



Facultad de
Ciencias Agrarias
y Forestales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

**Desarrollo de herramientas para la sustentabilidad de
plantaciones forestales con fines energéticos con *Eucalyptus
grandis* en la provincia de Corrientes**



Ing. Forestal Alejandro Daniel Maggio

Tesis para optar por el grado de
Doctor de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP

Director: Dr. Alejandro Martinez Meier

Codirector: Dr. Juan Manuel Cellini

2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a CONICET e INTA, por haber hecho posible la ejecución de mis estudios doctorales a través de su sistema de becas. A la EEA INTA Bella Vista, por ser el lugar donde he logrado formarme como profesional y donde siempre me he sentido muy cómodo en el desempeño de mis actividades. A la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP, por la posibilidad de acceder a una educación de grado y posgrado pública y gratuita.

Agradezco con inmensa gratitud a mis directores, Alejandro Martínez Meier y Juan Manuel Cellini, por su dedicación y aporte intelectual, y porque han respetado mis tiempos y maneras de trabajo con buena predisposición y apoyo, y han sabido transmitirme sus conocimientos de forma clara y amena.

A mi codirector de beca, Federico Caniza, un especial agradecimiento, por darme la oportunidad de iniciar este desafío, abriendo las puertas para incorporarme al INTA y al grupo forestal, y por la enorme colaboración brindada durante todo este tiempo para que esto sea posible.

A mis compañeros de la EEA INTA Bella Vista, Memo, Oscar y Daniel, por la gran ayuda y predisposición en todas las actividades realizadas a campo y laboratorio en la presente tesis, y por hacer del trabajo diario una actividad placentera y estar presentes desde el principio compartiendo trabajo y experiencias.

Por otra parte, agradecer a mi familia y en particular a Majo por el acompañamiento en esta tesis y vida, sus palabras y gestos de apoyo y sostenimiento en momentos de ansiedad e incertidumbre han sido muy reconfortantes.

.

RESUMEN

Considerando los efectos ambientales negativos producidos por el uso de combustibles fósiles y la incertidumbre de su disponibilidad futura, la biomasa forestal para uso energético se presenta como una alternativa para la mitigación del cambio climático. La producción de bosques con fines energéticos conlleva a varios interrogantes sobre la sustentabilidad y la eficiencia en el uso de los recursos. Estos sistemas productivos intensivos determinan un uso diferente de los nutrientes y el agua en comparación con los sistemas de producción convencionales. Este hecho genera incertidumbre en la perspectiva de una producción sostenida a largo plazo, si se considera la baja fertilidad natural de los suelos en los que se establecen las plantaciones forestales.

La provincia de Corrientes posee más de 500.000 ha forestadas con los géneros *Pinus* y *Eucalyptus*. Las lomas y planicies arenosas, de aproximadamente 2.000.000 ha, representan el 60% de la superficie con aptitud forestal de la provincia. Su suelo es arenoso y se caracteriza por tener baja fertilidad natural, bajo contenido de materia orgánica y ser susceptible a la erosión hídrica y eólica. Las características de estos ambientes ponen en relieve la existencia de riesgos de degradación si no son manejados bajo prácticas de manejo y sistemas productivos ajustados a las condiciones específicas. Dado que en la provincia recientemente se han instalados proyectos dendroenergéticos, una revisión de las prácticas de manejo silvícolas debe ser realizada. Para *Eucalyptus* sp., es escasa la información sobre la producción de biomasa y el manejo silvícola adecuado en esquemas de muy altas densidades de plantación en Argentina.

El objetivo general de esta tesis doctoral fue evaluar diferentes densidades de plantación con fines energéticos propuestos para el clon *Eucalyptus grandis* W.Hill en las lomas y planicies arenosas de la provincia de Corrientes.

El material de estudio se obtuvo de un módulo experimental de densidad de plantación de 2 clones de *Eucalyptus* sp. establecidos en INTA, EEA Bella Vista. En los tratamientos de 3.333 árboles ha⁻¹ (AD), 1.429 árboles ha⁻¹ (MD) y 909 árboles ha⁻¹ (BD) del clon *E. grandis*, se registró la supervivencia, se determinó la productividad volumétrica y de biomasa aérea, y la densidad básica de la madera a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad. Se determinó el contenido de nutrientes del suelo y de la biomasa aérea a los 50 meses de edad. Se evaluó la exportación de nutrientes bajo distintos sistemas de aprovechamiento y se determinó el turno de aprovechamiento. Se evaluó la influencia de parámetros ambientales en el crecimiento.

Para ello, el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) y la altura total (H, m) de todos los individuos fueron evaluados en cuatro períodos, a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad. Seis individuos de cada tratamiento fueron apeados y cubicados en cada período. Con los valores de volumen con y sin corteza, DAP y H de los individuos apeados fueron ajustados modelos de regresión para estimar el volumen individual de todos los árboles. En cada árbol apeado se tomaron rodajas del fuste al DAP para la determinación de la densidad básica de la madera y se realizaron estudios de biomasa. Se ajustaron modelos de regresión para estimar la biomasa individual por compartimento de todos los árboles. Se tomaron muestras de cada compartimento de la biomasa y del suelo por tratamiento a los 50 meses de edad para determinar los contenidos de nutrientes (N, P, K, Mg y Ca). Durante un periodo de 2 años, se registraron parámetros ambientales dentro y fuera de los tratamientos y a su vez se determinó el contenido de agua del suelo y se registró el incremento mensual del DAP de los árboles de cada tratamiento.

Como resultados de las evaluaciones determinamos que la supervivencia no registró diferencias significativas ($p=0,4175$) entre tratamientos. A los 12 meses fue del 93 ± 8 %, 81 ± 14 % y 96 ± 4 % para los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación respectivamente. A los 24 meses, los tratamientos registraron nuevos árboles muertos, disminuyendo la supervivencia al 85 ± 22 %, 70 ± 14 % y 86 ± 16 %, respectivamente. No se registraron nuevos árboles muertos en meses posteriores.

La densidad de plantación influyó en el crecimiento individual del árbol. Se registraron diferencias significativas para las variables DAP, H y volumen individual entre el tratamiento AD respecto a MD y BD. El volumen por hectárea fue significativamente diferente hasta los 36 meses de edad. No obstante, a los 50 meses, esas diferencias dejaron de ser significativas ($p=0,0663$), AD registró $203,8 \pm 22,4$ m³ ha⁻¹, MD $178,9 \pm 29,6$ m³ ha⁻¹ y BD $138,8 \pm 28,4$ m³ ha⁻¹.

La biomasa acumulada por hectárea se incrementó al aumentar la densidad de plantación y la edad. Fue significativamente diferente a los 12 meses de edad, siendo mayor AD respecto de MD y BD. A los 50 meses, esas diferencias dejaron de ser significativas, aunque AD registró mayor productividad, representando un valor superior de biomasa total en 5,4 % y 24,2 % respecto a MD y BD. Se registró un cambio en la proporción de la biomasa de los compartimentos del árbol en relación con la edad. La biomasa de fuste tuvo un aumento en la proporción de la biomasa total a lo largo del período evaluado. A los 50 meses se maximizó la proporción de biomasa de fuste en relación a la biomasa total (88,3 %, 84,8 % y 82,6 %).

Se registró un aumento de la densidad básica de la madera de cada tratamiento en cada periodo de evaluación. Esta fue significativamente diferente entre el tratamiento AD con respecto a MD y BD. A los 50 meses fue de $446,4 \pm 26,2 \text{ kg m}^{-3}$, $475,3 \pm 14,0 \text{ kg m}^{-3}$, $477,3 \pm 11,6 \text{ kg m}^{-3}$ para AD, MD y BD respectivamente.

La densidad de plantación no influyó en el contenido de nutrientes, materia orgánica y carbono orgánico del suelo, no se registraron diferencias significativas entre ellas. El contenido de nutrientes no fue significativamente diferente a nivel de biomasa aérea total, sin embargo, al analizar a nivel de compartimentos (hojas, ramas, corteza y fuste) se establecieron diferencias significativas. En la copa (hojas y ramas) se encontraron las mayores concentraciones de nutrientes del árbol, mientras que en el fuste las menores concentraciones. El Ca es el nutriente de mayor concentración en todos los compartimentos del árbol y el P el de menor concentración. La mayor concentración de los nutrientes N, P y K se registran en las hojas, y del Ca en la corteza.

Entre tratamientos no se determinaron diferencias significativas en la exportación de nutrientes al considerar el mismo sistema de aprovechamiento (árbol completo, fuste con corteza, fuste sin corteza). En cambio, entre sistemas de aprovechamiento se registraron diferencias significativas en la remoción de nutrientes. La cosecha del árbol completo representa un valor superior de exportación entre 32 % y 78 % respecto a cosechar el fuste con corteza o sin corteza respectivamente. El turno de aprovechamiento es cercano a los 4 años, según el criterio de cortabilidad de máxima producción continua.

Analizando los parámetros ambientales registrados durante 2 años, determinamos que las plantaciones forestales modifican parámetros del sistema aire-suelo. Dentro de ellas las temperaturas máximas son menores y las mínimas mayores, aumenta la humedad relativa ambiente y la temperatura del suelo, y disminuye el contenido hídrico del mismo en forma significativa respecto de fuera de ella. Entre los tratamientos, no se registraron diferencias significativas en el contenido de agua del suelo. La variación de los parámetros ambientales entre años influyó en el crecimiento del clon *E. grandis*, reduciendo el crecimiento del área basal en todas las densidades de plantación en forma similar (33 - 35 %) entre años.

Las 3 densidades de plantación evaluadas tienen aptitud para el establecimiento de plantaciones energéticas por sus altas productividades, y al no diferenciarse significativamente entre ellas, en el contenido de agua y nutrientes del suelo, y en el contenido de nutrientes de la biomasa aérea. La densidad de plantación de 1.429 árboles ha^{-1} es recomendada para el establecimiento de plantaciones

dendroenergéticas. La misma optimizó la producción de biomasa de fuste por hectárea y el desarrollo individual, posibilitando la obtención de otros productos forestales, además de la biomasa para energía. En un contexto de cambio climático será cada vez más relevante considerar la multifuncionalidad o multipropósito de las plantaciones forestales, permitiendo la obtención de diversos productos forestales y además cumpliendo otras importantes funciones como fijación de C, regulación el ciclo del agua y el clima, entre otras.

El aprovechamiento de todos los compartimentos del árbol pone en peligro el mantenimiento de la fertilidad del suelo y la capacidad productiva del sitio. La cosecha del fuste sin corteza es el sistema de aprovechamiento más adecuado para estos sistemas intensivos de producción, reduciendo la exportación de nutrientes en forma significativa, y mejorando la sostenibilidad de los nutrientes del suelo.

El establecimiento de plantaciones forestales produce modificaciones en el ambiente, sin embargo, pueden ser utilizadas como una herramienta de manejo en un marco de planificación de uso del territorio. La variación de los parámetros ambientales entre años influye en el crecimiento del clon *E. grandis*. Según el grado de competencia por recursos (densidad de plantación) diferentes parámetros tienen influencia en el crecimiento con distintos niveles de significancia. El crecimiento se redujo de forma similar en las 3 densidades de plantación, poniendo una señal de alerta, ya sea que produzcamos para energía o madera sólida. El cambio climático juega un papel importante en las plantaciones de *Eucalyptus* sp., pudiendo afectar su productividad a largo plazo. Mejorar nuestro conocimiento de cómo el *E. grandis* responde a la variación climática es relevante para garantizar la viabilidad a largo plazo de las plantaciones forestales sin comprometer su productividad y sustentabilidad ambiental.

El impulso a la generación de energías renovables, en particular a partir de la biomasa forestal, son oportunidades para la provincia de Corrientes, ya que cuenta con el recurso y las condiciones climáticas favorables, representando un aporte significativo a la captura de C y contribuyendo a la mitigación del calentamiento global. Representa un impulso sectorial y beneficia el desarrollo económico regional. Las plantaciones dendroenergéticas con *E. grandis* son una fuente promisoría de biomasa para la generación de energía. Sin embargo, aún existen interrogantes sobre la sustentabilidad de la mismas a escalas de paisaje por lo que resulta necesario continuar estudiando estos sistemas intensivos de producción, dado la necesidad de planificar las actividades productivas regionales en un marco de sustentabilidad ambiental.

ABSTRACT

Considering the negative environmental effects produced by the use of fossil fuels and the uncertainty of their future availability, forest biomass for energy use is presented as an alternative for climate change mitigation. The production of forests for energy purposes raises several questions about sustainability and efficiency in the use of resources. These intensive production systems determine a different use of nutrients and water compared to conventional production systems. This fact generates uncertainty in the perspective of a sustained production in the long term, considering the low natural fertility of the soils in which the forest plantations are established.

The province of Corrientes has more than 500,000 ha forested with the genera *Pinus* and *Eucalyptus*. The sandy hills and plains, of approximately 2,000,000 hectares, represent 60% of the surface area suitable for forestry in the province. Its soil is sandy and is characterized by having low natural fertility, low organic matter content and being susceptible to water and wind erosion. The characteristics of these environments highlight the existence of degradation risks if they are not managed under management practices and production systems adjusted to specific conditions. Since dendroenergetic projects have recently been installed in the province, a review of silvicultural management practices must be carried out. For *Eucalyptus* sp., information on biomass production and proper silvicultural management in schemes of very high planting densities in Argentina is scarce.

The general aim of this doctoral thesis was to evaluate different silvicultural managements for energy purposes proposed for *Eucalyptus grandis* W.Hill in the hills and sandy plains of the Province of Corrientes.

The study material was obtained from an experimental module of planting density of 2 clones of *Eucalyptus* sp. established in INTA, EEA Bella Vista. In the treatments of 3333 trees ha⁻¹ (AD), 1429 trees ha⁻¹ (MD) and 909 trees ha⁻¹ (BD) of the clone of *E. grandis*, survival was recorded, volumetric productivity and productivity were determined. aboveground biomass, and basic wood density at 12, 24, 36, and 50 months of age. The nutrient content of the soil and the aerial biomass were determined at 50 months of age. The export of nutrients under different harvesting systems was evaluated and the shift of harvesting was determined. The influence of environmental parameters on growth was evaluated.

For this, the diameter at breast height (DBH, cm) and total height (H, m) of all individuals were evaluated in four periods, at 12, 24, 36 and 50 months of age. Six individuals from

each treatment were felled and cubed in each period. With the volume values with and without bark, DBH and H of the felled individuals, regression models were fitted to estimate the individual volume of all trees. In each felled tree, slices were taken from the stem to the DBH for the determination of the basic density of the wood and biomass studies were carried out. Regression models were fitted to estimate the individual biomass per compartment of all trees. Samples were taken from each compartment of the biomass and soil by treatment at 50 months of age to determine the nutrient contents (N, P, K, Mg and Ca). During a period of 2 years, environmental parameters were recorded inside and outside the treatments and, in turn, the water content of the soil was determined and the monthly increase in DBH of the trees of each treatment was recorded.

As results of the evaluations, we determined that survival did not register significant differences ($p=0.4175$) between treatments. At 12 months it was $93 \pm 8 \%$, $81 \pm 14 \%$ and $96 \pm 4 \%$ for the treatments of high, medium and low planting density respectively. At 24 months, the treatments registered new dead trees, decreasing survival to $85 \pm 22 \%$, $70 \pm 14 \%$ and $86 \pm 16 \%$, respectively. No new dead trees were recorded in subsequent months.

The planting density influenced the individual growth of the tree. Significant differences were recorded for the variables DBH, H and individual volume between the AD treatment compared to MD and BD. Volume per hectare was significantly different up to 36 months of age. However, at 50 months of age, these differences were no longer significant ($p=0.0663$), AD registered $203.8 \pm 22.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, MD $178.9 \pm 29.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ and BD $138.8 \pm 28.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

The accumulated biomass per hectare increased with increasing planting density and age. It was significantly different at 12 months of age, with AD being higher than MD and BD. At 50 months, these differences were no longer significant, although AD registered higher productivity, representing a higher value of total biomass of 5.4% and 24.2% compared to MD and BD. A change in the proportion of the biomass of the tree compartments in relation to age was recorded. The stem biomass had an increase in the proportion of the total biomass throughout the evaluated period. At 50 months the proportion of stem biomass in relation to the total biomass was maximized (88.3 %, 84.8 % and 82.6 %).

An increase in the basic density of the wood of each treatment was recorded in each evaluation period. This was significantly different between the AD treatment with respect

to MD and BD. At 50 months it was $446.4 \pm 26.2 \text{ kg m}^{-3}$, $475.3 \pm 14.0 \text{ kg m}^{-3}$, $477.3 \pm 11.6 \text{ kg m}^{-3}$ for AD, MD and BD respectively.

The planting density did not influence the content of nutrients, organic matter and organic carbon of the soil, no significant differences were recorded between them. The nutrient content was not significantly different at the level of total aerial biomass, however, when analyzing at the level of compartments (leaves, branches, bark and stem) significant differences were established. The highest concentrations of tree nutrients are found in the crown (leaves and branches), while the lowest concentrations are found in the stem. Ca is the nutrient with the highest concentration in all compartments of the tree and P the one with the lowest concentration. The highest concentration of the nutrients N, P and K are recorded in the leaves, and Ca in the bark.

Between treatments, no significant differences were determined in the export of nutrients when considering the same harvesting system (whole tree, stem with bark, stem without bark). On the other hand, significant differences in nutrient removal were recorded between harvesting systems. Harvesting the complete tree represents a higher export value between 32 % and 78 % compared to harvesting the stem with or without bark, respectively. The harvest period is close to 4 years, according to the cutability criterion of maximum continuous production.

Analyzing the environmental parameters recorded for 2 years, we determined that forest plantations modify parameters of the air-soil system, within it the maximum temperatures are lower and the minimum higher, the ambient RH and soil temperature increase, and the water content decreases in a significant way with respect to outside of it. Among the treatments, there were no significant differences in the soil water content. The variation of the environmental parameters between years influenced the growth of *E. grandis*, reducing the growth of the basal area in all planting densities in a similar way (33 - 35 %) between years.

The 3 evaluated plantation densities are suitable for establishing energy plantations due to their high productivity, and because they do not differ significantly between them, in the water and nutrient content of the soil, and in the nutrient content of the aerial biomass. The planting density of 1429 trees ha^{-1} is recommended for the establishment of wood energy plantations. It optimized the production of stem biomass per hectare and individual development, making it possible to obtain other forest products, in addition to biomass for energy. In a context of climate change, it will be increasingly relevant to consider the multi-functionality or multi-purpose of forest plantations, allowing the

obtaining of various forest products and also fulfilling other important functions such as C fixation, regulation of the water cycle and the weather, among others.

The use of all compartments of the tree jeopardizes the maintenance of soil fertility and the productive capacity of the site. Harvesting the stem without bark is the most appropriate utilization system for these intensive production systems, significantly reducing the export of nutrients, and improving the sustainability of soil nutrients.

The establishment of forest plantations produces modifications in the environment, however, they can be used as a management tool in a land use planning framework. The variation of environmental parameters between years influences the growth of *E. grandis*. Depending on the degree of competition for resources (plantation density), different parameters influence growth with different levels of significance. Growth slowed similarly at all 3 planting densities, raising a red flag whether we are producing for energy or solid wood. Climate change plays an important role in *Eucalyptus* plantations, and may affect their productivity in the long term. Improving our knowledge of how *E. grandis* responds to climatic variation is relevant to guarantee the long-term viability of forest plantations without compromising their productivity and environmental sustainability.

The promotion of the generation of renewable energies, particularly from forest biomass, are opportunities for the province of Corrientes, since it has the resource and favorable climatic conditions, representing a significant contribution to the capture of C and contributing to the mitigation of global warming. In addition, it represents a sector boost and benefits regional economic development. Wood energy plantations with *E. grandis* are a promising source of biomass for power generation. However, there are still questions about their sustainability at landscape scales, so it is necessary to continue studying these intensive production systems, given the need to plan regional productive activities within a framework of environmental sustainability.

PUBLICACIONES

Maggio, A.D., Caniza, F.J., Martínez Meier, A. y Iermanó, M.J. (2019). *Caracterización del recurso forestal de la provincia de Corrientes, Argentina: su importancia para un manejo sustentable*. I Congreso Argentino de Agroecología. Mendoza, Argentina. Disponible en: <https://bdigital.uncu.edu.ar/14315>

Maggio, A.D., Caniza, F.J., Cellini, J.M. y Martínez Meier, A. (2021). *Productividad volumétrica de sistemas productivos con Eucalyptus grandis*. XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina. Disponible en: <https://www.jornadasforestales.com.ar/book/revista/revista19-10-2021a.pdf>

Maggio, A.D., Caniza, F.J., Iermanó, M.J., Cellini, J.M. y Martínez Meier, A. (2021). *Sustentabilidad ambiental de sistemas productivos con eucalipto: contenido hídrico del suelo y cambio climático*. II Congreso Argentino de Agroecología. Resistencia, Chaco, Argentina. Disponible en: <https://rid.unam.edu.ar/handle/20.500.12219/3883>

Maggio, A.D., Caniza, F.J., Cellini, J.M. y Martínez-Meier, A. (2022). Potencial dendroenergético de dos clones de *Eucalyptus* sp. en Corrientes, Argentina. *Madera y bosques*, 28 (1). Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/617/61772339005/61772339005.pdf>

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	7
PUBLICACIONES	11
TABLA DE CONTENIDOS	12
LISTA DE TABLAS	14
LISTA DE FIGURAS	17
1. CAPITULO 1: Introducción	20
1.1. Marco teórico	20
1.2. Recurso forestal de la provincia de Corrientes	23
1.3. Hipótesis	27
1.4. Objetivo general	27
1.4. Objetivos específicos	28
1.5. Estructura y organización de la tesis	28
1.6. Bibliografía	29
2. CAPITULO 2: Aspectos metodológicos generales	38
2.1. Área de estudio	38
2.2. Diseño experimental	39
2.3. Bibliografía	41
3. CAPITULO 3: Potencial dendroenergético de clones de <i>Eucalyptus</i> sp. en Corrientes, Argentina	42
3.1. Introducción	42
3.2. Materiales y Métodos	46
3.3. Resultados	55
3.4. Discusión	65
3.5. Conclusión	70

3.6. Bibliografía	71
4. CAPITULO 4: Exportación de nutrientes de la biomasa forestal al momento del aprovechamiento en diferentes densidades de plantación con fines energéticos del clon <i>Eucalyptus grandis</i>	83
4.1. Introducción	83
4.2. Materiales y Métodos	84
4.3. Resultados	87
4.4. Discusión	93
4.5. Conclusión	96
4.6. Bibliografía	97
5. CAPITULO 5: Influencia de parámetros ambientales en el crecimiento del clon <i>Eucalyptus grandis</i>	104
5.1. Introducción	104
5.2. Materiales y Métodos	105
5.3. Resultados	110
5.4. Discusión	114
5.5. Conclusión	118
5.6. Bibliografía	119
6. CAPITULO 6: Integración: principales resultados y consideraciones	125
6.1. Bibliografía	138
ANEXO I	148
ANEXO II	154
ANEXO III	159

LISTA DE TABLAS

2. CAPITULO 2: Aspectos metodológicos generales

Tabla 1. Módulo experimental con cinco tratamientos de densidad de plantación	39
---	----

3. CAPITULO 3: Potencial dendroenergético de clones de *Eucalyptus* sp. en Corrientes, Argentina

Tabla 1. Variable, tipo y variación de las variables consideradas en el estudio de ACP	54
--	----

Tabla 2. Parámetros y estadísticos de los modelos de regresión ajustados para las estimaciones de volumen y biomasa por clon. Los coeficientes a, b y c representan los parámetros de los modelos de regresión	57
--	----

Tabla 3. Producción promedio de biomasa por árbol y desviación estándar (kilogramos de materia seca) de los clones 2136 y X78 a los 12 y 24 meses de edad	58
---	----

Tabla 4. Diámetro a la altura del pecho (DAP), altura (H), volumen con y sin corteza (volumen c/c y s/c) y densidad básica de la madera (DB) evaluadas en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) del clon <i>E. grandis</i> a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad	60
--	----

Tabla 5. Parámetros y estadísticos de los modelos de regresión ajustados para las estimaciones de volumen y biomasa de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD)	62
--	----

Tabla 6. Producción promedio de biomasa por árbol (kg materia seca) y desvío estándar (de) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) evaluados a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad	62
---	----

4. CAPITULO 4: Exportación de nutrientes de la biomasa forestal al momento del aprovechamiento en diferentes densidades de plantación con fines energéticos del clon *Eucalyptus grandis*

