Forestales (Universidad de Concepción), entre otros. Siendo este último un referente regional en estudios en plantaciones dendroenergéticas a través de la ejecución de proyectos de innovación en esta área (Proyecto INNOVA Bio Bio N° 06-PC S1-33 "Desarrollo de protocolos para la producción de biomasa de especies forestales de rápido crecimiento y corta rotación para la generación de bioenergía. 2007-2011").

Para efectos de estimar el potencial energético de la biomasa lignocelulósica proveniente de plantaciones dendroenergéticas (alta densidad de plantación y turnos de corta duración) como de las plantaciones forestales tradicionales (baja densidad de plantación y turnos de larga duración) nace el interés del consorcio en evaluar especies forestales establecidas sobre diferentes manejos silvícolas en diversos tipos de suelos para la cogeneración de energía, a través del desarrollo de los subproyectos "Plantaciones con Especies Leñosas de Corta Rotación para la Producción de Biocombustibles de Segunda Generación" y "Aprovechamiento Sustentable de Residuos de Rotación Forestal e Industrial para Producción de Biocombustibles de Segunda Generación" (subproyectos 08CTE03-01 y 08CTE03-01 02, respectivamente). De esta forma se permitiría incrementar paulatinamente la participación de la biomasa lignocelulósica en la matriz energética nacional, a través de un aumento en la confianza inversionista para la ejecución de éste tipo de proyectos.

El marco en el cual se desarrolla el presente trabajo es evaluar y comparar el crecimiento de un ensayo de *E. globulus*, establecido en tres tipos de suelos (arenales, sedimentos marinos y trumaos) en altas densidades de plantación 5.000, 10.000 y 15.000 arb/ha, en turnos de corta rotación, de 24, 36 y 48 meses, para evaluar el potencial de biomasa lignocelulósica con base a la combinación de los diversos tratamientos. Además, se estudia el efecto del rebrote posterior a la primera corta sobre cada uno de los tratamientos estudiados.

Marco Teórico

La biomasa vegetal tiene una amplia variedad de usos, entre ellos el de producir energía de diversas formas. La producción de energía a partir de biomasa lignocelulósica tiene la ventaja de ser altamente amigable con el ambiente (Nicholas, 2006), dada la capacidad de retener en su estructura el carbono atmosférico producto de la fijación del dióxido de carbono en el proceso de la fotosíntesis, neutralizando el fenómeno gaseoso que ocasiona el cambio climático mundial (Arellano y De Las Rivas, 2006).

El uso de la biomasa lignocelulósica es compactible con los tratados y convenios internacionales de política ambiental, como es el caso del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, a través de la implementación de herramientas de participación conjunta en la elaboración de Proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) (Naciones Unidas, 1998), en donde la biomasa lignocelulósica posee la más alta eficiencia de conversión entre las demás alternativas, que disminuye en función de la humedad que posea al momento de su transformación termoquímica (Diez y Quintero, 2008).

Condiciones Naturales de las Plantaciones Forestales en Chile

Chile posee grandes variaciones en el ambiente natural, entre ellas, la influencia del mar en la deposición de sus sedimentos sobre los terrenos del litoral Pacífico (Ruiz et al., 1965), además, el origen de los sedimentos continentales de la depresión central y la precordillera, consecuencia de la dinámica de la radiación, temperatura y precipitación; en ausencia de sedimentos afloran rocas metamórficas e ígneas (Schlatter, 1977).

En los suelos arenosos la falta de arcillas y/o sustancias húmicas son un limitante para la cantidad de elementos nutritivos presentes en el suelo, como su capacidad para retener agua en las temporadas de sequía (García, 1970), lo que disminuye el potencial que puedan alcanzar las plantaciones forestales sobre éste tipo de suelos. La complejidad del suelo en características y propiedades físico-químicas, tiene ponderación en el efecto sobre el crecimiento de las plantaciones (Schlatter y Gerding, 1995).