Tabla 1. Valores medios y desvío estándar del Diámetro a la altura del pecho (DAP), altura (H), volumen con y sin corteza (volumen c/c y s/c) y biomasa de	
--	--

hojas, ramas, fuste y total) evaluados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) del clon <i>E. grandis</i> a los 50 meses de edad	88
Tabla 2. Concentración (% , ppm) y contenido de nutrientes del suelo (kg ha ⁻¹) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	89
Tabla 3. Concentración de nutrientes (g kg ⁻¹) de los compartimentos de la biomasa de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	89
Tabla 4. Contenido de nutrientes (kg ha ⁻¹) de los compartimentos de la biomasa de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	91
 5. CAPITULO 5: Influencia de parámetros ambientales en el crecimiento del clon <i>Eucalyptus grandis</i>	
Tabla1. Modelo de regresión lineal de IMAB, parámetros e índices estadísticos de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	114
 ANEXO I	
Tabla 1. Número de individuos evaluados en cada periodo del clon <i>E. grandis</i>	148
Tabla 2. Número de individuos evaluados en cada periodo del clon híbrido X78.....	149
Tabla 3. Variable, tipo y variación de las variables consideradas en el estudio de ACP	150
 ANEXO II	
Tabla 1. Temperatura máxima ambiente (°C) registrados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y la estación meteorológica (EM)	154
Tabla 2. Temperatura mínima ambiente (°C) registrados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y la estación meteorológica (EM)	155

Tabla 3. Humedad relativa ambiente (%) registrados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y la estación meteorológica (EM) 156

Tabla 4. Temperatura del suelo (°C) a los 10 cm de profundidad registrados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y la estación meteorológica (EM) 157

Tabla 5. Contenido hídrico del suelo (mm) de 0 - 30 cm de profundidad evaluado por gravimetría en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y un campo natural (CN) 158

ANEXO III

Tabla 1. Contenido de lignina evaluado a los 50 meses de edad de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) 160

Tabla 2. Costos de establecimiento de las densidades de plantación alta, media y baja (AD, MD y BD) 160

LISTA DE FIGURAS

1. CAPITULO 1: Introducción	
Figura 1. Plantaciones forestales de la provincia de Corrientes	24
Figura 2. Suelos de la provincia de Corrientes	26
2. CAPITULO 2: Aspectos metodológicos generales	
Figura 1. Ubicación de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Bella Vista del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)	38
Figura 2. Ubicación y croquis del módulo experimental de densidad de plantación de dos clones de <i>Eucalyptus</i> sp. establecido en la EEA INTA Bella Vista	40
3. CAPITULO 3: Potencial dendroenergético de clones de <i>Eucalyptus</i> sp. en Corrientes, Argentina	
Figura 1. a) clon <i>E. grandis</i> 2136, b) clon híbrido de <i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i> X78 a los 12 meses de edad	47
Figura 2. Clon <i>E. grandis</i> 2136 a los 24 meses de edad	48
Figura 3. Densidades de plantación de 3.333 árboles ha ⁻¹ (AD), 1.429 árboles ha ⁻¹ (MD) y 909 árboles ha ⁻¹ (BD) del clon <i>E. grandis</i> 2136 a los 50 meses..	49
Figura 4. Medición de altura luego del apeo	50
Figura 5. Cubicación del fuste	50
Figura 6. Estudios de biomasa aérea del clon <i>E. grandis</i> . Compartimentalización de la biomasa en hojas, ramas y fuste	53
Figura 7. Muestras de biomasa aérea de <i>E. grandis</i> en estufa de secado ...	53
Figura 8. a) Diámetro a la altura del pecho (DAP), b) altura total (H), c) volumen con corteza por árbol y d) densidad básica de la madera para los clones de <i>Eucalyptus</i> sp. a los 12 meses y a los 24 meses de edad	56
Figura 9. a) Correlaciones de los componentes principales de las variables de productividad, climáticas y ambientales en los clones de <i>Eucalyptus</i> sp. b) Gráfico de agrupamiento	58

Figura 10. Proporción de la biomasa total (%) de los compartimentos del árbol a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) del clon <i>E. grandis</i>	63
Figura 11. Evolución de la biomasa de hojas, ramas, fustes y total del clon <i>E. grandis</i> a los 12, 24, 36 y 50 meses de plantación de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD)	64
4. CAPITULO 4: Exportación de nutrientes de la biomasa forestal al momento del aprovechamiento en diferentes densidades de plantación con fines energéticos del clon <i>Eucalyptus grandis</i>	
Figura 1. Densidades de plantación de 3.333 árboles ha ⁻¹ (AD), 1.429 árboles ha ⁻¹ (MD) y 909 árboles ha ⁻¹ (BD) del clon <i>E. grandis</i> 2136	84
Figura 2. Molienda de muestras de biomasa para determinación de contenido de nutrientes	86
Figura 3. Proporciones relativas de la concentración de nutrientes para los distintos compartimentos en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	90
Figura 4. Proporciones relativas del contenido de nutrientes por hectárea para los distintos compartimentos en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	92
Figura 5. Exportación total de nutrientes (kg ha ⁻¹) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) bajo distintos sistemas de aprovechamiento	93
5. CAPITULO 5: Influencia de parámetros ambientales en el crecimiento del clon <i>Eucalyptus grandis</i>	
Figura 1. Colectores climáticos instalados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	106
Figura 2. Colector climático de 4 canales (temperatura y humedad ambiente, temperatura y humedad suelo) instalados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	107

Figura 3. Estación meteorológica convencional instalada en el predio de la EEA INTA Bella Vista	107
Figura 4. Campo natural de gramíneas (CN) aldaño al módulo experimental de densidad de plantación	109
Figura 5. Parámetros ambientales registrados durante 2 años en la estación meteorológica (EM) y los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD): a) Temperatura máxima ambiente, b) Temperatura mínima ambiente, c) Humedad relativa ambiente, d) Temperatura del suelo	111
Figura 6. a) Contenido de agua del suelo de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y un campo natural (CN) evaluados por gravimetría durante 22 meses. b) Precipitación y evapotranspiración potencial (Eto) registrados durante 2 años en la estación meteorológica ...	112
Figura 7. Incremento mensual en área basal (IMAB) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) registrados durante 24 meses	113
Figura 8. Evolución del Incremento mensual en área basal (IMAB) de los tratamiento alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) registrados durante 24 meses	114
 6. CAPITULO 6: Integración: principales resultados y consideraciones	
Figura 1. Curvas de crecimiento de volumen (incremento periódico anual (IPA) e incremento medio anual (IMA)) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	131
Figura 2. Costos de establecimiento de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD)	133
Figura 3. Volumen individual (m ³) y biomasa de fuste por hectárea (Mg ha ⁻¹) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) evaluados a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad	133
Figura 4. Superficie necesaria de aprovechamiento de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) para abastecer un proyecto integral de generación de energía de 20 MW.....	137

CAPITULO 1. Introducción

1.1. Marco teórico

Las plantaciones forestales con especies de rápido crecimiento han sido propuestas como parte integral de la solución al cambio climático, permitiendo el abastecimiento continuo de madera para usos múltiples, reduciendo de esta manera la presión sobre el bosque nativo (Gonda et al., 2009; López Reyes et al., 2016).

Considerando los efectos negativos producidos en el ambiente por el uso de los combustibles fósiles, entre ellos el exceso de emisiones de uno de los principales gases de efecto invernadero (CO_2), y ante la incertidumbre en la futura disponibilidad de fuentes convencionales de energía, el uso de energía renovable, particularmente la dendroenergía, concita creciente interés en el mundo con vistas al fortalecimiento y reaseguro energético de las generaciones futuras (Encinas, 2007; Rodríguez et al., 2013; Lauri et al., 2017; Civitarese et al., 2018; Resquín et al., 2022).

En ese sentido, el uso de la biomasa forestal para la generación de energía eléctrica se presenta como una alternativa para la mitigación del cambio climático, con capacidad para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero (Arias Chalico y Riegelhaupt, 2002; Ipinza y Barros, 2011; Rodríguez et al., 2013; Hauk et al., 2014; López Reyes et al., 2016; Favero et al., 2017; Lauri et al., 2017; Resquín et al., 2022), convirtiéndose en un impulso sectorial que permite promover nuevas plantaciones forestales de rápido crecimiento (Cabrera Perramon, 2011; Favero et al., 2020). El aumento de la demanda de bioenergía aumenta las reservas de carbono forestal gracias a las actividades de forestación (Galik y Abt, 2016; Favero et al., 2020). En este sentido se considera que si bien, la ignición de la biomasa forestal libera CO_2 , lo hace en una cantidad equivalente a la incorporada previamente a la estructura de los árboles durante su crecimiento, por lo que su combustión no genera un incremento neto en la atmósfera (Don et al., 2012; Griffa et al., 2017).

Independientemente del destino que pudiera darse a las plantaciones, ya sea puramente energético o para la producción de madera para usos sólidos o

celulósicos, siempre es posible vislumbrar beneficios relacionados a la generación de empleo, permitiendo mejorar los ingresos sectoriales (FAO, 2009), y favoreciendo el desarrollo económico regional (Rodríguez et al., 2013; Griffa et al., 2017; Denegri et al., 2021).

Sin embargo, a pesar de su importancia económica, las plantaciones forestales a gran escala con especies introducidas han sido criticadas por sus efectos sobre los ecosistemas (Andivia et al., 2013; Peppino, 2022). Cuando estas reemplazan a la vegetación nativa, pueden generar grandes impactos ambientales, a partir de cambios estructurales en los ecosistemas naturales, los cuales se ven reflejados en la pérdida o atenuación de los servicios ecosistémicos que proveen (Chen et al., 1999; Tesón, 2011; Gyenge et al., 2024).

Las elevadas tasas de crecimiento de los bosques cultivados con especies introducidas conllevan a una gran utilización de recursos (Binkley et al., 2010; Tesón, 2011; Goya et al., 2016; Rubilar et al., 2018). Los nutrientes y el agua son considerados como los principales factores abióticos afectados por el crecimiento de las plantaciones forestales (Fisher y Binkley, 2000; Binkley y Stape, 2004; Tesón, 2011; Resquín et al., 2020). La evaluación de la disponibilidad de estos elementos permite planificar el establecimiento de próximas forestaciones y el manejo silvícola más apropiado (Martiarena, 2016), aportando a la toma de decisiones para la sustentabilidad productiva de los sistemas forestales.

La producción forestal continua puede afectar la fertilidad de sitio y reducir la productividad, debido a la exportación de nutrientes causada por el aprovechamiento de los distintos compartimentos del árbol (Laclau et al., 2000; Esquivel Segura et al., 2016; Scott et al., 2016; Resquín et al., 2020; Resquín et al., 2022) y turnos de cosecha menores a la rotación ecológica (Goya et al., 2016). Las plantaciones de *Eucalyptus* sp. bajo silvicultura intensiva presentan elevadas demandas de nutrientes de la biomasa aérea y la extracción de nutrientes con la cosecha decrece con la edad de la plantación (Goya et al., 1997; De Mello Cunha et al., 2005; Turner y Lambert, 2015; Rodríguez-Soalleiro et al., 2018).

El consumo de agua de las plantaciones forestales depende de la región, de la especie, de la densidad de plantación, de las condiciones ambientales, de las prácticas de uso del suelo, de la profundidad y textura del suelo, entre otras variables (Tesón, 2011; Albaugh et al., 2013; Fernández y Gyenge, 2016; Milione et al., 2020). La disminución del contenido hídrico de los suelos causado por el consumo excesivo de agua es uno de los factores más cuestionados al género *Eucalyptus* L'Hér. (FAO, 1987), aunque muchas investigaciones (Huber et al., 1998; Torrán, 2007; Besteiro, 2014; Keller et al., 2016; Fernández y Gyenge, 2016) mencionan que el consumo de la especie es comparable al de otras plantaciones de rápido crecimiento y al de bosques naturales. Mejorar nuestro conocimiento del impacto de las plantaciones de *Eucalyptus* sobre el contenido hídrico de los suelos es relevante para garantizar la viabilidad a largo plazo de las mismas sin comprometer su productividad y sustentabilidad ambiental.

Las plantaciones forestales con fines energéticos se diferencian de las plantaciones convencionales por el objetivo de producción, la densidad de plantación, el manejo silvícola, el turno de aprovechamiento, entre otras (Arias Aguilar y Guevara, 2017; Griffiths et al., 2018). El objetivo de estas es la obtención de grandes cantidades de biomasa forestal en un corto período (2 - 7 años) (Fernández y Lupi, 2016; Resquín et al., 2018). El producto obtenido no requiere características especiales de calidad de madera, ya que su destino es la ignición en calderas para producir vapor para generar energía eléctrica (Moya et al., 2019). Mientras que, en las plantaciones convencionales, se buscan determinadas propiedades de la madera acorde al destino final, que asegure la calidad del producto obtenido, y los turnos de aprovechamiento son superiores (12 - 18 años). Los sistemas productivos dendroenergéticos se caracterizan por las altas densidades de plantación establecidas (superiores a 1.500 árboles ha⁻¹) y turnos de corta duración (1 - 7 años) (Casado Alcaide, 2013; Fernández y Lupi, 2017; Pereira y Costa, 2017; Moya et al., 2019; Resquín et al., 2020). La densidad de plantación tiene gran relevancia en el desarrollo individual de los árboles, ya que influye en la asignación de carbono y nutrientes en los compartimentos del mismo (Laclau et al., 2000; Oliveira Lafetá et al., 2012; Martiarena, 2016), cobrando relevancia al momento del aprovechamiento y consecuente exportación de nutrientes (Esquivel Segura et al., 2016; Resquín et

al., 2022). La producción de biomasa en rotaciones de corta duración aumenta la presión sobre los recursos del suelo (Aparicio, 2011; Goya et al., 2016; Scott et al., 2016; Constanza et al., 2017; Rubilar et al., 2018; Moya et al., 2019). Estos sistemas productivos intensivos determinan un uso diferente de los nutrientes y el agua en comparación con los sistemas de producción convencionales (producción de madera sólida) (Binkley et al., 2010; Albaugh et al., 2017; Resquín et al. 2022). Este hecho genera incertidumbre en la perspectiva de una producción sostenida a largo plazo, si se considera la baja fertilidad natural (física y química) de los suelos en los que se establecen las plantaciones forestales (Aparicio et al., 2005; Aparicio, 2011; Resquín et al., 2020).

1.2. Recurso forestal de la provincia de Corrientes¹

La superficie forestal argentina está conformada por 47.900.000 ha de bosque nativo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021) y aproximadamente 1.300.000 ha de bosques cultivados (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca - Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, 2017). Las plantaciones forestales constituyen un recurso estratégico dado que más del 90 % de los productos foresto-industriales provienen de las plantaciones (Caniza y Aparicio, 2015; SENASA, 2017; Acosta et al., 2021; Denegri et al., 2021; MAGyP, 2021). En la región del NEA se encuentra la mayor superficie de bosques implantados de la Argentina, con más de 800.000 ha forestadas con especies de rápido crecimiento (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca - Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, 2017). Corrientes es la principal provincia forestada y de mayor potencialidad de la región (Caniza, 2016; APEFIC, 2021). Posee más de 500.000 ha forestadas (Figura 1) entre los géneros *Pinus* y *Eucalyptus*, representando el *Eucalyptus grandis* W. Hill el 31 % de dichos recursos (CFI, 2018).

¹ Maggio, A.D., Caniza, F.J., Martínez Meier, A. y Iermanó, M.J. (2019). Caracterización del recurso forestal de la provincia de Corrientes, Argentina: su importancia para un manejo sustentable. I Congreso Argentino de Agroecología. Mendoza, Argentina.

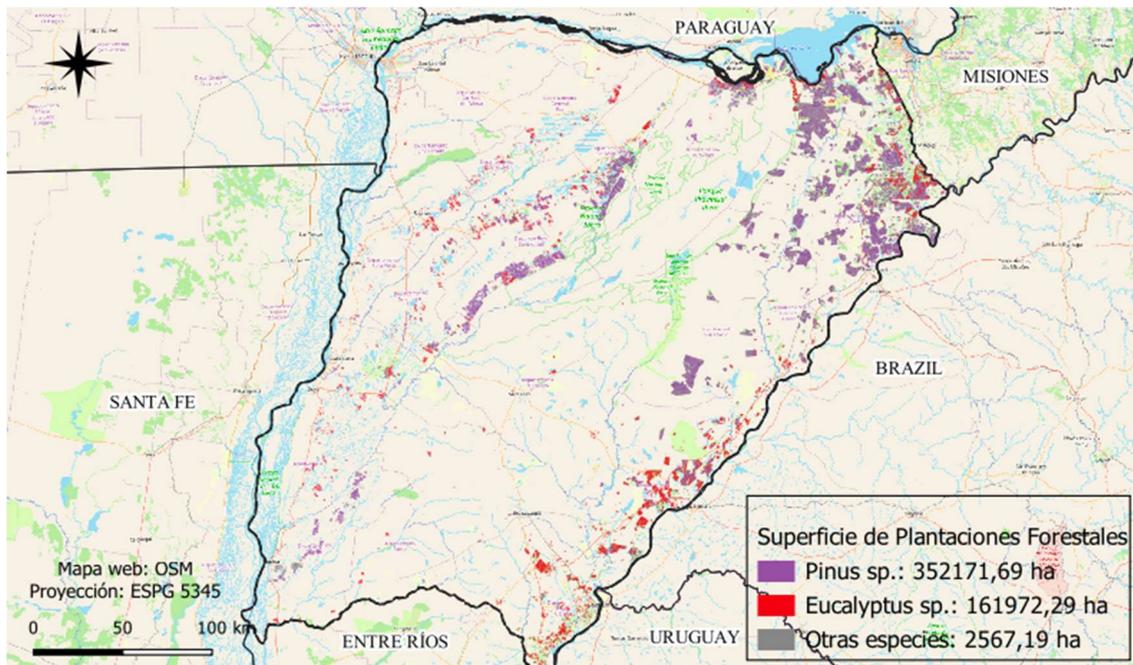


Figura 1. Plantaciones forestales de la provincia de Corrientes. Fuente: A. Maggio.

La actividad forestal es una de las producciones de mayor crecimiento y mejores perspectivas en la provincia, debido a que las condiciones ecológicas son muy favorables para el desarrollo de plantaciones forestales, permitiendo altas tasas de crecimiento ($30 - 40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para *Eucalyptus* sp. y $20 - 30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para *Pinus* sp.) y el potencial para obtener madera de calidad (PEFIC, 2013). La provincia posee una superficie disponible con aptitud forestal de aproximadamente 3.000.000 ha (PEFIC, 2013), las cuales son marginales para otras producciones, excepto para la ganadería.

En los últimos 20 años la superficie anual implantada registró un incremento promedio superior a $10.000 \text{ ha año}^{-1}$, siendo el más alto del país. Las plantaciones clonales de *Eucalyptus* sp. están en continua expansión en la provincia, debido a la mayor oferta de materiales genéticos adaptables a diferentes condiciones edafoclimáticas, al aumento de la productividad y a que el *Eucalyptus* sp. ha demostrado su versatilidad para producir una amplia gama de productos (madera aserrada, postes, tijeras, varas, celulosa, biomasa, entre otros) (Sanchez Acosta, 2006; Griffin, 2014).

Los productos forestales obtenidos de las plantaciones son procesados en la industria, obteniéndose productos de la primera, segunda y tercera

transformación. La industria forestal provincial es principalmente de transformación física, aunque se prevé la instalación de industrias de transformación química en el corto/mediano plazo. En los últimos años se han instalado proyectos dendroenergéticos en la provincia, los cuales utilizan los residuos de los distintos eslabones de la cadena para la generación de energía eléctrica (Volpe et al., 2022).

Desde el punto de vista de la concentración de plantaciones forestales en la provincia se reconocen cuatro cuencas de producción silvícola (PEFIC, 2013): Cuenca Noreste, integrada por los departamentos de Santo Tomé e Ituzaingó; Cuenca Sureste, formada por Paso de los Libres y Monte Caseros; Cuenca Centro-Norte, por los departamentos de Concepción, San Miguel y Saladas; y Cuenca Suroeste, por Goya y Esquina. Desde el punto de vista organizacional, en la provincia son identificados tres grandes territorios o conglomerados forestales, denominados clúster (APF, 2013). El primero de ellos, el de mayor desarrollo tecnológico y técnico del país, lo conforma el noreste de Corrientes y sur de Misiones, de homogeneidad edafoclimática, con suelos principalmente rojos profundos (Ultisoles, Oxisoles). El segundo clúster se encuentra constituido sobre las terrazas del río Uruguay, abarcando el sudeste de Corrientes y noreste de Entre Ríos, mientras que el tercero, el menos desarrollado, está ubicado en el centro y sudoeste de Corrientes.

Este último clúster se encuentra sobre lomas y planicies arenosas (Figura 2), de aproximadamente 2.000.000 ha y representa el 60 % de la superficie con aptitud forestal de la provincia (Caniza, 2016). Su suelo es arenoso y se caracteriza por tener baja fertilidad natural, bajo contenido de materia orgánica y ser susceptible a la erosión hídrica y eólica (Escobar et al., 1996). Las características de estos ambientes ponen en relieve la existencia de riesgos de degradación si no son manejados bajo prácticas de manejo y sistemas productivos ajustados a las condiciones específicas. Estos sitios se caracterizan por la fragilidad de los tipos de arenas predominantes (Entisoles y Alfisoles). Poseen uno o más factores de estrés ambiental, tales como períodos de sequía por deficiencia de precipitaciones en relación con la demanda evapotranspirativa y/o condiciones edáficas que determinan una baja (o excesiva) disponibilidad de agua para las plantas (Aparicio, 2011).



Figura 2. Suelos de la provincia de Corrientes. Fuente: Atlas de suelos de la Rep. Argentina. INTA SAGPyA. Proyecto Arg 85/109 (1990).

Si bien, en la provincia de Corrientes no acontece un proceso de deforestación del bosque nativo como en la provincia de Misiones (Denegri et al., 2021), la implantación de especies introducidas de rápido crecimiento de *Pinus* sp. y *Eucalyptus* sp. sobre la ecoregión del Iberá y pastizales naturales aledaños, contribuye a la degradación del ecosistema afectando funciones esenciales del mismo (Peppino, 2022). La plantación de macizos forestales conlleva a varios interrogantes sobre la sustentabilidad y la eficiencia en el uso de los recursos de los sistemas productivos, ante el desafío implícito para los silvicultores que representa el cambio climático (Andivia et al., 2013). Sin embargo, es posible realizar una producción forestal sustentable, que sea compatible con el desarrollo forestal regional y la provisión de numerosos servicios ecológicos, incluyendo el control de la erosión del suelo, la regulación del ciclo hidrológico,

la protección del hábitat de fauna silvestre, entre otros (Schlichter et al., 2012; Estrada Gasca et al., 2016; Lupi et al., 2023).

Dado que en la provincia de Corrientes recientemente se han instalados proyectos dendroenergéticos, una revisión de las prácticas de manejo silvícolas debe ser realizada. Con este trabajo se pretende generar conocimientos de las interacciones entre la silvicultura, el suelo y los factores que condicionan la sustentabilidad de estos sistemas intensivos de producción. Esto permitirá generar e implementar tecnologías para la toma de decisiones, en pos de una adecuada planificación del uso del territorio en un marco de sustentabilidad ambiental.

1.3. Hipótesis

- La producción de biomasa aérea de una forestación clonal está directamente relacionada con la densidad de plantación. A mayor número de individuos por hectárea, se obtiene mayor producción de biomasa aérea en un corto período.
- Las plantaciones forestales de alta densidad con fines dendroenergéticos disminuyen el contenido de nutrientes en el suelo, con relación a las plantaciones convencionales, comprometiendo la capacidad productiva y ambiental de los sitios.
- El contenido de agua del suelo en una forestación está directamente relacionado con la magnitud de la precipitación bruta y con la densidad de la plantación. A mayor número de individuos por hectárea, se reduce el contenido de agua de los suelos.

1.4. Objetivos

General

- Evaluar diferentes densidades de plantación con fines energéticos propuestos para el clon *E. grandis* en las lomas y planicies arenosas de la provincia de Corrientes.

Específicos

- Cuantificar la relación entre la densidad de plantación y la producción de biomasa aérea de plantaciones forestales clonales para usos en bioenergía y productos sólidos, bajo esquemas de manejo forestal contrastantes.
- Comparar el efecto sobre la fertilidad química de los suelos de los sistemas productivos dendroenergéticos y convencionales.
- Cuantificar en los esquemas de manejo propuestos procesos que permitan predecir el impacto sobre el ambiente de las plantaciones forestales dendroenergéticas, aportando de esta manera a dilucidar sobre los posibles efectos antagónicos de las mismas al cambio climático.