El clima además limita la posibilidad de adaptación de una especie a un sitio afectando la producción anual (Holdridge, 1947). Chile posee una alta variabilidad climática en sentido transversal (longitudinal), manifestándose en el balance hídrico y el régimen de temperaturas, disminuyendo la humedad relativa del aire a medida que se acerca a la precordillera, siendo más marcado en los periodos cálidos o estivales (Schlatter y Gerding, 1995).

En distintas zonas climáticas, las variables ambientales que mejor explican las diferencias cuantificadas en el crecimiento de especies forestales están relacionados con la precipitación media anual y su distribución estacional, la profundidad efectiva del suelo, el nivel del nitrógeno total y el fósforo disponible en el suelos, entre otros (Jackson y Gifford, 1974).

La variabilidad ecológica y ambiental que posee Chile, permite la introducción de un sin número de especies exóticas cuyo establecimiento disminuye la explotación excesiva de los bosques nativos (Rodríguez y Rodríguez, 1981). Las especies forestales exóticas aclimatadas en Chile se adaptan bien para su explotación comercial entre los paralelos 32° y 42° latitud sur. Más al sur, las especies forestales no encuentran condiciones aptas para su desarrollo, y hacia el norte, la insuficiencia de precipitaciones hace imposible su establecimiento y posterior supervivencia (Schlatter, 1977), de ahí la importancia de determinar los requerimientos ambientales por especie según las condiciones del sitio.

Plantaciones Dendroenergéticas

En las plantaciones forestales establecidas a baja densidad de plantación, las drásticas reducciones de la población de árboles ocasiona que el dosel no se cierre sino hasta edades avanzadas, generando no solo la proliferación de especies vegetales indeseables, sino la subutilización del sitio en términos económicos (Valdivieso, 1990). Además, modificar la densidad de plantación afecta la proporción de madera juvenil, la densidad de la madera, la producción volumétrica total, el volumen individual de los árboles, la estructura del rodal, el factor mórfoico de los árboles, el diámetro de las ramas de la copa, la formación de ramas epicórmicas, la supresión de malezas, el daño por el viento, sol y otros agentes.

Al disminuir la densidad de plantación, aumenta el crecimiento en diámetro, y en menor medida, en altura (Ferrere, 2005) disminuyendo la densidad de plantación en un 50% por competencia, y al aumentarse la densidad de plantación, aumenta el área basal, disminuye el DAP (diámetro a la altura del pecho, 1,30 m), la altura y la sobrevivencia (Dalla, 2008). De donde, la densidad de plantación se considera indiscutiblemente un factor delineante de la productividad forestal (Daniel *et al.*, 1982), siendo un factor determinante cuando se consideran rotaciones cortas sin manejo forestal, trayendo importantes implicaciones económicas (Coetzee, 1991).

Un incremento en la densidad de plantación no significa una respuesta en biomasa en la misma proporción, dada la competencia intraespecífica, puede incluso ocasionar no solo competencia entre los individuos cuando se alcanza el cierre del dosel a tempranos estadios del rodal (Alvarez *et al.*, 2003), sino la adaptación de las mismas desarrollando estrategias de facilitación bajo condiciones adversas, como la disminución de la evapotranspiración en suelos de arenales. Siendo relevante, para efectos de garantizar la ausencia de pérdidas de productividad en turnos sucesivos, que el suelo mantenga las condiciones iniciales previas a la cosecha de la primera rotación, asegurando la disponibilidad de nutrientes para los futuros turnos de crecimiento (Gayoso, 1996). De igual manera, las especies forestales deben ser tolerantes a la competencia de recursos, o poseer una alta capacidad de adaptación bajo condiciones adversas a su desarrollo, como una alta capacidad de rebrote para minimizar los costos de establecimiento.

OBJETIVO

Ampliar la base de selección de especies arbóreas para la producción de biocombustibles, bajo altas densidades iniciales de plantación, en turnos de corta rotación sobre diferentes condiciones de suelo.