1.5. Estructura y organización de la tesis

La presente tesis doctoral está estructurada en 6 capítulos. Los capítulos abordan temáticas diferentes, pero cada uno de ellos aportan información que responde a las hipótesis y objetivos. El Capítulo 1 trata el marco teórico de referencia de la Tesis. Además, contiene las hipótesis de trabajo, el objetivo general y los específicos que se buscan responder con los datos obtenidos. El Capítulo 2 señala los aspectos metodológicos generales de la investigación. En el Capítulo 3 (responde al objetivo específico 1) se evaluó la producción de la biomasa aérea de un clon de *E. grandis* y un clon híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis* creciendo en las lomas y planicies arenosas de Corrientes, Argentina. Se presentan los resultados de las evaluaciones realizadas a los 12 y 24 meses de edad de la producción de biomasa de fuste, ramas y hojas de dos clones de *Eucalyptus* sp. Los resultados son contrastados con datos provenientes de plantaciones forestales implantadas en esquemas de altas densidades de plantación en turnos de corta duración. Además, se evaluó la producción de la biomasa aérea de tres densidades de plantación con el clon *E. grandis* a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad. En el Capítulo 4 (responde al objetivo específico 2) se determina el contenido de nutrientes del suelo y de la biomasa aérea, y se evalúa la exportación de nutrientes de la biomasa forestal

al momento del aprovechamiento, en diferentes densidades de plantación con fines energéticos del clon *E. grandis* a los 50 meses de edad. En el Capítulo 5 (responde al objetivo específico 3) se determina la influencia de parámetros ambientales en el crecimiento del clon *E. grandis* bajo diferentes densidades de plantación y se busca dilucidar si el establecimiento de una plantación forestal modifica parámetros del sistema aire suelo. Con este trabajo se pretende generar conocimientos sobre el impacto de la variabilidad climática en la producción forestal y sobre la sustentabilidad ambiental de sistemas productivos con el clon *E. grandis* con relación a los sistemas que reemplazan (campo natural de pastoreo). En el Capítulo 6, se realiza una integración de resultados y se remarcan las principales conclusiones de la tesis, dando respuesta a una serie de interrogantes sobre estos sistemas intensivos de producción.

1.6. Bibliografía

Albaugh, J.M., Dye, P.J. y King, J.S. (2013). Eucalyptus and Water Use in South Africa. *International Journal of Forestry Research*, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/852540>

Albaugh, T.J., Rubilar, R.A., Maier, C.A., Acuna, E.A. y Cook, R.L. (2017). Biomass and nutrient mass of *Acacia dealbata* and *Eucalyptus globulus* bioenergy plantations. *Biomass and Bioenergy*, 97, 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.025>

Acosta, N., Peri, P., Fracassi, N., Laclau, P., Bono, J. y Cuccolo, L. (2021). *Tercer reporte del proceso de Montreal al año 2017*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Argentina. Informe técnico. 92 pp.

Andivia, E., Fernández, M., Alaejos, J. y Tapias R. (2013). *Consumo de agua de distintas especies leñosas utilizables como cultivos energéticos*. 6° Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz, España.

Aparicio, J.L., Larocca F. y Dalla Tea, F. (2005). Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*. *Idia XXI: revista de información sobre investigación y desarrollo agropecuario*, 5 (8), 66-69.

Aparicio, J.L. (2011). *Efecto del manejo de residuos de cosecha de Pinus elliottii en el costo oculto de nutrientes y en el crecimiento de pino híbrido en un suelo arenoso de Corrientes*. XXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

APF (Aglomerado Productivo Forestal Misiones y Corrientes). (2013). *Plan de mejora competitiva*. Informe técnico. 45 pp.

Arias Aguilar, D. y Guevara, M. (2017). *Establecimiento, manejo y aprovechamiento de plantaciones dendroenergéticas*. Universidad nacional de ciencias forestales. Honduras. Informe técnico. 72 pp.

Arias Chalico, T. y Riegelhaupt, E.M. (2002). *Guía para estudios de demanda, oferta y abastecimiento de combustibles de madera*. Informe técnico.

Besteiro, S. (2014). *Evaluación de la influencia hidrológica de forestaciones en la llanura pampeana*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/33806>

Binkley, D. y Stape, J.L. (2004). *Sustainable management of Eucalyptus plantations in a changing world. Eucalyptus in a Changing World*. Proc. of IUFRO Conf. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Brasil.

Binkley, D., Stape, J.L., Bauerle, W.L. y Ryan, M.G. (2010). Explaining growth of individual trees: light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259 (9), 1704-1713.

Cabrera Perramon, J. (2011). *Escenarios de mercado para el bosque del futuro. El Cambio Climático, los Bosques y la Silvicultura*. Instituto forestal Chile. Informe técnico. 6 pp.

Caniza, F. y Aparicio, J.L. (2015). Desarrollo de herramientas para la gestión sustentable de madera de calidad de *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis* en las planicies arenosas de la provincia de Corrientes. *Investigación Forestal 2011-2015. Los Proyectos de Investigación Aplicada*. (pp 259-265).

Caniza, F. (2016). Silvicultura en la Mesopotamia Argentina. Revista Chacra. Recuperado el 20 de enero de 2023 de <https://www.revistachacra.com.ar/nota/silvicultura-en-la-mesopotamia-argentina/>

Casado Alcaide, J.A. (2013). Sistemas de aprovechamiento de cultivos energéticos lignocelulósicos: aplicaciones en Uruguay. Recuperado el 10 de diciembre de 2022 de http://www.inia.org.uy/online/files/contenidos/link_25042013124908.pdf

Civitaresse, V., Faugno, S., Picchio, R., Assirelli, A., Sperandio, G., Saulino, L., Crimaldi, M. y Sannino, M. (2018). Production of selected short-rotation wood crop species and quality of obtained biomass. *European Journal of Forest Research*, 137, 541-552.

Consejo federal de inversiones (CFI). 2018. *Actualización del inventario forestal de bosques implantados en la provincia de Corrientes, Argentina*. Informe técnico. 45 pp.

Costanza, J.K., Abt, R.C., McKerrow, A.J. y Collazo, J.A. (2017). Bioenergy production and forest landscape change in the southeastern United States. *Gcb Bioenergy*, 9(5), 924-939.

De Mello Cunha, G., da Gama-Rodrigues, A.C. y Costa, G.S. (2005). Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no Norte Fluminense. *Revista Árvore*, 29(3), 353-363.

Denegri, G., Aguerre, M. y Acciaresi, G. (2021). La expansión de las plantaciones forestales y su incidencia en la reducción de la superficie de bosque nativo en tres regiones de la República Argentina. *SaberEs*, 13 (2), 137-158.

Don, A., Osborne, B., Hastings, A., Skiba, U., Carter, M. S., Drewer, J., Flessa, H., Freibauer, A., Hyvonen, N., Jones, M., Laningan, G., Mander, U. y Zenone, T. (2012). Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. *Gcb Bioenergy*, 4(4), 372-391.

Encinas, E. (2007). *Guía para el uso y aprovechamiento de la biomasa en el sector forestal*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Publicación técnica. 40 pp.

Escobar, E.H., Ligier, H.D., Melgar, R., Matteio, H. y Vallejos, O. (1996). *Mapa de suelos de la provincia de Corrientes*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales. EEA Corrientes. 432 pp.

Esquivel-Segura, E., Rubilar-Pons, R., Sandoval-Rocha, S., Acuña-Carmona, E., Cancino-Cancino, J., Espinosa-Bancalari, M. y Muñoz-Sáez, F. (2016). Sustentabilidad en el uso de nutrientes de plantaciones dendroenergéticas en dos suelos marginales de la Región de Biobío, Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13 (33), 11-19.

Estrada Gasca, C., Islas Samperio, J. y Flores Castro, W. (2016). Energía renovable. Las inmensas oportunidades de energía renovable en sus múltiples formas. *Guía hacia un futuro energético sustentable para las Américas* (pp. 68-89). IANAS Red Interamericana de Academias de Ciencias.

FAO (Food and Agriculture Organization). (1987). Efectos ecológicos de los Eucaliptos. Publicación electrónica, ISBN: 92-5-302286-8. Roma, Italia. Recuperado el 25 de febrero de 2018 de <http://www.fao.org/docrep/016/ap415s/ap415s00.pdf>

FAO (Food and Agriculture Organization). (2009). "Situación de los Bosques del Mundo 2009", Publicación electrónica, ISBN: 978-92-5-306057-3. Roma, Italia.

Favero, A., Mendelsohn, R. y Sohngen, B. (2017). Using forests for climate mitigation: Sequester carbon or produce woody biomass? *Clim. Change*, 144, 195-206.

Favero, A., Daigneaul, A. y Sohngen, B. (2020). Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both?. *Science advance*, 6 (13).

Fernández, M.E. y Gyenge, J. (2016). Árboles y agua: una relación recíproca que tenemos que conocer para orientar el manejo forestal sustentable. Instituto

Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado el 19 de julio de 2021 de http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_arboles_y_agua_2016.pdf

Fernández, R. y Lupi, AM. (2017). *Plantaciones con fines energéticos: Consideraciones tecnológicas y ambientales frente a su implementación*. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Fisher, R. y Binkley, D. (2000). *Ecology and Management of forest soils*. John Wiley and Sons Inc.

Galik, C.S. y Abt, R.C. (2016). Directrices de sostenibilidad y respuesta del mercado forestal: una evaluación de la demanda de pellets de la Unión Europea en el sureste de los Estados Unidos. *GCB Bioenergy*, 8, 658 - 669.

Gonda, H., Mohr Bell, D., Sbrancia, R., Lencinas, J., Bava, J., Monte, C., Montoro, A., Siebert, A., García, E., Menéndez, J., Lutz, G., Roccia, A., Van Houtte, J., Toth, A., Tolone, G. y Salimbeni, J. (2009). *Inventario del bosque implantado en la provincia de Neuquén*. CFI. Gobierno de la Provincia de Neuquén. Informe técnico. 63 pp.

Goya, J.F., Arturi, M.F., Sandoval López, D.M., Pérez, C.A. y Frangi, J.L. (2016). Estudio de la sustentabilidad ambiental de plantaciones de *Eucalyptus grandis* bajo diferentes condiciones de manejo en el noreste de Entre Ríos. *Investigación forestal 2011-2015: los proyectos de investigación aplicada*. Presidencia de la Nación. Ministerio de Agroindustria. Unidad para el cambio rural.

Griffa, B., Marcó, L. y Goldstein, E. (2017). Producir electricidad con biomasa: beneficios, experiencias y actualidad en Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas*, (19), 67-79.

Griffin, A.R. (2014). Clones or improved seedlings of Eucalyptus? Not a simple choice. *International Forestry Review*, 16 (2), 216-224.

Griffiths, N.A., Rau, B.M., Vaché, K.B., Starr, G., Bitew, M.M., Aubrey, D.P., Martín, J.A., Benton, E., y Jackson, R.C. (2018). Environmental effects of short-rotation woody crops for bioenergy: What is and isn't known. *Bioenergy*, 11 (4).

Gyenge, J., Gatica, G., Sandoval, M., Lupi, A.M., Gaute, M., Fernández, M.E. y Peri, P.L. (2024). Change of soil carbon storage in monoculture tree plantations across wide environmental gradients: Argentina as a case study. *Forest Ecology and Management*, 552, e121565. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121565>

Hauk, S., Knoke, T. y Wittkopf, S. (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 435-448.

Huber, A., Barriga, P. y Trecaman, R. (1998). Efecto de la densidad de plantaciones de *Eucalyptus nitens* sobre el balance hídrico en la zona de Collipulli, IX Región (Chile). *Bosque*, 19 (1), 61-69.

Ipinza, R. y Barros, S. (2011). *El Cambio Climático, los Bosques y la Silvicultura*. Instituto forestal Chile. Informe técnico. 145 pp.

Keller, A., Bulfe, N. y Gyenge, J. (2016). Consumo de agua en plantaciones de *Pinus taeda* L. en la zona noroeste de la provincia de Misiones. *XVI Jornadas técnicas forestales y ambientales*. El Dorado, Misiones, Argentina.

Laclau, J.P., Bouillet, J.P. y Ranger, J. (2000). Dinámica de biomasa y acumulación de nutrientes en una plantación clonal de *Eucalyptus* en Congo. *Ecología y gestión forestal*, 128 (3), 181-196.

Lauri, P., Forsell, N., Korosuo, A., Havlík, P., Obersteiner, M. y Nordin, A. (2017), Impact of the 2 °C target on global woody biomass use. *Forest Policy Econ.* 83, 121-130.

López Reyes, L.Y., Domínguez Domínguez, M., Martínez Zurimendi, P., Zavala Cruz, J., Gómez Guerrero, A. y Posada Cruz, S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera Bosques*, 22 (3), 49-60.

Lupi, A.M., Ferrere, P. y Restovich, S.B. (2023). Contribución de las plantaciones forestales a las reservas orgánicas de carbono y nitrógeno en el suelo. *Actas del VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino*. Mendoza, Argentina.

Martiarena, R. (2016). *Efecto de la disponibilidad de recursos sobre la eficiencia de uso y conservación de los nutrientes en función de las condiciones edafoclimáticas, edad y manejo de las plantaciones de Pinus taeda L. en la Mesopotamia Argentina*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/52446>

Milione, G.M., Mujica, C.R., Bea, S.A. y Gyenge, J.E. (2020). Evaluación del impacto hidrológico de una forestación de *Eucalyptus viminalis* Labill. en un ambiente típico de la llanura Pampeana, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 119 (2), 1-14. <https://doi.org/10.24215/16699513e056>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial (MAGyP, DNDFI). (2017). *Argentina: Plantaciones forestales y gestión sostenible*. Publicación técnica. 15 pp.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (MAGyP). (2021). Tablero de plantaciones forestales. Recuperado el 19 de agosto de 2024 de <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/inventarios/tablero.php>

Moya, R., Tenorio, C. y Oporto, G. (2019). Short rotation wood crops in Latin American: A review on status and potential uses as biofuel. *Energies*, 12(4), 705.

PEFIC (Plan estratégico foresto industrial de la provincia de Corrientes). (2013). Informe técnico. Recuperado el 19 de agosto de 2024 de <https://insitu.org.ar/PDF/PEFIC.pdf>

Peppino, J. (2022). Producción silvícola en la provincia de Corrientes. Transformaciones productivas y conflictos socio ambientales, 2008 – 2018. *Folia histórica del Nordeste*. IIGHI - IH- CONICET/UNNE –N, 43, 107-128. <http://dx.doi.org/10.30972/fhn.0435847>

Pereira, S. y Costa, M. (2017). Short rotation coppice for bioenergy: From biomass characterization to establishment—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1170-1180.

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R.M., Rachid-Casnati, C., Hirigoyen, A., Carrasco-Letelier, L. y Duque-Lazo, J. (2018). Allometry, Growth and Survival of Three Eucalyptus Species (*Eucalyptus benthamii* Maiden and Cabbage, *E. dunnii* Maiden and *E. grandis* Hill ex Maiden) in High-Density Plantations in Uruguay. *Bosques*, 9 (12).

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R.M., Carrasco-Letelier, L., Casnati, C.R. y Bentancor, L. (2020). Evaluation of nutrient content in biomass of *Eucalyptus* species from short rotation plantations in Uruguay. *Biomass and Bioenergy*, 134, 105502.

Resquín, F., Bentancor, L., Carrasco-Letelier, L., Rachid-Casnati, C. y Navarro-Cerrillo, R.M. (2022). Rotation length of intensive *Eucalyptus* plantations: How it impacts on productive and energy sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 166, 106607.

Rodríguez, R., Martinelli, C. y Roitman, M. (2013). *Potencial de producción de electricidad e hidrógeno a partir de biomasa en la República Argentina*. Matriz de recursos energéticos de la Provincia de Córdoba. Informe técnico.

Rodríguez-Soalleiro, R., Eimil-Fraga, C., Gómez-García, E., García-Villabrille, J. D., Rojo-Alboreca, A., Muñoz, F., Oliveira, N., Sixto, H. y Pérez-Cruzado, C. (2018). Exploring the factors affecting carbon and nutrient concentrations in tree biomass components in natural forests, forest plantations and short rotation forestry. *Forest Ecosystems*, 5, 1-18.

Rubilar, R.A., Lee Allen, H., Fox, T.R., Cook, R.L., Albaugh, T.J. y Campoe, O.C. (2018). Advances in silviculture of intensively managed plantations. *Current Forestry Reports*, 4, 23-34.

Sanchez Acosta, M. (2006). Productos sólidos a partir de madera de eucaliptos cultivados. *Boletín Informativo CIDEU*, (2), 103-117.

Schlichter, T., Díaz, D., Fahler, J. y Laclau, P. (2012). *Aportes a una política forestal en Argentina: El sector forestal y el desarrollo económico, ambiental y social del país*. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP), Unidad para el Cambio Rural (UCAR).

Scott, D.A. y Page-Dumroese, D.S. (2016). Wood bioenergy and soil productivity research. *BioEnergy Research*, 9(2), 507-517.

SENASA (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria). (2017). Bosques argentinos, actividad forestal y economías regionales. Recuperado el 10 de septiembre de 2017 de <http://www.senasa.gob.ar/senasa-comunica/noticias/bosques-argentinos-actividad-forestal-y-economias-regionales>

Tesón, N. (2011). *Balance hidrológico y flujo de nutrientes asociados al agua en plantaciones de Eucalyptus grandis, en Concordia (Entre Ríos)*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo].

Torrán, E. (2007). *Impacto de las plantaciones de Eucalyptus grandis sobre el contenido de humedad del suelo. Análisis de un caso en el Noreste de la Provincia de Entre Ríos*. [Tesis de Magíster en ingeniería ambiental, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Concepción del Uruguay].

Turner, J. y Lambert, M.J. (2015). Analysis of nutrient use efficiency (NUE) in Eucalyptus pilularis forests. *Australian Journal of Botany*, 62(7), 558-569.

Volpe, M.A., Frechero, M., Casoni, A.I., Gauchat, M.E., Fassola, H.E., Lupi, A.M. y Acevedo, A. (2022). *Análisis de pre-factibilidad para desarrollar un proceso de conversión de residuos de madera de pino*. Instituto de Suelos, INTA. Informe técnico.

CAPITULO 2. Aspectos metodológicos generales

2.1. Área de estudio

El estudio fue realizado en un módulo experimental de densidad de plantación de dos clones de *Eucalyptus* sp. establecido en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Bella Vista del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), en junio de 2016.



Figura 1. Ubicación de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Bella Vista del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

La EEA INTA Bella Vista se ubica en la provincia de Corrientes, a $28^{\circ} 26'$ de latitud Sur y $58^{\circ} 55'$ de longitud Oeste (Figura 1). El clima es subtropical sin estación seca, con una temperatura media anual de 20°C . La temperatura media en el mes de julio varía entre 13°C y 16°C , y la media en el mes de enero entre 26°C y 27°C , con máximas absolutas que superan a los 40°C (Carnevali, 1994). Las precipitaciones medias anuales son de 1.256,5 mm (Almiron, 2023). El suelo pertenece al orden Entisol (Paleudalfes psaménticos), arenoso a arenoso franco, sin estructura y presenta severas limitaciones: alta susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, baja fertilidad natural y baja retención de humedad. Presenta buenas condiciones físicas relacionadas a la profundidad efectiva, por lo que son

suelos aptos para cultivos perennes. El uso actual es frutícola, hortícola, forestal y como campo natural de pastoreo (Escobar et al., 1996).

2.2. Diseño experimental

El material genético con el que se estableció el ensayo proviene del programa de mejoramiento genético (clones) de la empresa POMERA Maderas. El desempeño de dos clones de *Eucalyptus* sp., el *E. grandis* DDT002136 (2136) y un híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis* DDT000X78 (X78) están siendo comparados en un módulo experimental con cinco tratamientos de densidad de plantación (Tabla 1, Figura 2): 3.333 árboles ha⁻¹ (2 m × 1,5 m de distancia de plantación) hasta 909 árboles ha⁻¹ (2 m × 5,5 m), en un diseño de bloques completos al azar con 3 repeticiones para el clon 2136 y 2 repeticiones para el clon X78. Las parcelas se conformaron con 49 árboles (7 filas de 7 árboles), de las cuales se midieron los 25 árboles centrales (5 filas de 5 árboles), a fin de evitar el efecto borde. En la presente tesis doctoral se evalúan los tratamientos de 3.333 árboles ha⁻¹ (AD), 1.429 árboles ha⁻¹ (MD) y 909 árboles ha⁻¹ (BD) del clon 2136, y el tratamiento de 3.333 árboles ha⁻¹ del clon X78.

El tamaño de plantas para la instalación del módulo experimental fue de 20 cm de altura. La preparación del terreno se realizó en toda la superficie de plantación con rastra. El control de malezas previo a la plantación se realizó en toda la superficie de plantación con glifosato (1,5 litros ha⁻¹) aplicados con mochila. Se fertilizó con 100 g árbol⁻¹ de fosfato diamónico ((NH₄)₂HPO₄) al momento de la plantación. El control de malezas post-plantación se realizó a los 6 meses en la banda de plantación, consistió en un repaso con glifosato (1 litro ha⁻¹). El control de hormigas se realizó antes y después de la plantación hasta el año, se utilizó cebo granulado (3 kg). No se realizó riego de asiento, debido a las altas precipitaciones acumuladas.

Tabla 1. Módulo experimental con cinco tratamientos de densidad de plantación.

Tratamiento	Distanciamiento de plantación	Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)
1 (AD)	2 m * 1,5 m	3.333

2	2 m * 2,5 m	2.000
3 (MD)	2 m * 3,5 m	1.429
4	2 m * 4,5 m	1.111
5 (BD)	2 m * 5,5 m	909

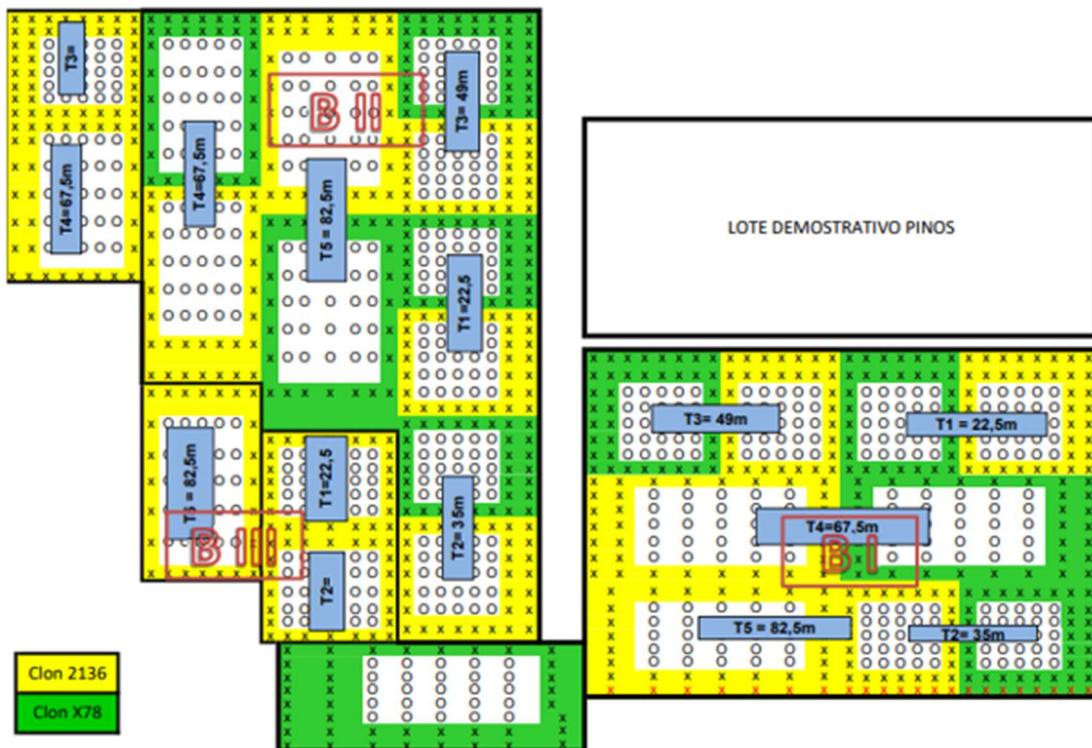


Figura 2. Ubicación y croquis del módulo experimental de densidad de plantación de dos clones de *Eucalyptus* establecido en la EEA INTA Bella Vista.

2.3. Bibliografía

Almirón, M.A. (2023). *Información Agrometeorológica EEA INTA Bella Vista*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Informe técnico. 5 pp.

Carnevali, R. (1994). *Fitogeografía de la Provincia de Corrientes: Cartas, escalas 1:500.000 y 1:1.000.000*. Gobierno de la Provincia de Corrientes - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Informe técnico. 324 pp.

Escobar, E.H., Ligier, H.D., Melgar, R., Matteio, H. y Vallejos, O. (1996). *Mapa de suelos de la provincia de Corrientes*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales. EEA Corrientes. 432 pp.

CAPITULO 3. Potencial dendroenergético de clones de *Eucalyptus* sp. en Corrientes, Argentina²

3.1. Introducción

La quema de combustibles fósiles, la deforestación y el cambio de uso de suelo son unas de las principales actividades antropogénicas que incrementan las concentraciones de CO₂ en el ambiente (Vasconi, 2008; Favero y Massetti, 2014; Villalba, 2019; Lupi et al., 2023). Las plantaciones forestales con especies de rápido crecimiento han sido propuestas como parte integral de la solución al cambio climático, por ser captadoras netas de carbono (C) y reducir la presión sobre el bosque nativo (López Reyes et al., 2016). Secuestran el CO₂ de la atmósfera, y este queda almacenado en los distintos compartimentos de la biomasa del árbol (Montero et al., 2005; Bastin et al., 2019; Ferrere y Lupi, 2023).

La dendroenergía es la energía producida a partir de la biomasa forestal (Trossero et al., 2009). Su oferta actual está compuesta por materiales heterogéneos a partir de residuos de aserraderos o de plantaciones forestales (podas y raleos) (Spatari et al., 2010; Bentsen y Felby, 2012). Las plantaciones forestales con fines energéticos tienen como objetivo la obtención de grandes cantidades de biomasa mediante rotaciones de corta duración (Zamora et al., 2015; Fernández y Lupi, 2017), ofreciendo un producto de mayor homogeneidad y poder calorífico (Patiño-Diez y Smith-Quintero, 2008). El producto obtenido no requiere características especiales de calidad, aunque la densidad de la madera y el contenido de lignina se encuentran directamente relacionadas con la producción de energía. Cuanto mayor densidad y/o contenido de lignina, mayor cantidad de energía contenida por metro cúbico (Thomaz et al., 2007; Oliveira-Carneiro et al., 2014). La productividad de estos sistemas está relacionada con la tolerancia que puedan presentar las especies a una alta competencia por recursos, la fertilidad del suelo y las características climáticas del sitio (Baettig et

² Maggio, A.D., Caniza, F.J., Cellini, J.M. y Martínez-Meier, A. (2022). Potencial dendroenergético de dos clones de *Eucalyptus* sp. en Corrientes, Argentina. *Madera y bosques*, 28 (1).

Maggio, A.D., Caniza, F.J., Cellini, J.M. y Martínez Meier, A. (2021). Productividad volumétrica de sistemas productivos con *Eucalyptus grandis*. XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

al., 2010), configurando un modelo intensivo de uso del suelo y el paisaje (Fernández y Lupi, 2017).

En Europa, las plantaciones forestales son esenciales en la estrategia de abastecimiento con energías renovables, destacándose países nórdicos como Finlandia y Suecia, que utilizan biomasa para generar electricidad y calefacción (Bentsen y Felby, 2012; Civitarese et al., 2018; Pérez López, 2019). Europa posee más de 50.000 ha de plantaciones forestales con fines energéticos (Don et al., 2012; Djomo et al., 2015), y lidera la generación de electricidad a partir de biomasa forestal (CCC, 2017; IEA Bioenergy, 2021; Mather Gratton et al., 2021). El Reino Unido posee la planta de biomasa más grande del mundo (740 MW), mientras que Finlandia tiene tres de las cinco plantas más grandes, contribuyendo a su objetivo de autoabastecimiento energético renovable para 2050 (Bester energy, 2024). Alemania y España fomentan la biomasa mediante subsidios de energía renovable e incentivos para el uso de residuos (Marco et al., 2018). En América del Norte, Canadá se posiciona como un importante productor de energía de biomasa (principalmente a partir de residuos de la industria forestal), respaldando su desarrollo con políticas favorables (Amichev et al., 2014). En Estados Unidos, el estado de California, que fue pionera en energía renovable desde los años 80, ha visto una expansión y posterior reducción de proyectos de biomasa debido a la competencia del gas natural (Zamora et al., 2015; Constanza et al., 2017). Brasil estableció plantaciones de *Eucalyptus* sp. con fines energéticos desde los años 60 (Betters et al., 1991), con políticas de incentivos para establecer plantaciones de corta rotación para la producción de leña. En los últimos años, China está invirtiendo significativamente en tecnologías de biomasa (bioenergía) para diversificar su matriz energética, presentando un gran potencial la utilización de biomasa forestal (Zhang et al., 2023).

Si bien la dendroenergía ha tenido en Argentina un potencial equivalente a 47 % del total del producto energético nacional (Trossero et al., 2009), en la actualidad solo representa 1,5 % de dicha matriz (Secretaría de Energía, 2019). Desde 2007, Argentina ha implementado varias leyes y programas para fomentar las energías renovables (entre ellas la biomasa), pero con resultados limitados. En el 2012, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca y el Ministerio de

Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, con la asistencia técnica de la FAO lanzan el proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA) aprovechando los residuos agrícolas y forestales. No obstante, el financiamiento de las inversiones fue señalado como una de las principales barreras del proyecto (Marco et al., 2018). En 2016, lanzan el programa RenovAR, que busca fomentar la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, el cual ha tenido cierto éxito, atrayendo inversiones significativas en el país y en la provincia de Corrientes (IRENA, 2017; Volpe et al., 2022). Se estima que el desarrollo de la generación de electricidad a partir de la biomasa forestal podría ser beneficioso para las provincias que cuentan con el recurso, como es el caso de la provincia de Corrientes, generando una nueva actividad con valor agregado y demanda de empleo local (Marco et al., 2018; Manolis et al., 2019). No obstante, aún no se tiene claridad acerca del impacto en términos ambientales y sociales (Young y Steffen, 2008).

Corrientes es la principal provincia con plantaciones forestales de *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.* El género *Eucalyptus* ha demostrado su versatilidad para producir una amplia gama de productos, como madera aserrada, celulosa y biomasa (Sanchez Acosta, 2006; Griffin, 2014, Moya et al., 2019; Resquín et al., 2022). Las plantaciones clonales de *Eucalyptus* están en constante expansión en la Mesopotamia argentina gracias a la disponibilidad de materiales genéticos adaptables a diversas condiciones edafoclimáticas y al aumento de la productividad (Caniza, 2016). En las últimas cuatro décadas, organismos públicos y privados de Argentina (INTA, Pomera Maderas, Paul Forestal, etc.) han desarrollado programas de mejoramiento genético, logrando avances significativos en la selección, cruzamiento y clonación de individuos superiores. Actualmente, los viveros forestales disponen de clones puros e híbridos adaptados a diferentes condiciones, lo que permite establecer proyectos forestales específicos incluso en sitios marginales (Caniza, 2016). Aunque el material genético clonal es más costoso, las plantaciones clonales presentan mayor homogeneidad en crecimiento y calidad de la madera, facilitando el manejo silvícola y la producción de materia prima de calidad más predecible (López et al., 2010).

La cantidad de biomasa acumulada está influenciada por diferentes factores, como la calidad de sitio, el manejo silvícola, siendo el manejo de la densidad uno de los principales (Martiarena, 2016; Resquín et al., 2022). La densidad de plantación tiene gran relevancia en el desarrollo individual de los árboles, ya que influye en la asignación de carbono en los compartimentos del mismo (Oliveira Lafeté et al., 2012). A nivel mundial, para el establecimiento de plantaciones forestales con fines energéticos se utilizan densidades de plantación entre 1.500 - 36.000 árboles ha⁻¹, principalmente con *Salix* sp., *Populus* sp., *Robinia* sp., *Pinus* sp. y *Eucalyptus* sp. (Casado Alcaide, 2013; Zamora et al., 2015; Moya et al., 2019). El “modelo norteamericano” o MRF (Medium Rotation Forestry), adopta densidades de 1.500 - 2.500 árboles ha⁻¹, con rotaciones de 5 - 7 años, mientras que, el “modelo europeo” o SRF (Short Rotation Forestry) utiliza densidades de plantación superiores a 2.500 árboles ha⁻¹, con rotaciones de 1 - 4 años (Arias Aguilar y Guevara, 2017). En la Mesopotamia argentina, las densidades de plantación de *Eucalyptus* sp. utilizadas para los distintos destinos productivos son de 250 - 1250 árboles ha⁻¹ (García et al., 2021), siendo inferiores a las densidades establecidas para fines energéticos.

Dado que en la provincia de Corrientes recientemente se han instalado proyectos dendroenergéticos, se hace necesaria una revisión de las prácticas de manejo silvícolas. Para *Eucalyptus* sp., no se dispone de información sobre producción de volumen y biomasa en esquemas de muy altas densidades, las líneas experimentales que se están desarrollando en este sentido son recientes (Fernández y Lupi, 2016). Por lo tanto, la evaluación del potencial dendroenergético de clones de *Eucalyptus* sp. es necesaria.

Los objetivos de este capítulo fueron: 1) evaluar la producción de la biomasa aérea del clon *E. grandis* y el clon híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis* creciendo en las lomas y planicies arenosas de Corrientes, Argentina. En el mismo se presentan los resultados de las evaluaciones realizadas a los 12 y 24 meses de edad de la producción de biomasa de fuste, ramas y hojas de dos clones de *Eucalyptus* sp. Los resultados son contrastados con datos provenientes de plantaciones forestales implantadas en esquemas de altas densidades de plantación en turnos de corta duración.

2) evaluar la producción de la biomasa aérea de diferentes densidades de plantación del clon *E. grandis*. Esto genera conocimiento sobre la productividad de estos sistemas intensivos, contribuyendo a la implementación de tecnologías para la toma de decisiones, lo que permite asegurar la producción con fines dendroenergéticos en un marco de sustentabilidad ambiental.

3.2. Materiales y Métodos

Para responder al objetivo 1, se evaluó el tratamiento de mayor densidad de plantación (3.333 árboles ha⁻¹) del clon *E. grandis* (2136) y del clon híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis* (X78), a los 12 meses (Figura 1) y a los 24 meses de edad (Figura 2). Se registró la supervivencia y se estimó la producción de volumen con y sin corteza, la densidad básica de la madera y la biomasa de hojas, de ramas, de fuste y total.

Para responder al objetivo 2, se compararon los tratamientos de 3.333 árboles ha⁻¹ (AD), 1.429 árboles ha⁻¹ (MD) y 909 árboles ha⁻¹ (BD) del clon *E. grandis* 2136 (Figura 3) evaluados a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad. Si bien, en la presente tesis doctoral, las 3 densidades de plantación son evaluadas con fines energéticos, las densidades de plantación media y baja (MD y BD) son compatibles con esquemas de manejo para la producción de celulosa y madera sólida. Se registró la supervivencia y se estimó la producción de volumen con y sin corteza, la densidad básica de la madera, la biomasa de hojas, ramas, fuste y total, y el contenido de carbono total.



Figura 1. a) clon *E. grandis* 2136, b) clon híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis* X78 a los 12 meses de edad.



Figura 2. Clon *E. grandis* 2136 a los 24 meses de edad.





Figura 3. Densidades de plantación de 3.333 árboles ha⁻¹ (AD), 1.429 árboles ha⁻¹ (MD) y 909 árboles ha⁻¹ (BD) del clon *E. grandis* 2136 a los 50 meses de edad.

El diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) y la altura total (H, m) de todos los individuos fueron evaluados en cuatro períodos para el clon *E. grandis* 2136 (12, 24, 36 y 50 meses de edad) (ANEXO I Tabla 1) y en dos periodos para el clon X78 (12 y 24 meses de edad) (ANEXO I Tabla 2). Se registró la supervivencia. Seis individuos de cada densidad fueron apeados en cada período. Los árboles apeados fueron seleccionados al azar. Inmediatamente después del volteo, se procedió a la medición de H (Figura 4) y la cubicación del fuste (Figura 5) con y sin corteza hasta 3 cm en punta fina según la fórmula de Smalian:

$$V = \left(\frac{D1^2 + D2^2}{2} \right) \times (\pi / 4) \times L$$

Dónde:

V = volumen de la troza (m³)

D1 = diámetro en punta fina (m)

D2 = diámetro en punta gruesa (m)

L = largo de la troza (m)



Figura 4. Medición de altura luego del apeo.



Figura 5. Cubicación del fuste.

El volumen total de cada individuo se obtuvo mediante la sumatoria de los volúmenes de todas las trozas cubicadas. Con los valores de volumen con y sin corteza, DAP y H de los individuos apeados, se ajustó para estimar el volumen individual de todos los árboles: el modelo 1 (Schumacher y Hall (1933)) para el clon X78 y el modelo 2 para el clon 2136. Los volúmenes con y sin corteza estimados en las parcelas de cada tratamiento fueron referidos a valores por hectárea ($m^3 ha^{-1}$).

$$V = a \times DAP^b \times H^c + \varepsilon \quad (1)$$

$$\ln V = a + b \times \ln DAP + c \times \ln H + \varepsilon \quad (2)$$

Dónde:

V = volumen (m^3)

DAP = diámetro a la altura del pecho (cm)

H = altura (m)

Ln = logaritmo natural

a, b y c = parámetros del modelo

ε = error aleatorio.

Rodajas del fuste de 5 cm de espesor al DAP fueron obtenidas para determinar la densidad básica de la madera (DB). Para ello, a cada muestra de madera, una vez saturada con agua, se determinó el volumen mediante picnómetro. Posteriormente, cada muestra se secó en estufa a 103 ± 2 °C hasta peso constante para determinar peso anhidro. Con los datos obtenidos se determinó la densidad básica:

$$DB = (PS / VV)$$

Dónde:

DB = densidad básica de la madera ($kg m^{-3}$)

PS = peso seco (kg)

VV = Volumen verde (m^3).

Cada árbol apeado fue separado en compartimentos de hojas, ramas y fuste para la determinación de la biomasa (Figura 6). A campo se registró el peso húmedo de hojas y ramas utilizando balanza de precisión 0,001 kg. En los compartimentos hojas y ramas se tomó una muestra del 20 % para la

determinación del peso seco en laboratorio. Las muestras fueron colocadas en estufas de secado a 63 ± 2 °C hasta alcanzar su peso seco constante (Figura 7). Una vez obtenido el peso seco se determinó la razón:

$$R_i = (PS_i / PH_i)$$

Dónde:

R_i = razón del compartimento i

PS_i = peso seco del compartimento i (g)

PH_i = peso húmedo del compartimento i (g).

Para obtener el peso seco de cada compartimento se multiplicó la razón por el peso húmedo del mismo. Para estimar el peso seco del fuste se multiplicó el volumen con corteza por la DB. El peso seco total individual se obtuvo sumando el peso seco de todos los compartimentos. Con los valores de los pesos secos de hojas, ramas, fuste, total y las variables DAP y H, fueron ajustados modelos de regresión para estimar el peso seco individual por compartimento de todos los árboles según el siguiente modelo:

$$\ln B = a + b \times \ln DAP + c \times \ln H + \varepsilon$$

Dónde:

B = peso seco del compartimento (kg)

DAP = diámetro a la altura del pecho (cm)

H = altura (m)

ln = logaritmo natural

a, b y c = parámetros del modelo

ε = error aleatorio.

Los pesos secos de los compartimentos estimados en las parcelas de cada tratamiento fueron referidos a valores por hectárea ($Mg\ ha^{-1}$). Para calcular el contenido de C total fijado por hectárea a los 50 meses se multiplicó la biomasa total por el factor de conversión 0,47 (IPCC, 2006).



Figura 6. Estudios de biomasa aérea del clon *E. grandis*. Compartimentalización de la biomasa en hojas, ramas y fuste.



Figura 7. Muestras de biomasa aérea de *E. grandis* en estufa de secado.

Un análisis de componentes principales (ACP) permitió establecer las relaciones entre productividad de biomasa del fuste, variables climáticas, ambientales y densidad de plantación. La productividad anual de biomasa de fuste a los 24 meses de edad del tratamiento de mayor densidad de plantación de los clones 2136 y X78 fue comparada con datos de productividad de biomasa estimada en Argentina (Fernández y Lupi, 2016). Los resultados fueron interpretados mediante las herramientas gráficas del ACP. Estas permiten visualizar las correlaciones entre variables y la distribución de los individuos, ambos en los ejes principales del plano factorial. Los resultados de productividad de biomasa del fuste de los clones aquí estudiados fueron considerados variables cuantitativas suplementarias. Se eliminaron las variables altamente correlacionadas entre sí, por ejemplo, la precipitación y el balance hídrico (coeficiente de correlación 0,84, $p < 0,05$). La representación de los elementos fila (índices relevados de productividad de biomasa de fuste) fueron agrupados según la especie. Las variables consideradas finalmente en el análisis de ACP fueron las siguientes (Tabla 1, ANEXO I Tabla 3): productividad anual (prod), densidad de plantación (den), temperatura media anual (temp), índice de Martonne (precipitación media anual / temperatura media anual, indM), balance hídrico (precipitación – evapotranspiración potencial, bah), limitaciones de sitio (sitio).

Tabla 1. Variable, tipo y variación de las variables consideradas en el estudio de ACP.

Variable	Tipo	Media	Intervalo mínimo-máximo
Productividad anual ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Cuantitativa	22,6	3,5 - 46,3
Densidad de plantación (árboles ha^{-1})	Cuantitativa	2500	1.111 - 27.777
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Cuantitativa	16,3	13,7 - 22,5
Índice de Martonne	Cuantitativa	42,8	23,8 - 56,0
Balance hídrico (mm)	Cuantitativa	250	50 - 1.100
*Limitaciones de sitio	Ordinal cualitativa	4	1 - 11

* **Limitaciones de sitio:** 1 sin limitaciones edáficas, suelos profundos con buena capacidad de retención hídrica; 11 suelos con severas limitaciones de profundidad y de capacidad de almacenamiento de agua

Las variables estudiadas se sometieron a un análisis de homocedasticidad mediante la prueba de Bartlett (Bartlett, 1937) y se aplicó la prueba de Kolmogorov Smirnov (Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1948) para verificar su normalidad. Un análisis de la varianza (ANOVA) seguido de diferentes pruebas *post-hoc* (dependiendo de la distribución de los datos) fue realizado para establecer diferencias significativas entre tratamientos para las variables precedentemente indicadas. El test de Tukey (Tukey, 1949) fue utilizado para el caso de datos normales y homocedásticos, el test de One way seguido de una prueba de Lincoln (Lincoln, 1930) para datos normales y heterocedásticos, el test de Kruskal Wallis (Kruskal Wallis, 1952) para datos no normales y homocedásticos, y el test de Welch (Welch, 1947) para datos no normales y heterocedásticos. Para datos desbalanceados (3 repeticiones clon 2136 y 2 repeticiones clon X78, y distintos n), se utilizó la librería “car” y el modelo ANOVA tipo II (suma de cuadrados que es calculada a través del desbalance). El nivel de significancia se fijó en $p < 0,05$. Todos los análisis se realizaron utilizando el software R Core Team, 4.0.3. (R Core Team, 2019).

3.3. Resultados

3.3.1. Evaluación de la productividad de biomasa aérea de 2 clones de *Eucalyptus* sp. a los 12 y 24 meses de edad.

La supervivencia a los 12 meses fue de 93 ± 8 % para el clon 2136 y 78 ± 8 % para el clon X78 ($p=0,1387$). A los 24 meses, solo el clon 2136 registro mortalidad, disminuyendo a 85 ± 22 % la supervivencia.

Tanto a los 12 meses como a los 24 meses, no se observaron diferencias significativas para el DAP (Figura 8a), siendo los valores medios y la desviación estándar a los 12 meses de $4,4 \pm 0,9$ cm y $4,6 \pm 0,5$ cm, mientras que a los 24 meses fueron de $7,6 \pm 1,7$ cm y $8 \pm 1,1$ cm para el clon 2136 y X78, respectivamente. La altura (Figura 8b) resultó significativamente superior en 24,9 % y 17,4 % en el clon X78, a los 12 y 24 meses respecto del clon 2136.

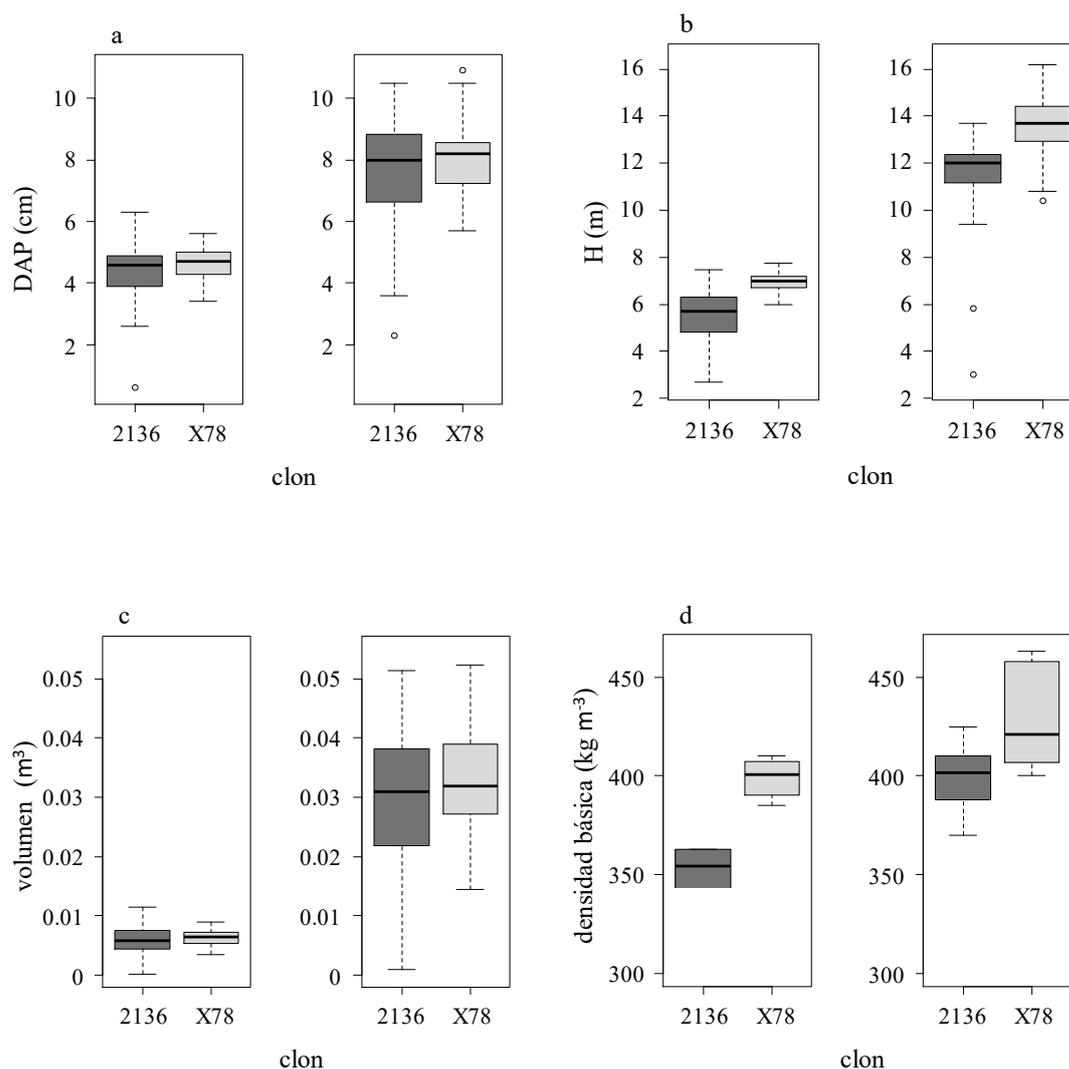


Figura 8. a) Diámetro a la altura del pecho (DAP), b) altura total (H), c) volumen con corteza por árbol y d) densidad básica de la madera para los clones de *Eucalyptus* sp. a los 12 meses (izquierda) y a los 24 meses (derecha) de edad. Las líneas punteadas indican el rango de los datos.

A los 12 meses la producción en volumen del clon 2136 fue de $16,8 \pm 2,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $13,3 \pm 2,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ con y sin corteza respectivamente, mientras que el clon X78 produjo $16,2 \pm 0,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $14,6 \pm 0,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de volumen con y sin corteza, respectivamente (Figura 8c). Estas diferencias no fueron significativas. A los 24 meses la producción volumétrica fue de $82,6 \pm 13,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $70,9 \pm 11,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para el clon 2136 y de $85,5 \pm 5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $73,9 \pm 4,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para el clon X78, con y sin corteza, respectivamente.

La densidad básica fue significativamente diferente a los 12 meses: $347,8 \pm 19,7$ kg m^{-3} vs $398,9 \pm 10,5$ kg m^{-3} para el clon 2136 y X78, respectivamente. Sin embargo, si bien el clon X78 mantuvo su superioridad en densidad a los 24 meses, estas diferencias dejaron de ser significativas: $399,4 \pm 19,2$ kg m^{-3} y $428,2 \pm 26,9$ kg m^{-3} para el clon 2136 y X78, respectivamente (Figura 8d).

En la tabla 2 se presentan los parámetros de los modelos de regresión ajustados para estimar el volumen con y sin corteza, biomasa de hojas, ramas, fuste y total de los clones 2136 y X78.

La producción de biomasa a los 12 meses registró diferencias significativas en los compartimentos estudiados (Tabla 3). A los 24 meses solamente la biomasa de fuste y total fue significativamente diferente, siendo de $32,245 \pm 4,239$ Mg ha^{-1} y $41,927 \pm 6,362$ Mg ha^{-1} para el clon 2136 y de $38,543 \pm 3,337$ Mg ha^{-1} y $45,347 \pm 0,898$ Mg ha^{-1} para el X78, respectivamente.