METODOLOGÍA

Con el objeto de cuantificar la biomasa de plantaciones dendroenergéticas en altas densidades de plantación y turnos de corta rotación, a finales de la temporada de lluvias del año 2010 se estableció 36 parcelas experimentales sobre suelos de arenas (AR), 36 parcelas experimentales en sedimentos marinos (SM) y 36 parcelas experimentales en suelos trumaos (TR) (Figura N° 1), cuyo uso reciente correspondía a plantaciones de *Pinus radiata* (20-22 años), abarcando una superficie de estudio de 4,58 ha.

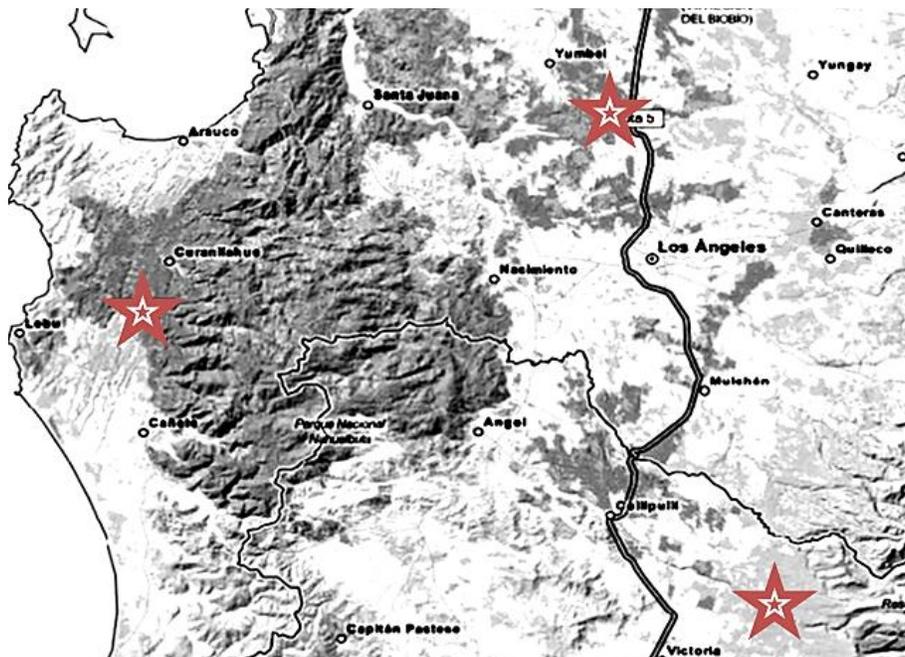


Figura N° 1
UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE ENSAYO EN SUELOS DE ARENALES, SEDIMENTOS MARINOS
Y TRUMAOS

El área de estudio en suelos de arenas se encuentra ubicada en el fundo La Aguada de Forestal Mininco, 15 km al sureste de Yumbel, Región del Bío Bío. Corresponde a la serie de suelos denominada Arenales (ARN), de procedencia aluvial, de formación reciente, profundos, poco desarrollados, derivado de arenas volcánicas de color negro, origen andesítico y basáltico; textura gruesa en el perfil y moderadamente gruesa en superficie. En el abanico aluvial del Laja la topografía es plana, con drenaje excesivo y permeabilidad rápida a muy rápida, el escurrimiento superficial es lento. Desde fines de otoño hasta mediados de la primavera presenta un nivel freático temporal, a una profundidad entre 70 a 120 cm que desaparece en la temporada de sequía. Con problemas por erosión eólica ligera a moderada. La fase ARN/1, en la cual se sitúa el ensayo, corresponde a suelos de textura superficial arenosa, profundos, planos y de drenaje excesivo, con presencia de algunos sectores de textura superficial franco arenosa y capacidad de uso IVs4 (Martínez, 2004).