Tabla 2. Parámetros y estadísticos de los modelos de regresión ajustados para las estimaciones de volumen y biomasa por clon. Los coeficientes a, b y c representan los parámetros de los modelos de regresión.

Clon	Variables	Coeficientes			R ²	n	e
		a	b	c			
2136	Volumen de fuste c/corteza	0,000075	1,263	1,360	99,5	12	0,0009
	Volumen de fuste s/corteza	0,000056	1,121	1,530	99,7	12	0,0006
	Biomasa de hojas	-1,753	-0,240	1,454	82,7	12	0,2562
	Biomasa de ramas	-1,510	-1,004	2,103	52,7	12	0,4146
	Biomasa de fuste	-4,177	1,325	1,614	99,2	12	0,4974
	Biomasa total	-2,305	0,771	1,502	98,3	12	0,8523
X78	Volumen de fuste c/corteza	0,000057	1,384	1,317	99,5	10	0,0009
	Volumen de fuste s/corteza	0,000058	1,303	1,323	99,2	10	0,0010
	Biomasa de hojas	-0,367	-2,843	3,946	68,5	10	0,4013
	Biomasa de ramas	-0,857	-3,016	4,314	84,3	10	0,2286
	Biomasa de fuste	-4,538	1,861	1,127	97,8	10	0,8770
	Biomasa total	-2,335	0,588	1,746	96,4	10	1,2466

R²: coeficiente de determinación, n: número de efectivos, e: error estándar de la estimación.

Tabla 3. Producción promedio de biomasa por árbol y desviación estándar (kilogramos de materia seca) de los clones 2136 y X78 a los 12 y 24 meses de edad.

Edad (meses)	Compartimento de biomasa	2136		X78		p-valor
		Media	de	Media	de	
12	Biomasa de hojas*	0,999	± 0,273	1,269	± 0,430	0,0001
	Biomasa de ramas	0,910	± 0,269	0,991	± 0,366	0,1935
	Biomasa de fuste*	1,794	± 0,931	2,238	± 0,506	0,0069
	Biomasa total*	3,652	± 1,543	4,461	± 0,999	0,0040
24	Biomasa de hojas	1,661	± 0,555	1,881	± 0,748	0,0912
	Biomasa de ramas	1,405	± 0,497	1,421	± 0,703	0,8882
	Biomasa de fuste*	11,409	± 4,864	14,826	± 4,467	0,0006
	Biomasa total*	14,742	± 5,521	17,443	± 4,951	0,0139

de= desvío estándar, *diferencias significativas ($p < 0,05$)

Los dos principales ejes factoriales del ACP permitieron explicar más de 77 % de la variabilidad. En el gráfico concéntrico de relación entre variables (Figura 9a), la variabilidad sobre el eje 1 del ACP puede ser explicada por la asociación positiva entre la productividad anual y la densidad de plantación, la cual se asocia a su vez negativamente con las limitaciones del sitio de plantación y la temperatura. Sobre el segundo eje del ACP la variabilidad se explica por las asociaciones entre el índice de Martonne y el balance hídrico, los cuales parecen tener una asociación baja con la productividad anual para estos sistemas de alta densidad de plantación.

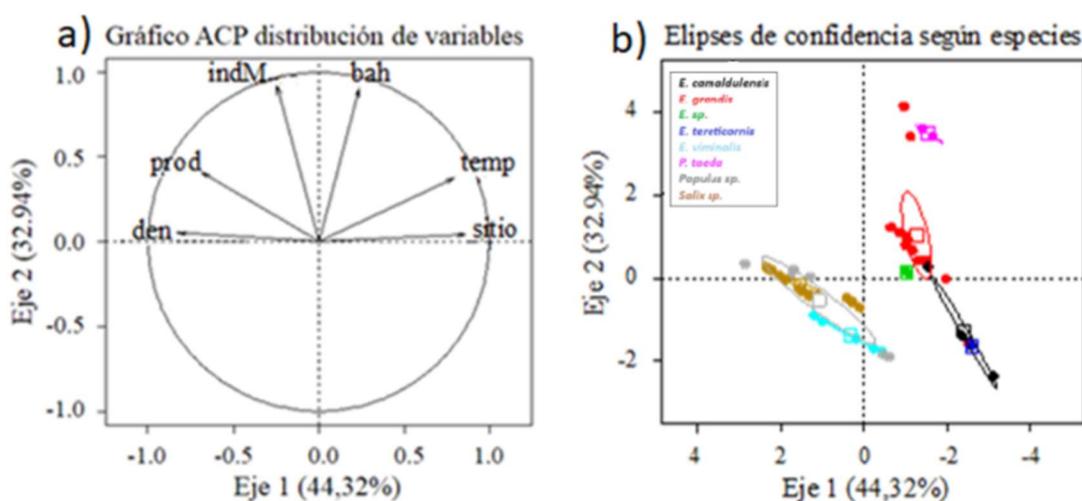


Figura 9. a) Correlaciones de los componentes principales de las variables de productividad, climáticas y ambientales en los clones de *Eucalyptus* sp. b) Gráfico de agrupamiento.

En la figura 9b se puede apreciar el agrupamiento según las especies que conforman la base de datos (ANEXO I Tabla 3). Los dos puntos verdes (identificados como “*E. sp.*”) corresponden a los datos de productividad de los clones 2136 y X78. En un principio, lo que pudo establecerse es que el sistema productivo analizado en el presente capítulo no se diferencia del complejo de *E. grandis* (puntos rojos). Hacia el extremo superior de la derecha, el *E. grandis* comparte su agrupamiento con *Pinus taeda* (puntos rosas) creciendo en suelos rojos de Misiones y Corrientes. La base de datos analizada también permite discernir los sistemas de muy alta densidad de plantación y alta productividad que constituyen los estaqueros de *Salix* sp. y *Populus* sp. del Delta del Paraná. Dichos resultados provienen de evaluaciones de crecimiento en situaciones de mayor densidad de plantación ($27.777 \text{ árboles ha}^{-1}$), lo que implica un manejo para producción dendroenergética de muy alta densidad de plantación, turnos de corta duración y alta productividad de biomasa.

3.3.2. Evaluación de la productividad de biomasa aérea de diferentes densidades de plantación con el clon *Eucalyptus grandis*

La supervivencia no registró diferencias significativas ($p=0,4175$) entre tratamientos. A los 12 meses fue del $93 \pm 8 \%$, $81 \pm 14 \%$ y $96 \pm 4 \%$ para los tratamientos de alta (AD), media (MD) y baja (BD) densidad de plantación respectivamente. A los 24 meses, los tratamientos registraron nuevos árboles muertos, disminuyendo la supervivencia al $85 \pm 22 \%$, $70 \pm 14 \%$ y $86 \pm 16 \%$, respectivamente. No se registraron nuevos árboles muertos en meses posteriores.

La densidad de plantación influyó en el crecimiento individual del árbol (Tabla 4). Se observaron diferencias significativas para las variables DAP, H y volumen individual (con y sin corteza) entre el tratamiento AD respecto a MD y BD, sin existir diferencias significativas entre estos últimos. El volumen por hectárea fue significativamente diferente hasta los 36 meses de edad (3 años). No obstante,

a los 50 meses de edad, esas diferencias dejaron de ser significativas ($p=0,0663$), aunque AD registró mayor productividad, representando un valor superior en 12,2 % y 31,8 % respecto a MD y BD.

La densidad básica de la madera aumentó en todos los tratamientos desde el inicio hasta el fin del período de evaluación. Siempre fue menor en el tratamiento AD, siendo significativamente diferente a MD y BD (dependiendo el momento de evaluación), y exceptuando la medición a los 36 meses donde no se establecieron diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 4. Diámetro a la altura del pecho (DAP), altura (H), volumen con y sin corteza (volumen c/c y s/c) y densidad básica de la madera (DB) evaluadas en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) del clon *E. grandis* a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad. Letras distintas establecen diferencias significativas ($p<0,05$).

Edad (meses)	Variable	AD Media \pm de	MD Media \pm de	BD Media \pm de	p-valor
12	DAP (cm)	4,4 \pm 0,9 a	5,3 \pm 0,9 b	5,0 \pm 1,1 b	<0,0001
	H (m)	5,5 \pm 1,1 a	5,9 \pm 0,9 a	5,1 \pm 1,3 b	<0,0001
	Volumen c/c ($m^3 arb^{-1}$)	0,005 \pm 0,002 a	0,008 \pm 0,003 b	0,006 \pm 0,003 b	<0,0001
	Volumen s/c ($m^3 arb^{-1}$)	0,004 \pm 0,002 a	0,006 \pm 0,002 b	0,005 \pm 0,003 b	<0,0001
	Volumen c/c ($m^3 ha^{-1}$)	15,9 \pm 2,5 a	8,9 \pm 0,8 b	5,5 \pm 2,9 b	0,0036
	Volumen s/c ($m^3 ha^{-1}$)	12,6 \pm 2,2 a	7,2 \pm 0,7 b	4,3 \pm 2,3 b	0,0047
	DB ($kg m^{-3}$)	347,9 \pm 19,8 a	398,3 \pm 34,9 b	424,8 \pm 17,6 b	0,0006
24	DAP (cm)	7,7 \pm 1,7 a	11,6 \pm 1,6 b	11,3 \pm 1,5 b	<0,0001
	H (m)	11,5 \pm 1,6 a	13,5 \pm 1,1 b	13 \pm 1,3 b	<0,0001
	Volumen c/c ($m^3 arb^{-1}$)	0,029 \pm 0,012 a	0,067 \pm 0,018 b	0,063 \pm 0,018 b	<0,0001
	Volumen s/c ($m^3 arb^{-1}$)	0,024 \pm 0,01 a	0,058 \pm 0,015 b	0,053 \pm 0,016 b	<0,0001
	Volumen c/c ($m^3 ha^{-1}$)	83,1 \pm 10,1 a	68,5 \pm 13,7 ab	49,6 \pm 12,3 b	0,0404
	Volumen s/c ($m^3 ha^{-1}$)	70,8 \pm 8,7 a	59,3 \pm 12,4 ab	42,1 \pm 10,6 b	0,0048
	DB ($kg m^{-3}$)	399,5 \pm 19,3 a	421,0 \pm 20,4 ab	438,4 \pm 16,8 b	0,0231
36	DAP (cm)	9,4 \pm 2,6 a	14,7 \pm 2,8 b	14,7 \pm 1,8 b	<0,0001
	H	14,8 \pm 2,6 a	17,8 \pm 1,1 b	17,5 \pm 0,9 b	<0,0001

Edad (meses)	Variable	AD Media ± de	MD Media ± de	BD Media ± de	p-valor
	(m)				
	Volumen c/c (m ³ arb ⁻¹)	0,056 ± 0,03 a	0,137 ± 0,038 b	0,137 ± 0,034 b	<0,0001
	Volumen s/c (m ³ arb ⁻¹)	0,049 ± 0,026 a	0,121 ± 0,033 b	0,118 ± 0,030 b	<0,0001
	Volumen c/c (m ³ ha ⁻¹)	161,5 ± 13,7 a	138,5 ± 20,9 ab	107,3 ± 18,5 b	0,0279
	Volumen s/c (m ³ ha ⁻¹)	140,9 ± 12,3 a	122,7 ± 18,7 ab	93,6 ± 16,1 b	0,0294
	DB (kg m ⁻³)	410,4 ± 19,4 a	435,2 ± 17,2 a	431,9 ± 24,4 a	0,1090
	DAP (cm)	10,3 ± 3 a	16,3 ± 2,6 b	16,3 ± 2,1 b	<0,0001
	H (m)	15,7 ± 3 a	19,2 ± 1,3 b	18,8 ± 1,1 b	<0,0001
50	Volumen c/c (m ³ arb ⁻¹)	0,076 ± 0,042 a	0,178 ± 0,055 b	0,177 ± 0,047 b	<0,0001
	Volumen s/c (m ³ arb ⁻¹)	0,062 ± 0,037 a	0,157 ± 0,048 b	0,154 ± 0,042 b	<0,0001
	Volumen c/c (m ³ ha ⁻¹)	203,8 ± 22,4 a	178,9 ± 29,6 a	138,8 ± 28,4 a	0,0663
	Volumen s/c (m ³ ha ⁻¹)	178,4 ± 19,9 a	158,9 ± 26,5 a	122,1 ± 25,1 a	0,0702
	DB (kg m ⁻³)	446,4 ± 26,2 a	475,3 ± 14,0 b	477,3 ± 11,6 b	0,0185

de= desvío estándar

En la Tabla 5 se presentan los parámetros de los modelos de regresión ajustados para estimar el volumen con y sin corteza, biomasa de hojas, ramas, fuste y total del clon *E. grandis* en tres densidades de plantación. La densidad de plantación influyó en la partición de la biomasa aérea individual (Tabla 6). En los periodos evaluados se determinaron diferencias significativas entre AD respecto a MD y BD, solo diferenciándose a los 50 meses en la partición de biomasa de hojas y ramas. Se registró un cambio en la proporción de la biomasa de los compartimentos del árbol en relación con la edad (Figura 10). La biomasa de fuste tuvo un aumento en la proporción de la biomasa total a lo largo del período evaluado. Este representaba a los 12 meses de edad el 52,2 %, 59,2 % y 54,8 % de la biomasa total en los tratamientos AD, MD y BD respectivamente. Mientras que, a los 50 meses representó un 88,3 %, 84,8 % y 82,6 % de la misma. La proporción de biomasa de hojas disminuyó un 19,5 %, 14,6 % y 17,6 % en los tratamientos AD, MD y BD respectivamente, en tanto que el porcentaje de biomasa de ramas disminuyó un 17,2 % para AD y 11,9 % para MD y 11,2 % para BD en el mismo período.

Tabla 5. Parámetros y estadísticos de los modelos de regresión ajustados para las estimaciones de volumen y biomasa de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) a los 50 meses de edad. Los coeficientes a, b, c representan los parámetros de los modelos de regresión. R²: coeficiente de determinación, n: número de efectivos, e: error estándar de la estimación.

Tratamiento	Variables	Coeficientes			R ²	n	e
		a	b	c			
AD	Volumen c/c	-9,811	1,796	1,035	99,6	24	0,0678
	Volumen s/c	-10,192	1,742	1,171	99,6	24	0,0670
	Biomasa hojas	-2,080	2,785	-1,297	85,1	24	0,2346
	Biomasa ramas	-2,236	2,854	-1,338	83,3	24	0,2563
	Biomasa fuste	-4,415	1,933	1,157	99,4	24	0,0877
	Biomasa total	-2,882	2,116	0,501	98,7	24	0,1082
MD	Volumen c/c	-9,701	1,784	1,004	99,6	24	0,0833
	Volumen s/c	-10,033	1,702	1,154	99,4	24	0,0982
	Biomasa hojas	-2,514	2,133	-0,518	91,0	24	0,2110
	Biomasa ramas	-2,864	2,482	-0,698	92,2	24	0,2139
	Biomasa fuste	-3,947	1,842	1,066	98,9	24	0,1387
	Biomasa total	-2,723	1,912	0,644	98,6	24	0,1337
BD	Volumen c/c	-9,756	1,741	1,069	99,8	22	0,0608
	Volumen s/c	-10,162	1,759	1,146	99,8	22	0,0701
	Biomasa hojas	-2,283	2,854	-1,257	95,1	22	0,1617
	Biomasa ramas	-2,248	2,932	-1,062	95,8	22	0,1794
	Biomasa fuste	-3,880	1,970	0,930	99,6	22	0,0939
	Biomasa total	-2,566	2,338	0,195	99,4	22	0,0948

Tabla 6. Producción promedio de biomasa por árbol (kg materia seca) y desvío estándar (de) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) evaluados a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad. Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

Edad	Compartimentos (kg arb ⁻¹)	AD	MD	BD	p-valor
		Media ± de	Media ± de	Media ± de	
12	Biomasa hojas	0,887 ± 0,318 a	1,193 ± 0,367 b	1,348 ± 0,490 b	<0,0001
	Biomasa ramas	0,786 ± 0,288 a	1,128 ± 0,389 b	1,096 ± 0,451 b	<0,0001
	Biomasa fuste	1,733 ± 0,936 a	3,059 ± 1,277 b	2,610 ± 1,507 b	<0,0001
	Biomasa total	3,321 ± 1,581 a	5,584 ± 2,103 b	5,423 ± 2,629 b	<0,0001
24	Biomasa hojas	1,614 ± 0,728 a	3,972 ± 1,018 b	4,236 ± 1,197 b	<0,0001
	Biomasa ramas	1,443 ± 0,318 a	4,252 ± 0,318 b	4,792 ± 0,318 b	<0,0001
	Biomasa fuste	11,646 ± 5,402 a	29,283 ± 8,346 b	27,588 ± 8,353 b	<0,0001
	Biomasa total	15,476 ± 7,010 a	39,070 ± 10,656 b	38,043 ± 11,273 b	<0,0001
36	Biomasa hojas	2,128 ± 1,127 a	5,752 ± 1,616 b	6,205 ± 1,782 b	<0,0001
	Biomasa ramas	1,913 ± 1,033 a	6,394 ± 2,052 b	6,906 ± 2,082 b	<0,0001
	Biomasa fuste	24,186 ± 13,681 a	61,150 ± 17,808 b	60,795 ± 16,418 b	<0,0001
	Biomasa total	28,122 ± 15,380 a	73,940 ± 21,215 b	74,580 ± 21,007 b	<0,0001
50	Biomasa hojas	2,528 ± 1,433 a	6,845 ± 2,044 b	7,649 ± 2,330 c	<0,0001
	Biomasa ramas	2,282 ± 1,320 a	7,784 ± 2,646 b	8,708 ± 2,788 c	<0,0001
	Biomasa fuste	31,218 ± 19,782 a	79,843 ± 25,787 b	79,827 ± 2,941 b	<0,0001
	Biomasa total	35,330 ± 21,345 a	94,120 ± 29,622 b	96,610 ± 28,940 b	<0,0001

de= desvío estándar

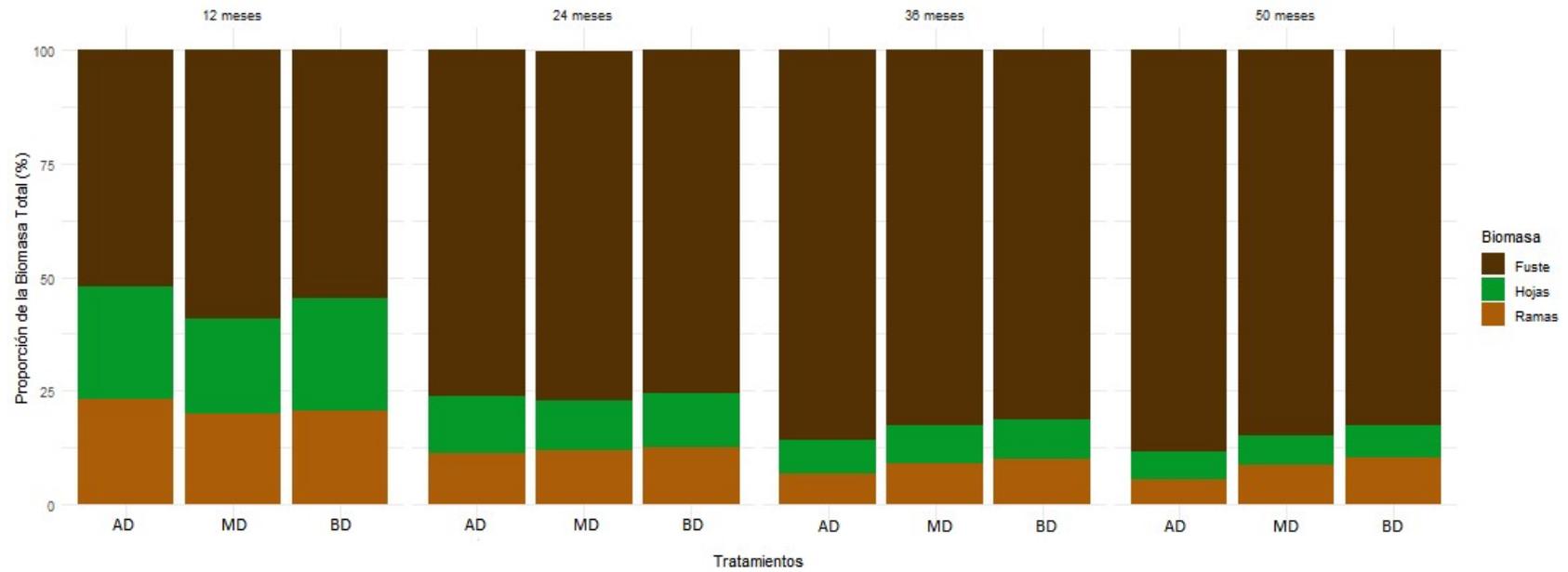


Figura 10. Proporción de la biomasa total (%) de los compartimentos del árbol a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD, respectivamente) del clon *E. grandis*.

La biomasa acumulada por hectárea (Figura 11) se incrementó al aumentar la densidad de plantación. Fue significativamente diferente ($p=0,0036$) a los 12 meses de edad, siendo mayor AD respecto de MD y BD. A los 50 meses, esas diferencias dejaron de ser significativas, aunque AD registró mayor productividad, representando un valor superior de biomasa total en 5,4 % y 24,2 % respecto a MD y BD. El contenido de C total fijado por hectárea a los 50 meses por la biomasa aérea no registró diferencias significativas ($p=0,168$) entre tratamientos, siendo de $47,2 \pm 5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, $44,7 \pm 7,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $35,8 \pm 7,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ para AD, MD y BD respectivamente.

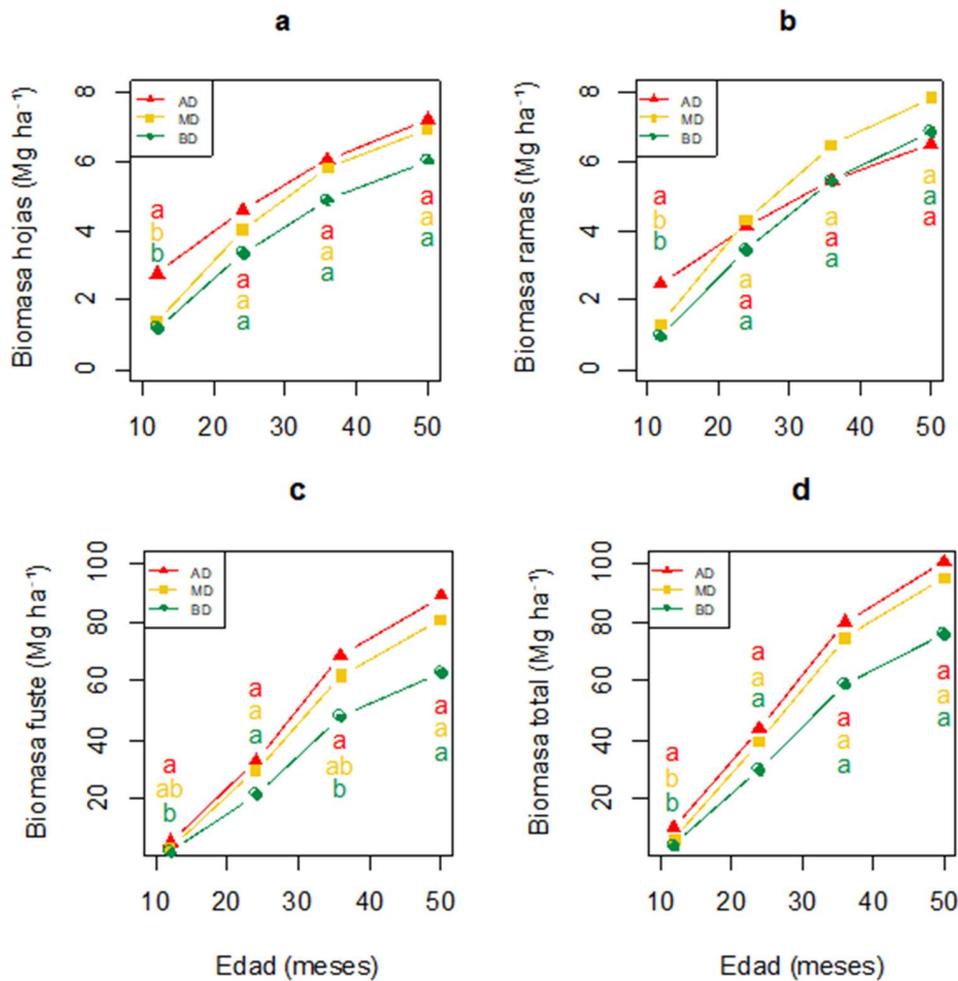


Figura 11. Evolución de la biomasa de hojas, ramas, fustes y total del clon *E. grandis* a los 12, 24, 36 y 50 meses de plantación de los tratamientos de alta, media y baja

densidad de plantación (AD, MD y BD). Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

3.4. Discusión

Analizando el establecimiento de dos clones en esquemas de muy altas densidades de plantación ($3.333 \text{ árboles ha}^{-1}$), se encontró que a los 12 meses de edad la supervivencia del clon 2136 fue 15 % mayor respecto del clon X78. Esto podría deberse a que en este último clon se observó, en los árboles muertos, un crecimiento desbalanceado entre los componentes de raíces y copa. A los 24 meses se registró una disminución en el porcentaje de supervivencia únicamente en el clon 2136, consecuencia de fuertes vientos, provocando la caída de árboles en una parcela ubicada en un extremo del ensayo. Esto es lo que finalmente genera el alto valor de desviación estándar (22 %) para esta variable. Si bien una textura arenosa de suelo favorece el anclaje, debido a la gran cantidad de poros grandes que facilita la penetración y desarrollo del sistema radical, la alta productividad en un esquema de alta densidad de plantación, principalmente de los componentes de copa, provoca un desbalance entre la raíz y copa, haciendo que sean más susceptibles a la caída por fuertes vientos en los periodos iniciales del desarrollo. A pesar de ello, ambos clones tuvieron un buen establecimiento, registrando valores similares de supervivencia a los publicados para clones y material seminal de *E. grandis* en suelos arenosos de Corrientes (Aparicio, 2012; Aparicio et al., 2018; Aparicio y Maggio, 2018).

Los valores de DAP son semejantes a los registrados por otros autores a edades entre 24 meses y 30 meses en la provincia de Corrientes (Aparicio et al., 2005, 2007, 2018; Aparicio, 2012), aunque estos estudios difieren en el material genético analizado y la densidad de plantación ($714 - 1.000 \text{ árboles ha}^{-1}$). En la variable altura se observó que los clones estudiados presentaron un crecimiento superior (10 - 30 %) que el material genético analizado por dichos autores. Esto señala que los clones 2136 y X78 presentan un mayor potencial de crecimiento, logrando crecimientos superiores en condiciones de mayor competencia por recursos.

La producción de volumen por hectárea a los 24 meses de edad es muy superior (50 - 80 %) a la encontrada en la literatura para el centro y sudeste de Corrientes (Aparicio et al., 2018; Caniza et al., 2018), probablemente, debido a la densidad de plantación. Para una forestación dendroenergética de 3.330 árboles ha⁻¹ con *E. grandis* a los 24 meses de edad en Uruguay, Resquín et al. (2015) obtuvieron valores inferiores de producción en volumen a los estimados en esta tesis (40 a 60 m³ ha⁻¹ vs 82,6 a 85,5 m³ ha⁻¹). Por otro lado, el volumen de la corteza representa aproximadamente 14 % del volumen total en ambos clones, siendo semejantes a los valores encontrados por López (2017) para clones puros e híbridos de *E. grandis*.

En cuanto a la densidad básica de la madera, los valores obtenidos son similares a los reportados para plantaciones de *E. grandis* establecidas en marcos de plantación menos intensivos y diferentes calidades de sitio del SO de Corrientes (López y López, 2011). También son similares a los registrados en Uruguay para plantaciones dendroenergéticas de *E. grandis* a los 22 meses de edad (Resquín et al., 2019) y para híbridos de *Eucalyptus* en Brasil y Argentina (Oliveira-Carneiro et al., 2014; López, 2016). Por otro lado, la mayor densidad básica observada del clon X78 con respecto al 2136, podría ser aportada por el material parental de *E. camaldulensis* producto del cruzamiento entre estas especies (Marcó y Harrant, 2005).

La producción anual de biomasa de estos sistemas está determinada principalmente por la densidad de plantación, y las condiciones edáficas y climáticas del sitio. Martiarena (2016) afirma que las principales causas que afectan la producción de biomasa del rodal son el manejo de la densidad, la calidad del sitio y el manejo silvícola. Fernández y Lupi (2016) estimaron incrementos medios anuales entre 3,5 y 41,8 Mg ha⁻¹ en *Eucalyptus* sp. para el desarrollo de plantaciones dendroenergéticas (1.111 - 3.000 árboles ha⁻¹) en regiones de Argentina con balance hídrico positivo, con distintos turnos de cosecha (4 - 16 años). Para el *E. grandis* estimaron incrementos entre 11,1 y 41,8 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con turnos entre 4 y 7 años. Los clones 2136 y X78 lograron incrementos de 16,1 y 19,3 Mg ha⁻¹ año⁻¹ a los dos años de edad, demostrando un buen potencial de crecimiento en etapas

tempranas del desarrollo, siendo altamente probable que estas producciones anuales aumenten debido a que se encuentran en la etapa exponencial del crecimiento y que aún no han llegado a la mitad del turno de cosecha estimado para esta región (4 a 7 años). Otros autores (Guerra et al., 2014; Hauk et al., 2014; Cabrera et al., 2016; Junior et al., 2016; Magalhães et al., 2016; Acuña et al., 2018; Bentancor et al., 2019; Resquín et al., 2020) han registrado valores de incremento de biomasa entre 0,8 y 30 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para el género *Eucalyptus* en Oceanía, Europa, Norteamérica, Chile, Brasil y Uruguay, en densidades mayores de plantación, entre 1.111 - 10.000 árboles ha⁻¹. A su vez, estimaron valores de entre 3 - 10,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para los géneros *Populus*, *Salix*, *Robinia* y *Paulownia*, en densidades de plantación que van desde los 1.111 a 18.000 árboles ha⁻¹ en Europa. Los clones evaluados en este trabajo lograron altas productividades en densidades de plantación de 3.333 árboles ha⁻¹, con alta tasa de supervivencia, al menos para la etapa inicial de crecimiento. Evidencian a su vez que aún existe un gran margen de productividad anual a ser explorada por otras densidades de plantación que necesitan ser estudiadas en Argentina.

Eucalyptus, en función a sus altos índices de productividad, densidad de la madera y de su gran adaptación a distintas condiciones ambientales, es uno de los géneros forestales más utilizados para la implantación de forestaciones energéticas (Vieira Rocha, 2011; Ferreira et al., 2017; Moya et al., 2019). Los *Eucalyptus* sp. híbridos son una solución para la forestación de áreas consideradas marginales para *E. grandis* (López, 2017). Los cruzamientos entre especies permiten combinar las características favorables de los parentales. *E. camaldulensis* aporta rusticidad, alta densidad de madera y tolerancia a las heladas, mientras que *E. grandis* aporta productividad y buena forma de fuste. De acuerdo con los resultados de este trabajo, en suelos de poca fertilidad natural como los de esta región, los clones estudiados tuvieron buena productividad en altas densidades de plantación. Así mismo, el análisis de agrupamiento por especie los ubica lo más próximo al complejo de *E. grandis* en Argentina, pero distantes de la productividad establecida en ambientes sin limitaciones de sitio, en mayores densidades de plantación y manejo intensivo como lo son los valores registrados en salicáceas.

Al evaluar distintas densidades de plantación con el clon *E. grandis* 2136, se encontró que el mismo alcanzó crecimientos superiores a los demostrados en la bibliografía para *E. grandis* creciendo en la provincia de Corrientes, independientemente de la densidad de evaluada (Aparicio et al., 2018; Caniza et al., 2018). Además, registró un buen establecimiento en todas las densidades con valores similares de supervivencia a los publicados por Aparicio et al. (2018) y Aparicio y Maggio (2018) para clones y material seminal de *E. grandis* en suelos arenosos de Corrientes. La supervivencia del clon *E. grandis* no estuvo relacionada con la densidad de plantación, hasta los 50 meses de edad no se ha registrado mortalidad por cuestiones de ocupación de sitio, coincidiendo con lo observado en Uruguay en distintas densidades de plantación con fines energéticos (2.220, 3.330, 4.440 y 6.660 árboles ha⁻¹) con varias especies de *Eucalyptus* (Resquín et al., 2018).

La densidad de plantación influyó en el crecimiento individual de los árboles, correspondiendo con lo afirmado por otros autores (Ferrere, 2005; Guerra et al., 2014; Barth, 2016; Binkley et al., 2017; Resquín et al., 2018), quienes mencionan que las variables DAP, H, volumen y biomasa individual tienden a aumentar al disminuir la densidad de plantación, mientras que el volumen y la biomasa total a nivel de hectárea se incrementa a mayores densidades de plantación. Ferrere et al. (2008) y Acuña et al. (2018) observaron tendencias similares a las encontradas en este trabajo en el cambio de la proporción de biomasa de los compartimentos del árbol en relación con la edad, en distintas especies de *Eucalyptus*, donde la proporción de biomasa del fuste aumentó con la edad mientras que la biomasa de hojas y ramas disminuyó. Conocer la biomasa acumulada y la evolución de los compartimentos con la edad cobra relevancia para la determinación del turno óptimo de cosecha de estos sistemas productivos energéticos. Esto permite maximizar la producción de biomasa de fuste en el corto plazo, optimizando los sistemas de aprovechamiento forestal y manejo de residuos en beneficio de mantener la productividad del sitio (Fernández y Lupi, 2016; Resquín et al., 2022).

Al no registrar diferencias significativas entre los tratamientos en la producción de biomasa total y C fijado a los 50 meses de edad, observamos que disminuyendo la

densidad de plantación de 3.333 árboles ha⁻¹ a 1.429 árboles ha⁻¹, la producción individual en volumen y biomasa se duplicó. Esto podría justificar la disminución de la densidad en plantaciones con destino energético, generando una notable reducción de los costos de implantación (INTA-SAGyP, 1995). Por otra parte, una reducción de la densidad de 1.429 árboles ha⁻¹ a 909 árboles ha⁻¹, no determinó diferencias en el desarrollo individual del árbol, pero si determinó pérdidas en la biomasa acumulada y C fijado por hectárea. Por lo tanto, la densidad de 1.429 árboles ha⁻¹ optimizó el desarrollo individual y la fijación de C por hectárea, siendo en un principio, la densidad de plantación que más alternativas de uso ofrece al poder ser utilizada tanto como biomasa como para aserrado. No obstante, es necesario analizar otras características con respecto al desarrollo individual, como ser las propiedades mecánicas de la madera, contenido de lignina, entre otras, con el fin de determinar los posibles usos forestales de los productos obtenidos. Considerar la multifuncionalidad o multipropósito de las plantaciones forestales, permitiría desarrollar una estrategia de plantación para diversos productos forestales que a su vez cumpla con la provisión de servicios ecosistémicos como la fijación de C, regulación del ciclo del agua y el clima, entre otras (Fernández y Gyenge, 2016).

Si bien, las plantaciones forestales actúan como sumideros de C, estas contribuyen de forma diferencial a la mitigación del cambio climático, ya que tienen diferentes objetivos y destinos de producción. Las 3 densidades de plantación podrían ser destinadas para la generación de energía por sus altos valores de productividad en un corto periodo (50 meses), contribuyendo a la sustitución o reducción del uso de combustibles fósiles. De igual forma, los tratamientos MD y BD, podrían ser destinados a la producción de celulosa y madera sólida, por el buen crecimiento individual, por lo que también contribuyen a la mitigación del cambio climático ya que gran parte del C permanece almacenado por años en los productos forestales (Ipinza Carmona y Barros Asenjo, 2011).

El impulso a la generación de energías renovables, en particular a partir de la biomasa forestal, es una oportunidad para la provincia de Corrientes, la cual cuenta con el recurso y las condiciones climáticas favorables. Sin embargo, existen

diversos interrogantes sobre estos sistemas intensivos de producción respecto del turno de cosecha, método de cosecha, tratamientos silvícolas óptimos bajo condiciones edafoclimáticas específicas, consumo de agua y nutrientes, costos ambientales ocultos, entre otros (Fernández y Lupi, 2017). Los resultados preliminares aquí presentados deberán ser acompañados de estudios que permitan contextualizar la temporalidad de estos sistemas dendroenergéticos, particularmente con *Eucalyptus* sp. en estos ambientes marginales de la provincia de Corrientes con el objetivo de iniciar la discusión sobre su conveniencia o no, dadas las implicancias desde el punto de vista ambiental y social.

3.5. Conclusiones

Los clones 2136 y X78 evaluados a los 24 meses de edad evidenciaron diferencias significativas para el crecimiento en altura, no así en DAP y volumen. La densidad de la madera resultó superior en el clon X78, el clon híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*. A su vez, este clon presentó una superioridad en biomasa total a los 24 meses, principalmente producto de la biomasa de fuste. Esto sugiere que, bajo los supuestos de una silvicultura clonal intensiva, la elección correcta del material genético podría traducirse en incrementos significativos para la producción de biomasa forestal con fines dendroenergéticos.

Los esquemas de manejo de muy alta densidad de *Salix* sp. y *Populus* sp. en el Delta del Paraná, se muestran competitivos en términos de productividad. Sin embargo, dado que las industrias de producción de energía se encuentran en la provincia de Corrientes, el complejo *Eucalyptus* sp. parece por ahora ser la mejor elección para estos suelos de baja fertilidad natural de lomas y planicies arenosas. El alto grado de mejora genética logra altas tasas de productividad.

La producción de biomasa aérea por hectárea del clon *E. grandis* no es influida por la densidad a los 50 meses de realizada la plantación. Las tres densidades de plantación podrían ser utilizadas con fines energéticos por sus altas productividades.

El contexto de cambio climático plantea grandes desafíos para la silvicultura de plantaciones con especies de rápido crecimiento. Es relevante considerar, no solo la productividad, sino además la capacidad de resiliencia de los sistemas al clima y los mercados. En este sentido, el tratamiento de 1.429 árboles ha⁻¹, optimizó el crecimiento a nivel individual y la biomasa acumulada por hectárea, siendo este compatible en un principio para la producción de biomasa, celulosa y madera sólida. De los tres esquemas de manejo, es el más relevante, al considerar la multifuncionalidad o multipropósito de las plantaciones forestales, permitiendo la obtención de diferentes productos forestales.

3.6. Bibliografía

Acuña, E., Cancino, J., Rubilar, R. y Sandoval, S. (2018). Aboveground biomass growth and yield of fir's rotation cutting cycle of *Acacia* and *Eucalyptus* short rotation dendroenergy crops. *Revista Árvore*, 41(6), e410608. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000600008>

Amichev, B.Y., Hangs, R.D., Konecsni, S.M., Stadnyk, C.N., Volk, T.A., Bélanger, N., Vujanovic, V., Schoenau, J.J., Moukoui, J., Van Rees, K y Van Rees, K.C. (2014). Willow short-rotation production systems in Canada and Northern United States: a review. *Soil Science Society of America Journal*, 78(S1), S168-S182.

Aparicio, J.L., Larocca, F. y Dalla Tea, F. (2005). Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*. *Idia XXI: Revista de información sobre investigación y desarrollo agropecuario*, 5(8), 66-69.

Aparicio, J.L., Dalla Tea, F. y Spriegel, M. (2007). *Respuesta de Eucalyptus grandis a diferentes técnicas de preparación del terreno en un suelo malezal del sudeste de Corrientes*. XXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Aparicio, J.L. (2011). *Efecto del manejo de residuos de cosecha de Pinus elliottii en el costo oculto de nutrientes y en el crecimiento de pino híbrido en un suelo arenoso*

de Corrientes. XXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Aparicio, J.L. (2012). *Comportamiento de clones de Eucalyptus grandis en relación a un material de semilla en un suelo arenoso de Corrientes*. XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Aparicio, J.L., Maggio, A. y Fragueiro, L. (2018). *Control de malezas de Eucalyptus grandis: Respuestas a diferentes anchos de control*. XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Aparicio, J.L. y Maggio, A. (2018). *Respuesta a la fertilización con NPK en 5 clones de Eucalyptus grandis en planicies arenosas de Corrientes*. XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Arias Aguilar, D. y Guevara, M. (2017). *Establecimiento, manejo y aprovechamiento de plantaciones dendroenergéticas*. Universidad nacional de ciencias forestales. Honduras. Informe técnico. 72 pp.

Baettig, R., Yáñez, M. y Albornoz, M. (2010). Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. *Bosque*, 31(2), 89-99. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000200002>

Barth, S.R. (2016). *Efectos de la densidad de plantación sobre la biomasa aérea y las propiedades físico-mecánicas de la madera de Grevillea robusta A. Cunningham*. [Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba].

Bastin, J.F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C.M. y Crowther, T.W. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365, 76-79. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aax0848>

Bentancor, J., Hernández, J., del Pino, A., Califra, A., Resquín, F. y González-Barrios, P. (2019). Evaluation of the biomass production energy yield and nutrient removal of *Eucalyptus dunnii* Maiden grown in short rotation coppice under two initial

planting densities and harvest system. *Biomass and Bioenergy*, 122, 165-174.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.019>

Bentsen, N.S. y Felby, C. (2012). Biomass for energy in the European Union - a review of bioenergy resource assessments. *Biotechnol Biofuels*, 5, 25.
<https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-25>

Bester energy, (2024). Plantas de biomasa más grandes del mundo. Recuperado el 22 de agosto de 2024 de <https://bester.energy/plantas-biomasa-mas-grandes-del-mundo/#:~:text=%C2%BFD%C3%B3nde%20se%20encuentran%20las%20plantas%20de%20plantas%20de%20biomasa>

Bettters, D.R., Wright, L.L. y Couto, L. (1991). Short rotation woody crop plantations in Brazil and the United States. *Biomass and Bioenergy*, 1(6), 305-316.

Binkley, D., Campoe, O., Alvares, C., Carneiro, R., Cegatta, I. y Stape J.L. (2017). The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 405: 271-283.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>

Cabrera, A.M., Tozzini, C., Espinoza, S., Santelices, R. y Meza, F. (2016). Biomass production and carbon balance of a short rotation forestry of *Populus deltoides* (clone Lux) under two different cutting cycles. *Revista Bosque*, 37(1), 205-210.

Cailliez, F. (1980). *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Vol. 1 - estimación del volumen*. Estudio FAO 22/1.

Cámara de Comercio de Cali (CCC). (2017). Centrales eléctricas en el mundo a partir de biomasa. Informe RC N12. Recuperado 10 de agosto de 2024 de <https://www.ccc.org.co/file/2017/09/Informe-RC-N12-Centrales-electricas-a-partir-de-biomasa.pdf>

Caniza, F. (2016). Silvicultura en la Mesopotamia Argentina. Revista Chacra. Recuperado el 20 de enero de 2023 de <https://www.revistachacra.com.ar/nota/silvicultura-en-la-mesopotamia-argentina/>

Caniza, F.J., García, M., Aparicio, J.L., De la Peña, C., Mastrandrea, C., Flores Palenzona, M., Barrios, M. y Martínez, M. (2018). *Avances del INTA en la silvicultura clonal de Eucalyptus grandis en la Mesopotamia argentina*. XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Casado Alcaide, J.A. (2013). Sistemas de aprovechamiento de cultivos energéticos lignocelulósicos: aplicaciones en Uruguay. Recuperado el 10 de diciembre de 2022 de http://www.inia.org.uy/online/files/contenidos/link_25042013124908.pdf

Civitaresse, V., Faugno, S., Picchio, R., Assirelli, A., Sperandio, G., Saulino, L., Crimaldi, M. y Sannino, M. (2018). Production of selected short-rotation wood crop species and quality of obtained biomass. *European Journal of Forest Research*, 137, 541-552.

Costanza, J.K., Abt, R.C., McKerrow, A.J. y Collazo, J.A. (2017). Bioenergy production and forest landscape change in the southeastern United States. *Gcb Bioenergy*, 9(5), 924-939.

Djomo, S. N., Ac, A., Zenone, T., De Groote, T., Bergante, S., Facciotto, G., Sixto, H., Ciria Ciria, P., Weger, J. y Ceulemans, R. (2015). Energy performances of intensive and extensive short rotation cropping systems for woody biomass production in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 845-854.

Don, A., Osborne, B., Hastings, A., Skiba, U., Carter, M. S., Drewer, J., Flessa, H., Freibauer, A., Hyvonen, N., Jones, M., Laningan, G., Mander, U. y Zenone, T. (2012). Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. *Gcb Bioenergy*, 4(4), 372-391.

Favero, A. y Massetti, E. (2014). Trade of woody biomass for electricity generation under climate mitigation policy. *Resource and Energy Economics*, 36(1), 166-190.

Fernández, M.E. y Gyenge, J. (2016). Árboles y agua: una relación recíproca que tenemos que conocer para orientar el manejo forestal sustentable. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado el 19 de julio de 2021 de http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_arboles_y_agua_2016.pdf

Fernández, R. y Lupi, A.M. (2016). *Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en Argentina*. Ediciones INTA.

Fernández, R. y Lupi, A.M. (2017). *Plantaciones con fines energéticos: Consideraciones tecnológicas y ambientales frente a su implementación*. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Ferreira, M.C., Santos, R.C.D., Castro, R.V.O., Carneiro, A.D.C.O., Silva, G.G.C.D., Castro, A.F.N.M., Costas, F.L. y Pimenta, A.S. (2017). Biomass and energy production at short rotation *Eucalyptus* clonal plantations deployed in Rio Grande do Norte. *Revista Árvore*, 41(5), e410504. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000500004>

Ferrere, P., López, G.A., Boca, R.T., Galetti, M.A., Esparrach, C.A. y Pathauer, P.S. (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(2), 174-184.

Ferrere, P., Lupi, A.M., Boca, R., Nakama, V. y Alfieri, A. (2008). Biomasa en plantaciones de *Eucalyptus viminalis* Labill en la provincia de Buenos Aires. *Ciência Florestal*, 18(3), 291-305. <https://doi.org/10.5902/19805098440>

Ferrere, P. y Lupi, A.M. (2023). How much carbon do Argentine Pampas *Pinus radiata* plantations store? *Forest Systems*, 32(1), e005. <https://doi.org/10.5424/fs/2023321-19703>

García, M.A., Keller, A. y Caniza, F. (2021). Espaciamientos para plantar eucaliptos en la Mesopotamia. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. ISSN 2545-7195.

Griffin, A.R. (2014). Clones or improved seedlings of Eucalyptus? Not a simple choice. *International Forestry Review*, 16(2), 216-224.

Guerra, S.P., Garcia, E.A., Lancas, K.P., Rezende, M.A. y Spinelli, R. (2014). Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. *Fuel*, 137, 360-368.

Goya, J., Frangi, J., Dalla Tea, F., Marco, M. y, Larocca, F. (1997). Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el NE de la provincia de Entre Ríos. XII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Hauk, S., Knoke, T. y Wittkopf, S. (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 435-448.

IEA Bioenergy. (2021). *IEA Bioenergy Countries' Report – update 2021 Implementation of bioenergy in the IEA Bioenergy member countries*. Informe técnico. 28 pp.

INTA-SAGyP. (1995). *Manual para productores de eucaliptos de la Mesopotamia Argentina*. Ediciones INTA.

IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático). (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volumen 4 Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Informe técnico.

Ipinza, R. y Barros, S. (2011). *El Cambio Climático, los Bosques y la Silvicultura*. Instituto forestal Chile. Informe técnico. 145 pp.

IRENA. (2017). Argentina Renewable Energy Auctions - RenovAr Program (Round 1). Recuperado el 22 de agosto de 2024 de <https://www.iea.org/policies/6130-argentina-renewable-energy-auctions-renovar-program-round-1>

Junior, H.J.E., de Melo, R.X., Sartori, M.M.P., Guerra, S.P.S. y Ballarin, A.W. (2016). Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 90, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.037>

Kolmogorov, A.N. (1933). "Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione." *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari*, 4, 83-912.

Kruskal, W.H., y Wallis, W.A. (1952). "Use of ranks in one-criterion variance analysis." *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-6215.

Lincoln, F.C. (1930). Calculating and marking avian population trends. *Bird-Banding*, 1(3), 173-179.

López, J., López, J.A., Hernández, M. y Genes, P. (2010). *Análisis de 10 clones de Eucalyptus grandis en el Establecimiento Aguaí (Las Marías). Forma del fuste, densidad de la madera y tensiones de crecimiento*. Reunión No 184 Consorcio Forestal Corrientes Norte. Las Marías, Corrientes, Argentina.

López, A.J. y López, J.A. (2011). *Eucalyptus grandis en el sudeste de Corrientes: Variación de densidad de la madera*. XXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

López, A.J. (2016). *Producción de leña renovable de Eucalyptus sp. para pequeños productores rurales*. Reunión N° 62 Consorcio Forestal Corrientes Centro, N° 238 Consorcio Forestal Corrientes Norte y N° 71 Consorcio Forestal Río Uruguay. EEA INTA Bella Vista, Corrientes, Argentina.

López Reyes, L.Y., Domínguez Domínguez, M., Martínez Zurimendi, P., Zavala Cruz, J., Gómez Guerrero, A. y Posada Cruz, S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera Bosques*, 22(3), 49-60.