En el caso de sedimentos marinos, el ensayo se encuentra ubicado en el fundo Pilpilco de Bosques ARAUCO, 8.5 Km al noreste de Los Álamos, Región del Bío Bío. Corresponde a la

serie de suelos denominada Asociación Merilupo, suelos profundos formados sobre sedimentos marinos, con textura franco arcillosa y arcillosa en el perfil, de color pardo rojizo en superficie. Terraza marina alta, disectada y ondulada, en pendientes de moderada a fuerte. Suelos bien estructurados que facilitan el desarrollo radicular y el almacenamiento de aguas lluvias. La superficie de evaluación se encuentra dentro de la variación MER/1, cuyos suelos son de textura superficial franco arcillosa, profundos, suavemente ondulados con 5 a 8% de pendiente y bien drenados. Capacidad de uso IVs4

La evaluación sobre suelos trumaos se encuentra ubicada en el fundo Parcelas Collipulli de MASISA, 34 Km al sureste de Collipulli, Región de La Araucanía. Pertenece a la serie de suelos Santa Bárbara, cuyos suelos son poco evolucionados formados sobre cenizas volcánicas recientes, depositadas sobre sustratos fluvio-glaciales o materiales fluviales difícilmente detectables por la profundidad en la que se encuentran. Suelos profundos a muy profundos, de buen drenaje, textura media franca o franca limosa superficialmente y franco limosa en el perfil, de buena estructura y arraigamiento, con porosidad y sin gravas los primeros 160 cm. Se presenta normalmente en lomas y cerros, y de manera reducida en suelos ligeramente ondulados (de 2 a 5% de pendiente). Permeabilidad moderada y escurrimiento superficial moderado en pendientes de hasta un 3%. El ensayo se encuentra en la fase SBA/2, suelos con textura superficial franco limosa, profundos, topografía ligeramente ondulada con 2 a 5% de pendiente y bien drenados, con capacidad de uso IIe1 (Martínez, 2004).

Los sitios fueron habilitados para la instalación de las parcelas; extracción de residuos de cosecha (AR y TR) y quema en fajas (SM), control de malezas preplantación y fertilización correctiva postplantación. Evaluando el *E. globulus* en densidades iniciales de plantación de 5.000, 10.000 y 15.000 arb/ha, sin replante y a diferentes turnos de rotación (24, 36 o 48 meses), en un diseño aleatorio en arreglo factorial con 3 bloques de repetición. Cada bloque esta conformado por 36 parcelas, de las cuales 12 corresponden a parcelas de medición de 18 x 18 m en AR y TR, y de 25 x 25 m en SM. La unidad de medición posee 30 individuos, los cuales están aislados de los demás tratamientos por varias líneas de aislación, entre parcelas adyacentes.

Para estimar el crecimiento y rendimiento de las plantaciones dendroenergéticas de *E. globulus* se realizó mediciones del diámetro a 10 cm del cuello (DAC), diámetro normal a 1.3 m de altura (DAP), altura total, supervivencia, competencia intraespecífica, condición fitosanitaria, calidad de la plantación y coeficiente de esbeltez. Con base a los valores medios de altura total (Hm) y área basal por unidad experimental, se desarrolló un análisis de varianza con valores críticos al 5% (para la densidad de plantación y tipo de suelo) con el propósito de comparar las medias entre los diferentes tratamientos.

RESULTADOS Y DISCUSION

Sobre la base de los tres tipos de suelos en los cuales se llevó a cabo el ensayo, se evidencia que en sedimentos marinos es donde se presenta la mayor tasa de supervivencia, independiente de la densidad de plantación inicial (Figura N° 2), en cambio en los suelos de arenales y de trumaos, en parcelas experimentales de 15.000 arb/ha, fue donde se presentó el mayor deceso de individuos durante los primeros 24 meses de evaluación.

En los suelos trumaos la supervivencia se estabilizó a partir del primer año, en los suelos arenales esta continua disminuyendo a medida que transcurre el tiempo. Aun cuando los ensayos establecidos a 15.000 arb/ha han alcanzado densidades próximas a los 10.000 arb/ha, se debe considerar que no presentan la misma dinámica, dado que mientras los de 10.000 arb/ha los individuos adyacentes se encuentran a un metro de distancia, a densidades de 15.000 arb/ha, la distancia es una quinta parte más corta (0,81 m) lo cual ocasiona una mayor competencia por luz, agua y nutrientes.