López, J.A. (2017). *Variación genética de propiedades físicas y organolépticas de importancia para usos sólidos de alto valor de clones híbridos de Eucalyptus en*

Entre Ríos. XXI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Lupi, A.M., Ferrere, P. y Restovich, S.B. (2023). *Contribución de las plantaciones forestales a las reservas orgánicas de carbono y nitrógeno en el suelo*. Actas del VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino. Mendoza, Argentina.

Magalhães, M.A., de Cássia Oliveira Carneiro, A., Rocha Vital, B., Simões da Silva, C.M., Moura de Souza, M. y de Freitas Fialho, L. (2016). Estimates of mass and energy of different genetic material eucalyptus. *Revista Árvore*, 41(3), e410302. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000300002>

Manolis, E.N., Zagas, T.D., Karetos, G.K. y Poravou, C.A. (2019). Ecological restrictions in forest biomass extraction for a sustainable renewable energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110: 290-297. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.078>

Marco, L., Goldstein, E., y Griffa, B. (2018). *Generación de energía eléctrica a partir de biomasa, experiencias y actualidad en Argentina*. Escuela de Economía y Negocios. Universidad Nacional de San Martín. Publicación técnica. 19 pp.

Marcó, M.A. y Harrant, L. (2005). *Valor potencial de los eucaliptos colorados en combinaciones híbridas*. I Jornada sobre potencialidad foresto-industrial del eucalipto en Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina.

Martiarena, R., Frangi, J., Pinazo, M., Von Wallis, A. y Fernández, R. (2011). Effect of thinning and harvest type on storage and losses of Phosphorous in *Pinus taeda* L. plantations in Subtropical Argentina. *International Journal of Forestry Research*, 761532. <https://doi.org/10.1155/2011/761532>

Martiarena, R. (2016). *Efecto de la disponibilidad de recursos sobre la eficiencia de uso y conservación de los nutrientes en función de las condiciones edafoclimáticas*,

edad y manejo de las plantaciones de Pinus taeda L. en la Mesopotamia Argentina.
[Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata].

Mather-Gratton, Z.J., Larsen, S. y Bentsen, N.S. (2021). Understanding the sustainability debate on forest biomass for energy in Europe: A discourse analysis. *PLoS ONE*, 16(2), e0246873. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246873>

Montero, G., Ruiz-Peinado, R. y Muñoz, M. (2005). Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Madrid: *INIA - Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria*, 13.

Moya, R., Tenorio, C. y Oporto, G. (2019). Short rotation wood crops in Latin American: A review on status and potential uses as biofuel. *Energies*, 12(4), 705.

Oliveira-Carneiro, A., Mendes-Castro, A.N., Oliveira-Castro, R., Cavalcante dos Santos, R., Papaspyrou-Ferreira, L., Pereira-Damáσιο, R. y Rocha-Vital, B. (2014). Potencial energético de la madera de *Eucalyptus* sp. en función de la edad y de diferentes materiales genéticos. *Revista Árvore*, 38(2), 375-381.

Oliveira Lafetá, B., Campos Santana, R., Saraiva Nogueira, G., Andrade Penido, TM. y Couto, L. (2012). Area foliar específica y e clorofila em eucalipto estimadas por redes neurais artificiais. *Biomassa & Energia*, 5(1), 67-75.

Patiño-Díez, J.F. y Smith-Quintero, R. (2008). Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico. *Energética*, 39: 19-34.

Pérez López, C. (2019). *Productividad de plantaciones de turno corto de Salix spp. en Galicia.* (Tesis de Maestría, Universidad de Santiago de Compostela).

R Core Team. (2019). *R: a language and environment for statistical computing.* R foundation for statistical computing, Vienna, Austria.

Resquín, F., Rachid, C., Hirigoyen, A., Doldán, J., Lopretti, M., Bonifacino, S., Buxedas, L., Vázquez, S., Sapolinski, A., Gonzalez, M., Carrasco-Letelier, L. y

Capdevielle, F. (2015). Producción de biomasa y etanol a partir de *Eucalyptus* en plantaciones de alta densidad. *Revista INIA*, 41, 35-38.

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R.M., Rachid-Casnati, C., Hirigoyen, A., Carrasco-Letelier, L. y Duque-Lazo, J. (2018). Allometry, Growth and Survival of Three *Eucalyptus* Species (*Eucalyptus benthamii* Maiden and Cabbage, *E. dunnii* Maiden and *E. grandis* Hill ex Maiden) in High-Density Plantations in Uruguay. *Bosques*, 9 (12).

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R., Carrasco-Letelier, L. y Raschid, C. (2019). Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 438, 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.007>

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R.M., Carrasco-Letelier, L., Casnati, C.R. y Bentancor, L. (2020). Evaluation of nutrient content in biomass of *Eucalyptus* species from short rotation plantations in Uruguay. *Biomass and Bioenergy*, 134. 105502.

Resquín, F., Bentancor, L., Carrasco-Letelier, L., Rachid-Casnati, C. y Navarro-Cerrillo, R.M. (2022). Rotation length of intensive *Eucalyptus* plantations: How it impacts on productive and energy sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 166, 106607.

Reuter, D.J., Robinson, J.B., Peverill, K.I., Price, G.H. y Lambert, M.J. (1997). *Guidelines for collecting, handling and analysing plant materials*. En D.J. Reuter, & J. B. Robinson (Eds.), *Plant analysis: An interpretation manual*, CSIRO Publishing.

Sanchez Acosta, M. (2006). Productos sólidos a partir de madera de eucaliptos cultivados. *Boletín Informativo CIDEU*, (2), 103-117.

Schumacher, F.X. y Halm, F.S. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47(9), 719-734.

Secretaría de Energía. (2019). *Balances energéticos nacionales*. Recuperado el 12 de marzo de 2020 de <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>

Smirnov, N.V. (1948). "Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions." *Annals of Mathematical Statistics*, 19, 279-2812.

Snowdon, P., Raison, J., Keith, H., Ritson, P., Grierson, P., Adams, M., Montagu, K., Bi, H., Burrows, W. y Eamus, D. (2002). *Protocol for sampling tree and stand biomass. Technical report N° 31*. National Carbon Accounting System. Australian Greenhouse Office. Commonwealth of Australia.

Spatari, S., Bagley, D. y Mac Lean, H.L. (2010). Life cycle evaluation of emerging lignocellulosic ethanol conversion technologies. *Bioresource technology*, 101, 654-667. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.067>

TAPPI T258om. (1994). *Basic density and moisture content of pulpwood*. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Atlanta, Estados Unidos.

Thomaz, D.T., Magalhães, W.L.E., de Lima, E.A. y da Silva, H.D. (2007). *Poder calorífico da madeira e do carvão vegetal: lignina e carbono fixo como determinantes*. VI Evento de Iniciação Científica da Embrapa Florestas. Brasil.

Trossero, M., Drigo, R., Anschau, A., Carballo, S. y Marco, N.F. (2009). *Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina*. Buenos Aires, Argentina. FAO Departamento Forestal Dendroenergía - Wisdom Argentina-INTA. Publicación técnica.

Tukey, J.W. (1949). "Comparing individual means in the analysis of variance." *Biometrics*, 5(2), 99-1144.

Vasconi, P. (2008). *Chile y el Calentamiento Global: Una mirada desde la política pública*. Santiago, Terram Publicaciones.

Vieira Rocha, M.F. (2011). *Influencia del espaciamiento y la edad en la productividad y propiedades de la madera del Eucalyptus grandis x Eucalyptus camaldulensis para energía*. [Tesis de maestría, Universidad Federal de Vicosa].

Villalba, R. (2019). *Glaciares y cambio climático*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Publicación técnica.

Volpe, M.A., Frechero, M., Casoni, A.I., Gauchat, M.E., Fassola, H.E., Lupi, A.M. y Acevedo, A. (2022). *Análisis de pre-factibilidad para desarrollar un proceso de conversión de residuos de madera de pino*. Instituto de Suelos, INTA. Informe técnico.

Welch, B.L. (1947). "The generalization of 'Student's' problem when several different population variances are involved". *Biometrika*, 34(1/2), 28–35

Young, F. y Steffen, P. (2008). Biocombustibles como estrategia de desarrollo: ¿Rumbo hacia la sustentabilidad o hacia una nueva periferia? *Revista POLIS*, 7 (21), 167-177. <https://doi.org/10.4067/s0718-65682008000200009>

Zamora, D.S., Apostol, K.G., Berguson, W.E., Volk, T.A., Wright, J. y Ogdahl, E.J. (2015). Short rotation woody crops biomass production. *Biomass and biofuels: advanced biorefineries for sustainable production and distribution*, 2, 49-76.

Zhang, C., Nie, J., y Yan, X. (2023). Estimation of biomass utilization potential in China and the impact on carbon peaking. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 94255–94275.

CAPITULO 4. Exportación de nutrientes de la biomasa forestal al momento del aprovechamiento en diferentes densidades de plantación con fines energéticos del clon *Eucalyptus grandis*

4.1. Introducción

Las plantaciones forestales con fines energéticos constituyen una de las estrategias utilizadas a nivel mundial, con el fin de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles (Ipinza y Barros, 2011; Fernández y Lupi, 2016; López Reyes et al., 2016; Resquín et al., 2022). Las mismas configuran un modelo intensivo de uso del suelo y el paisaje (Fernández y Lupi, 2017). La intensificación de la producción de estos sistemas se ha producido mediante la reducción de la rotación, el uso de material genético de alta productividad y la adopción de manejos silvícolas que maximizan la productividad de biomasa (Junior et al, 2016; Arias Aguilar y Guevara, 2017; Resquín et al., 2020). Surgen interrogantes sobre la sostenibilidad a largo plazo, ya que, en general, las plantaciones forestales se han establecido en suelos marginales para la agricultura (baja fertilidad natural, susceptibles a la degradación, entre otras limitantes) (Larocca et al., 2004; Aparicio et al., 2005).

Uno de los objetivos del manejo forestal sustentable es el mantenimiento de la capacidad productiva de los sitios (Goya et al., 1997; Fernández, 2002). La remoción de nutrientes depende de las características del suelo, de la edad de la plantación a la cual se realiza la cosecha (Goya et al., 1997, Rodríguez-Soalleiro et al., 2018) y del sistema de aprovechamiento adoptado (Goya et al., 2009; Frangi et al., 2016; Resquín et al., 2020). La evaluación de la disponibilidad de estos elementos permite planificar el establecimiento de próximas forestaciones, el manejo silvícola más apropiado (Martiarena, 2016), como así también escoger un sistema adecuado de aprovechamiento forestal en beneficio de mantener la productividad del sitio (Viera et al., 2011; Scott et al., 2016).

El objetivo de este capítulo fue evaluar la exportación de nutrientes de la biomasa forestal al momento del aprovechamiento en diferentes densidades de plantación con fines energéticos del clon *E. grandis*.

4.2. Materiales y Métodos

En este capítulo se presentan los resultados del contenido de nutrientes del suelo y de la biomasa aérea, y la exportación de nutrientes bajo diferentes sistemas de aprovechamiento evaluados a los 50 meses de edad de los tratamientos de 3.333 árboles ha⁻¹ (AD), 1.429 árboles ha⁻¹ (MD) y 909 árboles ha⁻¹ (BD) del clon *E. grandis* 2136 (Figura 1).



Figura 1. Plantación del clon *E. grandis* 2136 con densidades iniciales de plantación de 3.333 árboles ha⁻¹ (AD), 1.429 árboles ha⁻¹ (MD) y 909 árboles ha⁻¹ (BD). Foto: A. Maggio.

A los 50 meses de edad de la plantación, se tomaron seis muestras aleatorias de suelo compuestas (5 submuestras) en cada tratamiento a distintas profundidades (0-10 cm y 10-30 cm). Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Suelo, Agua y Vegetales de la Estación Experimental Agropecuaria Corrientes del INTA para su análisis químico, en el cual se determinó las concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Carbono Orgánico (CO) y Materia Orgánica (MO) según las normas IRAM-SAGPyA (2020). La concentración de nitrógeno es un valor teórico, donde el nitrógeno se considera el 5% de la materia orgánica (Kurtz, 2018). Los cationes intercambiables se realizaron por el método de extracción con acetato de amonio a pH: 7 y en el extracto obtenido se determinaron las concentraciones de P mediante el método Bray y Kurtz I, la concentración de K por fotometría de llama y las concentraciones de Ca y Mg mediante complejometría por EDTA. El CO se determinó por el método de Walkey y Black. La MO es un valor teórico, se obtiene utilizando el factor de Van Bemmelen (1,724). Se basa en la aceptación de que la materia orgánica contiene 58% de carbono orgánico (Kurtz, 2018).

Se determinó el peso seco del suelo de cada profundidad por hectárea según la siguiente expresión:

$$PSSj = DA \times VS$$

Dónde:

PSSj = Peso seco del suelo de la profundidad j (Mg ha^{-1});

DA= Densidad aparente de la profundidad j (Mg m^{-3}) (calculada en el Capítulo 5);

VS = Volumen del suelo de la profundidad j por ha ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

La determinación del contenido de nutrientes en cada profundidad por hectárea se obtuvo según la siguiente expresión (Aparicio, 2001; Resquín et al., 2020):

$$Qij = PSSj \times Ci$$

Dónde:

Qij = Contenido del nutriente i de la profundidad j (g ha^{-1});

PSSj = Peso seco del suelo de la profundidad j (kg ha^{-1});

C_i = concentración promedio del nutriente i de la profundidad j (g kg^{-1})

La cantidad de nutrientes en toda la profundidad del suelo analizada (0-30 cm) se obtuvo mediante la sumatoria del contenido de nutrientes de la profundidad 0-10 cm y 10-30 cm.

Al momento de la determinación de la biomasa aérea a los 50 meses de edad (ver Capítulo 3), se recolectaron seis muestras por tratamiento de cada compartimento del árbol (hojas, ramas, fuste y corteza). Las mismas se secaron en estufa a $63\text{ }^\circ\text{C}$, se molieron con molinillo Wiley (Figura 2) y fueron enviadas al Laboratorio de Suelo, Agua y Vegetales de la Estación Experimental Agropecuaria Corrientes del INTA para su análisis químico, en el cual se determinó las concentraciones de N, P, K y Ca (Da Silva, 2009). El contenido de N se determinó por el método Kjeldahl. El contenido de P se determinó mediante el método espectrofotometría con azul-de-molibdeno. El K y Ca se determinaron mediante el método espectrofotometría con absorción atómica.



Figura 2. Molienda de muestras de biomasa para determinación de contenido de nutrientes. Foto: A. Maggio.

La determinación del contenido de nutrientes de cada compartimento se obtuvo mediante la siguiente expresión (Goya et al., 1997; Aparicio, 2001; Goya et al., 2009; Resquín et al., 2020):

$$Q_{ij} = PS_j \times C_i$$

Dónde:

Q_{ij} = Contenido del nutriente i en el compartimento j (g ha^{-1});

PS_j = Peso seco del compartimento j (kg ha^{-1});

C_i = concentración promedio del nutriente i en compartimento j (g kg^{-1})

La determinación del contenido de nutrientes exportado en cada sistema de aprovechamiento (árbol completo, fuste con corteza, fuste sin corteza) por tratamiento se obtuvo mediante la sumatoria de los contenidos de nutrientes totales de cada compartimento involucrado en cada tratamiento.

Las variables estudiadas se sometieron a un análisis de homocedasticidad mediante la prueba de Bartlett (Bartlett, 1937) y se aplicó la prueba de Kolmogorov Smirnov (Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1948) para verificar su normalidad. Un análisis de la varianza (ANOVA) seguido de diferentes pruebas *post-hoc* (dependiendo de la distribución de los datos) fue realizado para establecer diferencias significativas entre tratamientos para las variables precedentemente indicadas. El nivel de significancia se fijó en $p < 0,05$. Todos los análisis se realizaron utilizando el software R Core Team, 4.0.3. (R Core Team, 2019).

4.3. Resultados

En la tabla 1 se presentan las principales variables dendrométricas evaluadas a los 50 meses en el Capítulo 3. Se determinaron diferencias significativas para las variables DAP y H entre el tratamiento AD respecto a MD y BD. El volumen por hectárea no registró diferencias significativas entre tratamientos ($p=0,0663$), aunque AD registró mayor productividad, representando un valor superior en 12,2 % y 31,8

% respecto a MD y BD. La biomasa acumulada por hectárea de hojas, corteza, fuste y total se incrementó al aumentar la densidad de plantación, aunque no se diferenciaron significativamente.

Tabla 1. Valores medios y desvío estándar del Diámetro a la altura del pecho (DAP), altura (H), volumen con y sin corteza (volumen c/c y s/c) y biomasa de hojas, ramas, fuste y total) evaluados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) del clon *E. grandis* a los 50 meses de edad. Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

Variables	Unidades	AD	MD	BD	p-valor
		Media \pm de	Media \pm de	Media \pm de	
DAP	cm	10,3 \pm 3 a	16,3 \pm 2,6 b	16,3 \pm 2,1 b	<0,0001
H	m	15,7 \pm 3 a	19,2 \pm 1,3 b	18,8 \pm 1,1 b	<0,0001
Supervivencia	%	85 \pm 22 a	70 \pm 14 a	86 \pm 16 a	0,4175
Volumen c/c	m ³ ha ⁻¹	203,8 \pm 22,4 a	178,9 \pm 29,6 a	138,8 \pm 28,4 a	0,0663
Volumen s/c	m ³ ha ⁻¹	178,5 \pm 19,9 a	158,9 \pm 26,5 a	122,1 \pm 25,1 a	0,0702
Biomasa hojas	Mg ha ⁻¹	7,2 \pm 0,6 a	6,9 \pm 1,1 a	6,1 \pm 1,2 a	0,3980
Biomasa ramas	Mg ha ⁻¹	6,5 \pm 0,6 a	7,8 \pm 1,2 a	6,8 \pm 1,4 a	0,4911
Biomasa fuste	Mg ha ⁻¹	77,7 \pm 9,5 a	71,6 \pm 11,8 a	55,3 \pm 11,3 a	0,1020
Biomasa corteza	Mg ha ⁻¹	11,0 \pm 1,3 a	8,9 \pm 1,5 a	7,6 \pm 1,5 a	0,0722
Biomasa total	Mg ha ⁻¹	100,5 \pm 11,1 a	95,1 \pm 15,5 a	76,1 \pm 15,5 a	0,1680

de= desvío estándar

El contenido (kg ha⁻¹) y las concentraciones (% , ppm) de nutrientes, materia y carbono orgánicos del suelo (Tabla 2) no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, a excepción del Ca en los primeros 10 cm de profundidad, siendo el tratamiento BD donde se registró las mayores concentraciones, y del Mg en la profundidad de 10 a 30 cm, donde se registró las mayores concentraciones en AD. A su vez, en los primeros 10 cm de profundidad se determinaron las mayores concentraciones de nutrientes, materia y carbono orgánicos en todos los tratamientos.

Tabla 2. Concentración (% , ppm) y contenido de nutrientes del suelo (kg ha^{-1}) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD). Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

N	P (cm)	U	AD	MD	BD	p-valor
			Media \pm de	Media \pm de	Media \pm de	
N	0 - 10	%	0,034 \pm 0,011 a	0,045 \pm 0,007 a	0,036 \pm 0,011 a	0,4170
	10 - 30	%	0,020 \pm 0,004 a	0,025 \pm 0,001 a	0,017 \pm 0,001 a	0,0549
	0 - 30	kg ha^{-1}	1.087,98 \pm 296,56 a	1.364,5 \pm 6,48 a	1.041,5 \pm 192,79 a	0,2010
Ca	0 - 10	%	1,333 \pm 0,305 a	2,666 \pm 0,305 ab	3,133 \pm 0,945 b	0,0249
	10 - 30	%	2,133 \pm 1,628 a	2,566 \pm 0,602 a	2,600 \pm 0,400 a	0,8300
	0 - 30	kg ha^{-1}	1.667,7 \pm 914,9 a	2.259,6 \pm 338,4 a	2.456 \pm 471,77 a	0,3420
Mg	0 - 10	%	4 \pm 0,871 a	2,4 \pm 0,600 a	2,8 \pm 0,871 a	0,1070
	10 - 30	%	3,333 \pm 0,577 a	2,166 \pm 0,551 ab	1,733 \pm 0,503 b	0,0276
	0 - 30	kg ha^{-1}	1.898,89 \pm 302,23 a	1.177,97 \pm 285,62 ab	1.109,32 \pm 320,79 b	0,0342
K	0 - 10	%	0,058 \pm 0,013 a	0,070 \pm 0,004 a	0,063 \pm 0,018 a	0,6130
	10 - 30	%	0,044 \pm 0,007 a	0,0489 \pm 0,016 a	0,0398 \pm 0,005 a	0,6370
	0 - 30	kg ha^{-1}	84,79 \pm 14,02 a	94,01 \pm 21,87 a	81,73 \pm 12,40 a	0,6610
P	0 - 10	ppm	2,983 \pm 1,205 a	4,556 \pm 1,115 a	6,893 \pm 4,880 a	0,3360
	10 - 30	ppm	1,293 \pm 0,358 a	2,646 \pm 0,092 a	4,356 \pm 4,809 a	0,4510
	0 - 30	kg ha^{-1}	8,07 \pm 2,56 a	14,05 \pm 1,38 a	22,84 \pm 20,66 a	0,3810
MO	0 - 10	%	0,683 \pm 0,232 a	0,916 \pm 0,158 a	0,733 \pm 0,232 a	0,4170
	10 - 30	%	0,403 \pm 0,096 a	0,500 \pm 0,026 a	0,350 \pm 0,026 a	0,0549
CO	0 - 10	%	0,396 \pm 0,135 a	0,531 \pm 0,092 a	0,425 \pm 0,135 a	0,4170
	10 - 30	%	0,233 \pm 0,055 a	0,290 \pm 0,015 a	0,203 \pm 0,015 a	0,0549

de= desvío estándar; N= Nutrientes; P= Profundidad; U= Unidades

Las concentraciones de nutrientes (g kg^{-1}) de la biomasa aérea indican que en la copa (hojas y ramas) se encuentran las mayores concentraciones de nutrientes del árbol, mientras que en el fuste las menores concentraciones. El Ca es el nutriente de mayor concentración en todos los compartimentos del árbol y el P el de menor concentración (Tabla 3). La mayor concentración de los nutrientes N, P y K (excepto el K en AD) se registran en las hojas, y del Ca en la corteza (Figura 3).