En el caso de los ensayos sobre suelos de arenales, la causa de una menor supervivencia en parte se presentó en la fase postestablecimiento de la plantación, debido a un menor retención de agua como a un mayor albedo, lo que dificulta el establecimiento de los *Eucalyptus* en este tipo de suelos.

En el caso de los ensayos en suelos trumaos la mortandad inicial esta asociada a una mayor competencia por luz, dado el acelerado y agresivo crecimiento de las malezas, que requería de un control más temprano y efectivo, que sobre la maleza presente en los demás tipos de suelos.

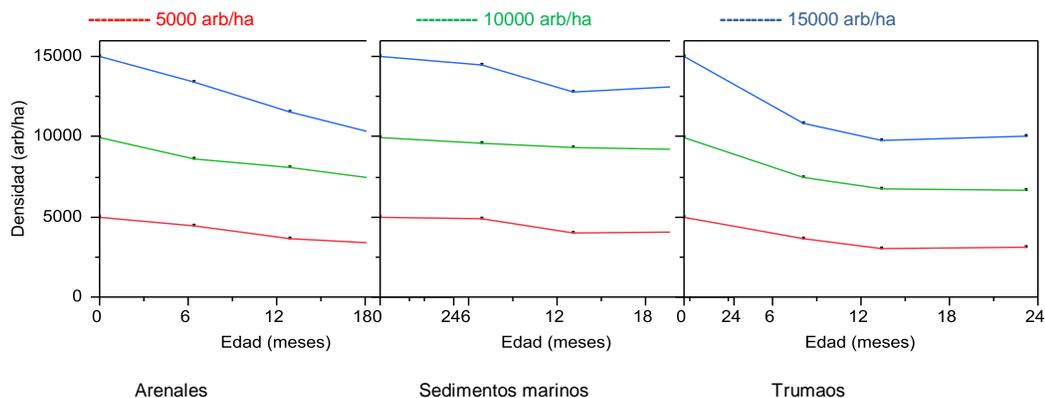


Figura N° 2
DINÁMICA DE LA DENSIDAD DE PLANTACIÓN EN EL TIEMPO

Con base a la densidad de plantación, el análisis de varianza continua presentando diferencias significativas entre los diferentes tratamientos para cada tipo de suelo, a excepción de lo registrado en el mes 24 en suelos arenales, donde el tratamiento de 15.000 arb/ha presenta niveles bajos de supervivencia y no se diferencia estadísticamente ($P < 0,05$) de lo observado en el tratamiento de 10.000 arb/ha (Cuadro N° 1).

Cuadro N° 1
COMPARACIÓN MÚLTIPLE DE MEDIAS
EN SUELOS ARENALES A LOS 24 MESES

Contraste	Signo	Diferencia	+/- Limites
5000 - 10000	*	-3652.78	2913.8
5000 - 15000	*	-5875.00	2913.8
10000 - 15000		-2222.22	2913.8

* Indica diferencias estadísticas significativas
(Intervalo de confianza del 95%)

Sin embargo, el tratamiento de la densidad de plantación aun cuando continúan siendo contrastante a medida que crece el ensayo (a excepción del caso puntual previamente expuesto), esta no logra afectar la altura media (Hm) que alcanza el ensayo (Figura N° 3), en donde en ninguna de las observaciones, bajo ningún tipo de suelo, logró presentar algún valor medio que se diferenciase de manera significativa de los otros dos tratamientos.

Lo anterior difiere un poco con lo observado en el área basal (considerando la lectura del área basal a una altura de 0.10 m), en donde el tratamiento de la densidad de plantación en suelos de arenales solo logra diferenciar los tratamientos de 5.000 y 15.000 arb/ha, dado que el de 10.000 arb/ha no presenta una diferencia estadísticamente significativa del resto, sin embargo, luego del primer año no se logran diferenciar de manera significativa los tres tratamientos ($P < 0,05$).

Por otra parte, en sedimentos marinos solo durante los primeros seis meses de establecido el ensayo se logró diferenciar de manera significativa el tratamiento de 15.000 arb/ha, posteriormente, a los 24 meses de establecido el ensayo no presentó diferencia significativa con las densidades de plantación nominal de 5.000 y 10.000 arb/ha; el tratamiento de 10.000 arb/ha a partir del primer año no logra diferenciarse de lo observado en el de 15.000 arb/ha.

En suelos trumaos por su parte, durante los primeros 24 meses de mediciones los tratamientos de 10.000 y 15.000 arb/ha no alcanzan a diferenciarse estadísticamente entre si, a diferencia del de 5.000 arb/ha que presenta valores contrastantes de menor tamaño a lo observado en los otros dos tratamientos.

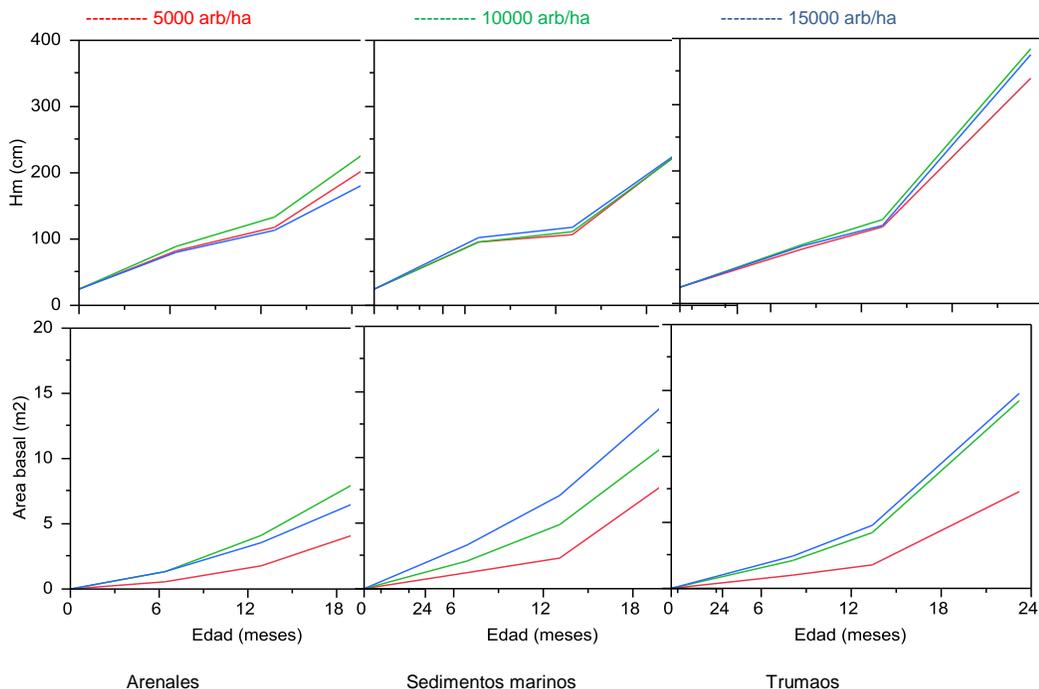


Figura N° 3
EVOLUCIÓN DE LA ALTURA MEDIA (Hm) Y EL ÁREA BASAL
SEGÚN LA DENSIDAD DE PLANTACIÓN POR TIPO DE SUELO

Al multiplicar el índice de biomasa (d^2h) por el número de individuos sobrevivientes, para efectos prácticos de poder evaluar la productividad en biomasa obtenida en cada tratamiento por unidad de superficie (Figura N° 4), se presenta que en el caso tanto de los arenales como de los sedimentos marinos no existe una diferencia significativa entre las densidades de plantación al final de los 24 meses.

Sin embargo, en suelos trumaos los tratamientos de 10.000 y 15.000 arb/ha se distancian de manera estadísticamente significativa de lo obtenido a 5.000 arb/ha, como consecuencia de una área basal menor.

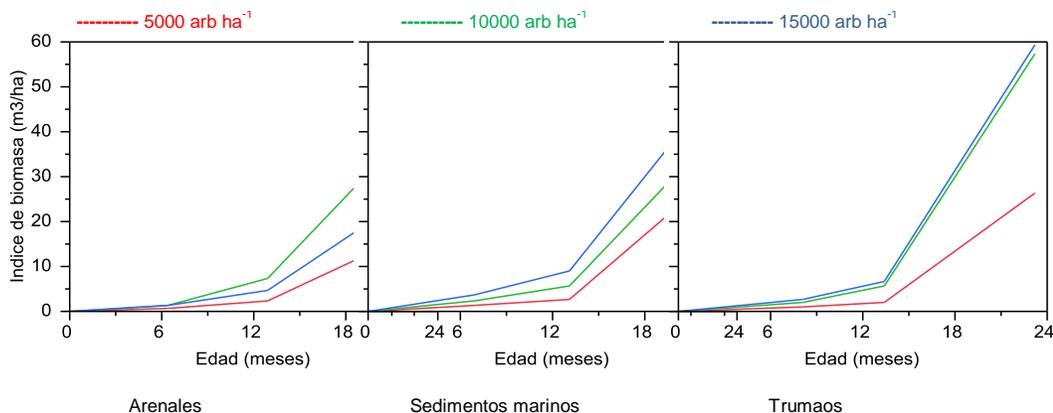


Figura N° 4
EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE BIOMASA (d²h) POR UNIDAD DE SUPERFICIE Y TIPO DE SUELO

CONCLUSIONES

En términos generales, el *Eucalyptus globulus*, independiente de la densidad de plantación nominal (5.000, 10.000 o 15.000 arb/ha) produce la misma cantidad de biomasa, por tipo de suelo. No siendo suficiente las moderadas diferencias que se presentaron en área basal, para afectar la cantidad de biomasa presente en el fuste.

En consecuencia, debido a los altos costos de establecimiento que conllevan plantaciones de 10.000 y 15.000 arb/ha, más la alta mortalidad que presenta esta última densidad, con plantaciones de 5.000 arb/ha se obtendría una cantidad de biomasa que no se diferenciaría estadísticamente de las de mayor densidad, tanto en suelos arenales como en sedimentos marinos.

En suelos trumaos en tanto, una densidad de 10.000 arb/ha presentaría la misma productividad que la de 15.000 arb/ha, superando de manera significativa ($p < 0,05$) la obtenida a 5.000 arb/ha.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al Consorcio Tecnológico BioEnercel y a Bosques ARAUCO, Forestal MININCO y MASISA por la participación en la investigación y su financiamiento.

REFERENCIAS

- Alvarez, M. F., Barrio, M., Gorgoso, J. y Alvarez, J. G., 2003.** Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. Investigación Agraria. Sistemas y recursos forestales 12, 25-36.
- Arellano, J. B. y De Las Rivas, J., 2006.** Plantas y cambio climático. Investigación y Ciencia, 42-50.
- Belisário, R., 2010.** Chile quer dobrar área de plantações florestais para obter combustível. Ciência e Cultura 62, 17-18.
- Coetzee, J., 1991.** The influence of stand density on the yield of *Eucalyptus grandis*: a comparison between a good site and a poor site at age 4 years. In, pp. 2-6.

- Dalla, F., 2008.** Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus grandis* en Entre Ríos, Argentina. *Forest Systems* 4, 57-71.
- Daniel, T. W., Helms, J. A. y Baker, F. S., 1982.** Principios de silvicultura. McGraw-Hill.
- Del Fierro, P., 2001.** Efecto de tratamientos de corte sobre el rebrote de *Acacia caven* (Mol.), en Aucó, IV región. Memoria de Título. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, Chile.
- Díez, J. F. P. y Quintero, R. S., 2008.** Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistemático. *Energética*, 19-34.
- Ferrete, P., 2005.** Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus globulus* en un ensayo Nelder modificado. *Investigación Agraria. Sistemas y recursos forestales* 14, 174-184.
- Figueroa, E., 2009.** Escenario Energético de Chile. Seguridad y eficiencia energética: Un aporte científico para la generación de políticas públicas, 51.
- García, O., 1970.** Índices de sitio para pino insigne en Chile. Santiago, Chile. INFOR, Serie de Investigación: 2. 29 p.
- Gayoso, J., 1996.** Costos ambientales en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. Bosque (Chile). (17, 15-26.
- González, M., 2000.** Evaluación de la capacidad de rebrote de *Acacia caven* (Mol.) frente a diferentes opciones de corte en la IV región de Chile. Memoria de Título. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, Chile.
- Grigoletti, A., 2003.** Sistema de Produção. Cultivo da Acácia Negra. Ministerio da Agricultura Pecuaria e Abastecimento. EMBRAPA Florestas Sistemas de Produção. Versão Eletrônica Jan/2003 Brasil.
- Holdridge, L. R., 1947.** Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science* 105, 367.
- Jackson, D. and Gifford, H. H., 1974.** Environmental Variables Influencing the Increment of Radiata Pine: Periodic Volume Increment. New Zealand Forest Service.
- Lemenih, M. and Bekele, T., 2004.** Effect of age on calorific value and some mechanical properties of three *Eucalyptus* species grown in Ethiopia. *Biomass and Bioenergy* 27, 223-232.
- Martínez, R., 2004.** Mapa de reconocimiento de suelos de la VIII Region del Bio-Bio (sector sur). Memoria para obtener el título profesional de Agrónomo. Facultad de Agronomía. Universidad de Chile.
- Mochiutti, S., 2007.** Produtividade e sustentabilidade de plantações de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul. 270 f.
- Montoya, C., 2009.** Salud, cambio climático y contaminación. Actualización acerca de las fuentes alternativas de energía en Chile. *Medico Sociales* 49, 280-307.
- Naciones Unidas, 1998.** Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
- Nicholas, I., 2006.** Bioenergy options for New Zealand. Resource Assessment short-rotation Forestry Crops. SCION, New Zealand.
- Ramirez, J. y Schlatter, J., 1998.** Analisis de variables de sitio para estimar el establecimiento en Chile de *Acacia melanoxylon* R. Br. Bosque (Chile). (19, 37-51.
- Rodríguez, G. y Rodríguez, R., 1981.** Las especies de *Pinaceae* cultivadas en Chile. Bosque 4, 25-43.
- Rodríguez, V., 2011.** Dendroenergía en Chile: Presente, futuro y aportes desde la sociedad civil. *The bioenergy international*. España, 28-29.
- Ruiz, C., Aguirre, L., Corvalán, J., Klohn, C., Klohn, E. y Levi, B., 1965.** Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas 305.
- Schlatter, J., 1977.** La relación entre suelo y plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile Central, análisis de la situación actual y planteamientos para su futuro manejo. Bosque (Chile). (2, 12-31.
- Schlatter, J.E. y Gerding, V., 1995.** Método de clasificación de sitios para la producción forestal, ejemplo en

Chile. Bosque 16, 13-20.

Spatari, S., Bagley, D. M. and Mac Lean, H. L., 2010. Life cycle evaluation of emerging lignocellulosic ethanol conversion technologies. *Bioresource technology* 101, 654-667.

Suárez, J. y Martín, G., 2010. Producción de agroenergía a partir de biomasa en sistemas agroforestales integrados: Una alternativa para lograr la seguridad alimentaria y la protección ambiental. *Pastos y Forrajes* 33.

Valdivieso, J. A., 1990. Un método alternativo de manejo para plantaciones: Espaciamento concentrado en árboles selectos. *Bosque* 11, 3-8.

Wirthensohn, M. G. and Sedgley, M., 1998. Effect of pruning on regrowth of cut foliage stems of seventeen *Eucalyptus* species. *Australian journal of experimental agriculture* 38, 631-636.

Wompner, F.H., 2010. Biocombustibles En Chile. ¿Una Alternativa Factible? Desarrollo local sostenible.

Young, C. E. F. y Steffen, P.G., 2008. Biocombustibles como estrategia de desarrollo: ¿Rumbo hacia la sustentabilidad o hacia una nueva periferia? *Revista Polis* 7, 167-177.