Tabla 3. Concentración de nutrientes (g kg^{-1}) de los compartimentos de la biomasa de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD). Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

Nutriente	Biomasa	AD	MD	BD	p-valor
		Media \pm de	Media \pm de	Media \pm de	
N	Hojas	7,35 \pm 0,81 a	6,49 \pm 0,89 b	7,20 \pm 0,68 a	0,0043
	Ramas	0,94 \pm 0,29 a	1,23 \pm 0,33 b	1,09 \pm 0,28 ab	0,0238
	Fuste	0,50 \pm 0,20 a	0,82 \pm 0,54 a	0,78 \pm 0,57 a	0,4540
	Corteza	3,33 \pm 0,48 a	1,88 \pm 0,85 b	1,43 \pm 0,27 b	<0,0001
Ca	Hojas	14,03 \pm 3,89 a	14,07 \pm 2,69 a	16,47 \pm 5,04 a	0,1190

Nutriente	Biomasa	AD	MD	BD	p-valor
		Media ± de	Media ± de	Media ± de	
	Ramas	10,01 ± 4,53 a	15,63 ± 5,29 b	19,92 ± 6,46 b	<0,0001
	Fuste	1,96 ± 0,66 a	2,00 ± 0,00 a	2,00 ± 0,00 a	0,1240
	Corteza	26,98 ± 8,02 a	27,65 ± 3,75 a	30,99 ± 5,23 a	0,4740
P	Hojas	0,54 ± 0,35 ab	0,40 ± 0,49 b	0,95 ± 0,56 a	0,0138
	Ramas	0,29 ± 0,25 a	0,12 ± 0,18 b	0,06 ± 0,01 b	0,0011
	Fuste	0,05 ± 0,01 a	0,05 ± 0,01 a	0,06 ± 0,01 a	0,2840
	Corteza	0,06 ± 0,01 a	0,08 ± 0,04 a	0,15 ± 0,02 b	<0,0001
K	Hojas	2,47 ± 0,67 a	6,41 ± 2,93 b	8,90 ± 2,14 c	<0,0001
	Ramas	4,09 ± 0,60 a	4,12 ± 0,66 a	3,61 ± 1,14 a	0,3690
	Fuste	0,39 ± 0,06 a	0,40 ± 0,02 a	0,34 ± 0,05 b	0,0807
	Corteza	1,43 ± 0,15 a	2,77 ± 0,24 c	2,35 ± 0,25 b	<0,0001

de= desvío estándar

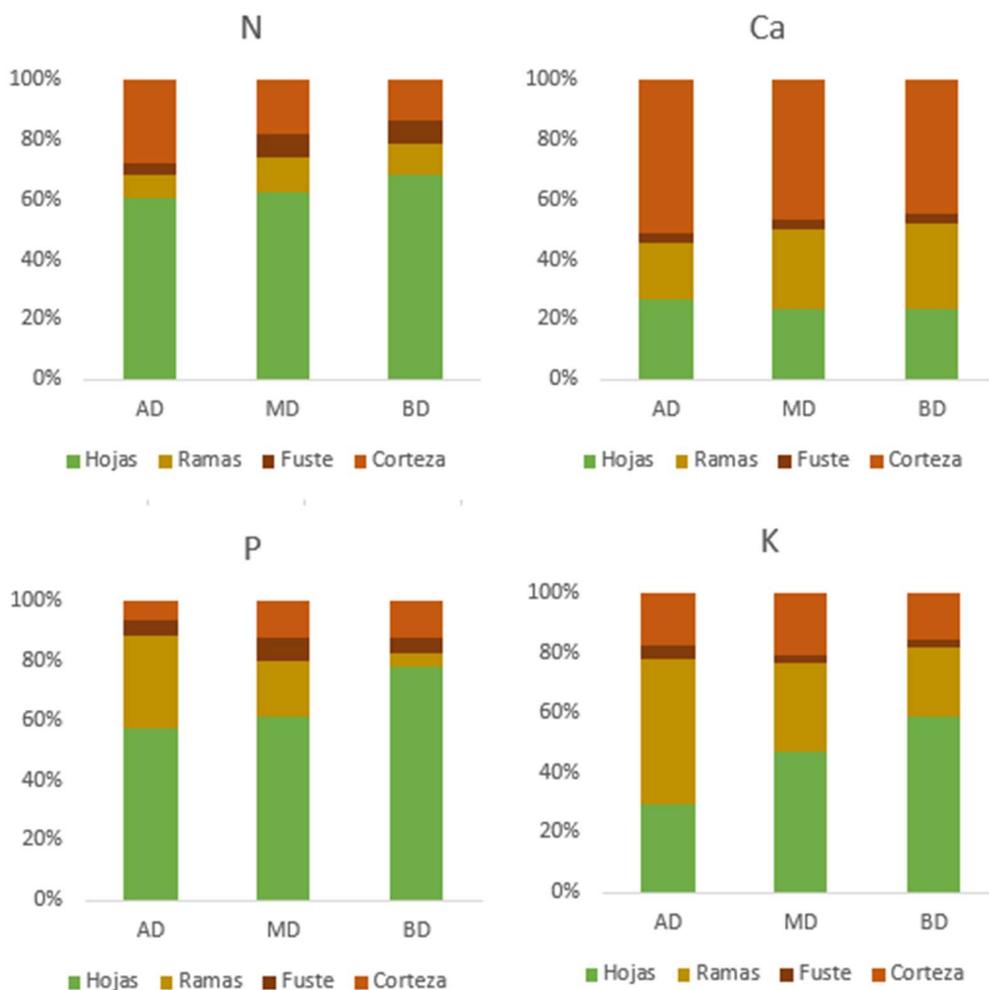


Figura 3. Proporciones relativas de la concentración de nutrientes para los distintos compartimentos en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD).

El contenido de nutrientes no fue significativamente diferente a nivel de biomasa total, sin embargo, al analizar a nivel de compartimentos (hojas, ramas, corteza y fuste) si se establecieron diferencias significativas (Tabla 4, Figura 4). El contenido de N acumulado (kg ha^{-1}) en la corteza registró diferencias significativas, siendo superior en AD respecto de MD y BD. El Ca acumulado (kg ha^{-1}) fue significativamente diferente en ramas, siendo inferior en el tratamiento AD respecto de MD y BD. El contenido de P acumulado (kg ha^{-1}) registró diferencias significativas en todos los compartimentos, con excepción del fuste. En el tratamiento BD se registró la mayor acumulación en los compartimentos hojas y corteza respecto del MD y AD. El contenido de K acumulado (kg ha^{-1}) registró diferencias significativas entre tratamientos en los compartimentos hojas, fuste y corteza, destacándose la acumulación en las hojas, siendo superior en los tratamientos BD y MD respecto de AD.

Tabla 4. Contenido de nutrientes (kg ha^{-1}) de los compartimentos de la biomasa de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD). Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

Nutriente	Biomasa	AD	MD	BD	p-valor
		Media \pm de	Media \pm de	Media \pm de	
N	Hojas	52,86 \pm 4,74 a	44,85 \pm 7,11 a	43,42 \pm 8,75 a	0,2850
	Ramas	6,13 \pm 0,58 a	9,65 \pm 1,54 b	7,47 \pm 1,51 ab	0,0411
	Fuste	38,88 \pm 4,72 a	58,51 \pm 6,69 a	43,31 \pm 8,87 a	0,0550
	Corteza	36,78 \pm 4,47 a	16,91 \pm 2,80 b	10,88 \pm 2,22 b	0,0002
	Total	134,65 \pm 14,47 a	129,93 \pm 21,09 a	105,08 \pm 21,37 a	0,2100
Ca	Hojas	100,89 \pm 9,04 a	97,27 \pm 15,39 a	99,29 \pm 20,02 a	0,9600
	Ramas	64,94 \pm 6,10 a	122,86 \pm 19,59 b	136,60 \pm 27,69 b	0,0099
	Fuste	152,6 \pm 18,54 a	143,57 \pm 23,8 a	110,81 \pm 22,7 a	0,1220
	Corteza	297,78 \pm 36,1 a	248,35 \pm 41,16 a	235,19 \pm 48,19 a	0,2380
	Total	616,22 \pm 69,7 a	612,06 \pm 99,55 a	581,91 \pm 118,6 a	0,8980
P	Hojas	3,90 \pm 0,35 ab	2,79 \pm 0,44 b	5,71 \pm 1,15 a	0,0082
	Ramas	1,89 \pm 0,18 a	0,99 \pm 0,16 b	0,43 \pm 0,09 c	<0,0001
	Fuste	4,24 \pm 0,51 a	3,94 \pm 0,65 a	3,39 \pm 0,69 a	0,3110
	Corteza	0,69 \pm 0,08 a	0,72 \pm 0,11 a	1,15 \pm 0,23 b	0,0213
	Total	10,72 \pm 1,12 a	8,44 \pm 1,37 a	10,68 \pm 2,17 a	0,2220
K	Hojas	17,75 \pm 1,59 a	44,31 \pm 7,01 b	53,66 \pm 10,82 b	0,0027
	Ramas	26,60 \pm 2,50 a	32,37 \pm 5,16 a	24,80 \pm 5,02 a	0,1690
	Fuste	30,97 \pm 3,76 a	28,67 \pm 4,75 ab	18,98 \pm 3,88 b	0,0265
	Corteza	15,81 \pm 1,92 a	24,92 \pm 4,13 b	17,79 \pm 3,65 ab	0,0363
	Total	91,13 \pm 9,74 a	130,26 \pm 20,97 a	115,19 \pm 23,37 a	0,1110

de= desvío estándar

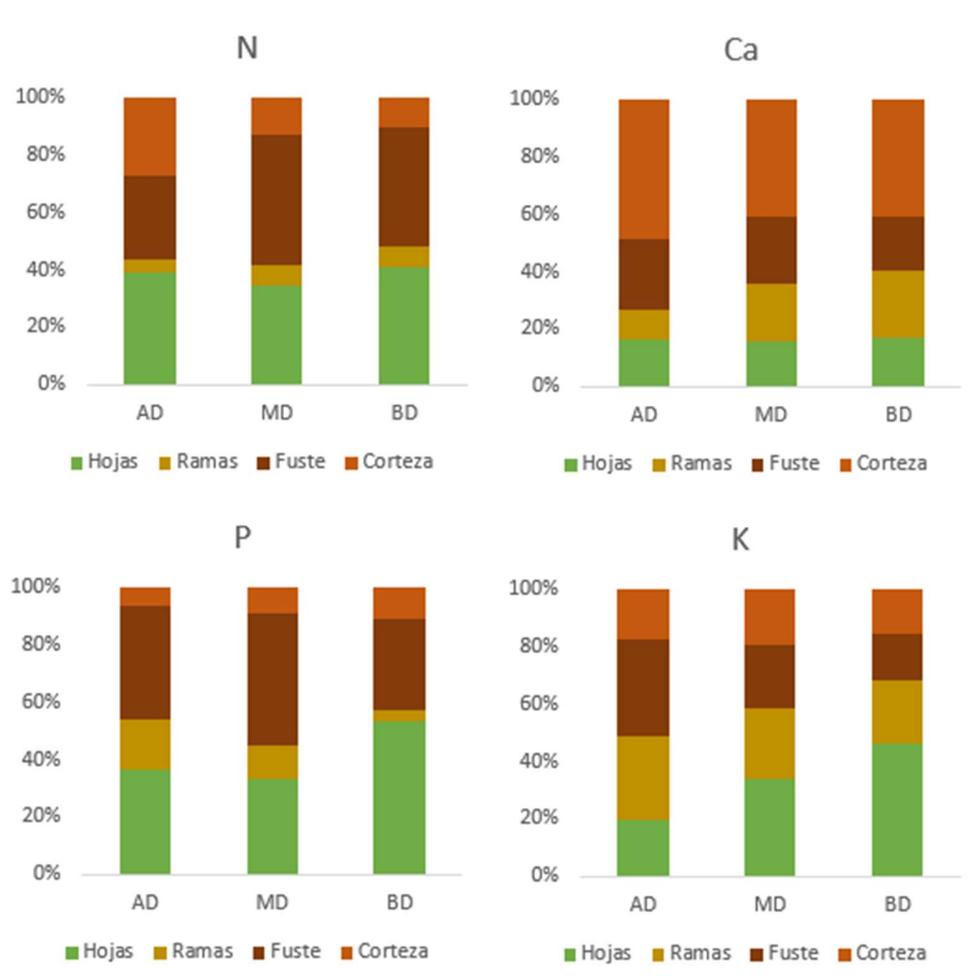


Figura 4. Proporciones relativas del contenido de nutrientes por hectárea para los distintos compartimentos en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD).

Al analizar las exportaciones de nutrientes que implicarían los distintos sistemas de aprovechamiento forestal, no se establecieron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos (Figura 5). En cambio, si fue posible establecer diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre sistemas de aprovechamiento. La cosecha del árbol completo representa un valor superior de exportación entre 32 y 78 % respecto a cosechar el fuste con corteza o sin corteza respectivamente. El nutriente más exportado por la cosecha en los tratamientos sería el Ca con valores entre 110 - 152 kg ha⁻¹ considerando la cosecha de fustes sin corteza, 346 - 450 kg ha⁻¹ fuste con corteza, y de 581 - 616 kg ha⁻¹ considerando el árbol completo.

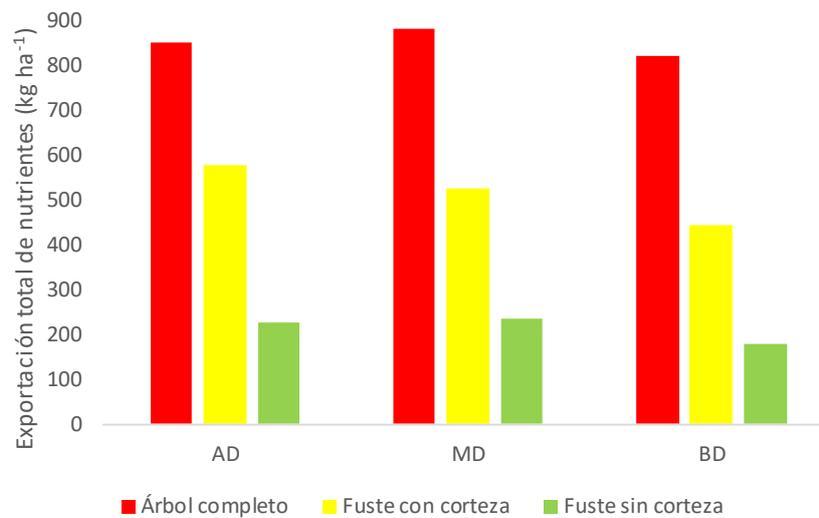


Figura 5. Exportación total de nutrientes (kg ha⁻¹) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) bajo distintos sistemas de aprovechamiento.

4.4. Discusión

Mantener la productividad de un ecosistema forestal requiere de un equilibrio en el ciclo de los nutrientes entre la plantación y el suelo (Chuyong et al., 2000). Las lomas y planicies arenosas de la provincia de Corrientes se caracterizan por ser suelos de baja fertilidad natural y bajo contenido de MO (Escobar et al., 1996; Sanabria y Matteo, 2017), por lo que el establecimiento de plantaciones con fines dendroenergéticos, las cuales representan un uso más intensivo del sitio (Fernández y Lupi, 2017) que los sistemas convencionales para la obtención de madera aserrable, podría afectar la capacidad productiva del ecosistema (Young y Steffen, 2008). En este trabajo observamos que las altas densidades de plantación (3.333 y 1.429 árboles ha⁻¹) no se diferenciaron de forma significativa en el contenido de materia orgánica, carbono orgánico y stock de nutrientes del suelo presente en el sistema a los 50 meses de edad, respecto a la menor densidad de plantación (909 árboles ha⁻¹), la cual es compatible con un esquema de manejo de madera sólida. Esto indicaría, que estos sistemas intensivos de producción, analizados en un primer ciclo de rotación y en turnos de aprovechamiento cortos

(50 meses luego de la plantación), no provocarían mayor degradación de la fertilidad del sitio en comparación con los sistemas convencionales establecidos en estos suelos. Sin embargo, no se tiene los valores de análisis de suelo de línea de base previo a la plantación para definir si hubo o no degradación de la fertilidad del sitio. Nuevos estudios se deberían realizar para determinar el impacto de estos sistemas productivos sobre la fertilidad del sitio en rotaciones sucesivas.

En este trabajo determinamos resultados similares a lo publicado por varios autores (Schumacher et al., 1993; Laclau et al., 2000; Goya et al., 2009; González, 2011; González García et al., 2015; González et al., 2016; Resquín et al., 2020) en la que mencionan que, en *Eucalyptus* sp., las concentraciones más altas de los nutrientes N, P y K se encuentran en las hojas y del Ca en la corteza. El contenido de nutrientes por hectárea acumulado en la biomasa aérea del clon *E. grandis* coincide con la secuencia decreciente de acumulación (Ca>N>K>P) reportado en la bibliografía (Schumacher et al., 1993; Goya et al., 1997; González García et al., 2015; Frangi et al., 2016; Stahring et al., 2018; Resquín et al., 2020), y a su vez los valores registrados están dentro del rango publicados para *E. grandis* (Goya et al., 1997; Goya et al., 2009; Laclau et al., 2012; Frangi et al., 2016; Stahring et al., 2018; Rocha et al., 2019; Resquín et al., 2020).

Las diferencias en la concentración y contenido de nutrientes en los distintos compartimentos de la biomasa del clon *E. grandis* para los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación reflejan cómo la competencia por recursos y la capacidad de absorción de nutrientes varían con la densidad de plantación. Los tratamientos de densidad media y baja mostraron mayores concentraciones y contenidos de ciertos nutrientes (Ca, K) en algunos compartimentos (ramas, hojas), lo que puede estar relacionado con una menor competencia por recursos y una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes. La mayor concentración y contenido de P en las ramas y N en la corteza del tratamiento de densidad alta sugiere una mayor acumulación de estos nutrientes en condiciones de mayor competencia por recursos. En contraposición, otros autores (Resquín et al., 2020), no observaron diferencias significativas en la concentración y contenido de nutrientes en función

de la densidad de plantación (6.660 - 2.220 árboles ha⁻¹) para *Eucalyptus grandis* creciendo en Uruguay.

En varios países (Brasil, España, EE. UU., entre otros) se utiliza el sistema de aprovechamiento del árbol completo para plantaciones forestales con fines energéticos (Casado Alcaide, 2013; Junior et al., 2016; Arias Aguilar y Guevara, 2017). Este sistema de aprovechamiento implicaría una gran exportación de nutrientes y por lo tanto su implementación puede tener graves consecuencias para el mantenimiento de la fertilidad del suelo y rendimiento en las siguientes rotaciones (Goya et al., 2009; Frangi et al., 2016; González et al., 2016; Scott et al., 2016; Stahinger et al., 2018; Bentancor et al., 2019; Resquín et al., 2020; Resquín et al., 2022). En este trabajo, determinamos que el aprovechamiento del árbol completo involucra una gran exportación de nutrientes en relación con los otros sistemas, y que la permanencia en el lugar de los residuos de cosecha, ya sea hojas y ramas o también corteza, implica una reducción del 32 y 78 % de la exportación de nutrientes respectivamente. La conveniencia de dejar las fracciones hojas, ramas y corteza en el sitio también ha sido señalada por varios autores (Laclau et al., 2000; Goya et al., 2009; Hernández et al., 2009; Aparico, 2011; Junior et al., 2016; Rodríguez-Soalleiro et al., 2018). Por lo tanto, en estos sistemas intensivos de producción de corta rotación, es decir cosechados en un tiempo menor al que el rodal alcanza un estado en el cual maximiza la conservación de los nutrientes (bosque en etapas maduras) (Goya et al, 1997, De Mello Cunha et al., 2005), cobra especialmente relevancia, la adopción de prácticas silvícolas que favorezcan el mantenimiento de la fertilidad del suelo y la capacidad productiva del sitio (Scott et al., 2016), sobre todo en estos ambientes marginales de la provincia de Corrientes.

A su vez, desde el punto desde vista de la industria de generación de energía (destino de estos sistemas de producción), es conveniente el abastecimiento a la central térmica con biomasa de solo el fuste o fuste con corteza, productos de mayor homogeneidad y poder calorífico (Patiño-Diez y Smith-Quintero, 2008), ya que mejora la operatividad, eficiencia y rendimiento de las calderas, en las cuales es incinerada la biomasa para la generación de energía eléctrica (comunicación

personal del jefe de planta de Genergiabio Corrientes S.A., ubicada en el Parque Foresto Industrial Santa Rosa, Corrientes).

Si bien, el aprovechamiento de la biomasa forestal exporta nutrientes del suelo, es importante destacar que no todos los nutrientes son extraídos del sitio. Los árboles absorben nutrientes en horizontes más profundos del suelo, que luego retornan a través de la descomposición de la hojarasca durante el ciclo de crecimiento de la forestación (Thompson y Troeh, 2021; Schlatter y Gerding, 2024). Esto implica que una parte de los nutrientes absorbidos por los árboles es devuelta al suelo, reduciendo la cantidad de nutrientes exportados. Por otro lado, después de la cosecha, el sistema radicular de los árboles queda en el sitio, junto con su biomasa y nutrientes asociados, contribuyendo a la fertilidad del suelo (Guo et al., 2006; Perez et al., 2013).

El impulso a la generación de energías renovables, en particular a partir de la biomasa forestal, son oportunidades para la provincia de Corrientes. Cuenta con el recurso y las condiciones climáticas favorables, representando un impulso sectorial y beneficiando el desarrollo económico regional (PEFIC, 2013). No obstante, aún existen interrogantes sobre estos sistemas intensivos de producción, acerca de su impacto sobre el ecosistema a escala de paisaje, impacto de las sucesivas rotaciones sobre la capacidad productiva del sitio, costos ambientales ocultos, tratamientos silvícolas óptimos, manejo de rebrote, entre otros (Fernández y Lupi, 2017).

4.5. Conclusión

La densidad de plantación no influyó en el contenido de nutrientes del suelo y de la biomasa aérea total. Las tres densidades de plantación podrían ser utilizadas con fines energéticos al no registrarse diferencias significativas entre ellas en la exportación de nutrientes. Los compartimentos hojas, ramas y corteza concentran la mayor parte de los nutrientes evaluados (N, P, Ca y K), mientras que el fuste es el compartimento del árbol con las concentraciones más bajas.

El aprovechamiento de todos los compartimentos del árbol pone en peligro el mantenimiento de la fertilidad del suelo y la capacidad productiva del sitio. La cosecha de fuste sin corteza es el sistema de aprovechamiento más adecuado para estos sistemas intensivos de producción, reduciendo la exportación de nutrientes en forma significativa, y mejorando la sostenibilidad de los nutrientes del suelo.

Las plantaciones de *Eucalyptus* sp. son una fuente prometedora de biomasa para bioenergía. No obstante, es necesario seguir estudiando el desarrollo de estos sistemas intensivo de producción a escala de cuenca o paisaje.

4.6. Bibliografía

Aparicio, J.L. (2001). *Rendimiento y biomasa de Eucalyptus nitens con alternativas nutricionales para una silvicultura sustentable en un suelo rojo arcilloso*. [Tesis de Magister en ciencias, mención silvicultura. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales].

Aparicio, J.L., Larocca, F. y Dalla Tea, F. (2005). Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*. *Idia XXI: revista de información sobre investigación y desarrollo agropecuario*, 5(8), 66-69.

Aparicio, J.L. (2011). *Efecto del manejo de residuos de cosecha de Pinus elliotii en el costo oculto de nutrientes y en el crecimiento de pino híbrido en un suelo arenoso de Corrientes*. XXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Arias Aguilar, D. y Guevara, M. (2017). *Establecimiento, manejo y aprovechamiento de plantaciones dendroenergéticas*. Universidad nacional de ciencias forestales. Honduras. Informe técnico. 72 pp.

Bartlett, M.S. (1937). "Properties of sufficiency and statistical tests." *Proceedings of the Royal Statistical Society, Series A*, 160, 268–2821.

Bentancor, J., Hernández, J., del Pino, A., Califra, A., Resquín, F. y González-Barrios, P. (2019). Evaluation of the biomass production energy yield and nutrient removal of *Eucalyptus dunnii* Maiden grown in short rotation coppice under two initial planting densities and harvest system. *Biomass and Bioenergy*, 122, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.019>

Casado Alcaide, J.A. (2013). Sistemas de aprovechamiento de cultivos energéticos lignocelulósicos: aplicaciones en Uruguay. Recuperado el 10 de diciembre de 2022 de http://www.inia.org.uy/online/files/contenidos/link_25042013124908.pdf

Chuyong, G., Newbery, D. y Songwe, N. (2000). Litter nutrients and retranslocation in a central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. *New Phytology*, 148, 493-510.

Da Silva, F.C. (2009). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

De Mello Cunha, G., da Gama-Rodrigues, A.C. y Costa, G.S. (2005). Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no Norte Fluminense. *Revista Árvore*, 29(3), 353-363.

Escobar, E.H., Ligier, H.D., Melgar, R., Matteio, H. y Vallejos, O. (1996). *Mapa de suelos de la provincia de Corrientes*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales. EEA Corrientes. 432 pp.

Fernández, R. y Lupi, A.M. (2016). *Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en Argentina*. Acuerdo INTA FAO. Ediciones INTA.

Fernández, R. y Lupi, A.M. (2017). *Plantaciones con fines energéticos: Consideraciones tecnológicas y ambientales frente a su implementación*. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Gómez, E.A., Ríos, L.A. y Peña, J.D. (2012). Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia. *Información tecnológica*, 23(6), 73-86.

González, A. (2011). *Extracción y reciclaje de nutrientes en cosechas Eucalyptus dunnii, Eucalyptus globulus y Eucalyptus maidenii en Uruguay*. XXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

González García, M., Hevia, A., Majada, J., Rubiera, F. y Barrio-Anta, M. (2015). Nutritional, carbon and energy evaluation of *Eucalyptus nitens* short rotation bioenergy plantations in northwestern Spain. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 9(2), 303.

González, A., Hernández, J. y del Pino, A. (2016). Extracción y reciclaje de elementos nutritivos por cosecha de *Eucalyptus globulus* en Uruguay. *Bosque*, 37 (1), 179-190.

Goya, J.F., Frangi, J.L. y Dalla Tea, F. (1997). Relación entre biomasa aérea, área foliar y tipos de suelos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata, Argentina*, 102(2), 11-21.

Goya, J.F., Frangi, J.L., Denegri, G.A. y Larocca, F. (2009). Simulación del impacto de diferentes regímenes de cosecha sobre el capital de nutrientes e indicadores económicos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. *AUGMDomus*, 1.

Guo, L.B., Sims, R.E.H. y Horne, D.J. (2006). Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand: II. Litter fall and nutrient return. *Biomass and Bioenergy*, 30, 393-404.

Hernández, J., del Pino, A., Salvo, L. y Arrarte, G. (2009). Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 258(2), 92-99.

Ipinza, R. y Barros, S. (2011). *El Cambio Climático, los Bosques y la Silvicultura*. Instituto forestal Chile. Informe técnico. 145 pp.

IRAM-SAGPyA. (2020). Norma 29570-1:2020. Calidad de Suelos para Uso Agropecuario.

Junior, H.J.E., de Melo, R.X., Sartori, M.M.P., Guerra, S.P.S. y Ballarin, A.W. (2016). Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 90, 15-21.

Kolmogorov, A.N. (1933). "Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione." *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari*, 4, 83-912.

Kurtz, D.B. (2018). *Asistencia técnica para el sector de la producción de la provincia de Corrientes. Cartografía de suelos y evaluación de tierras del departamento de Mercedes, Corrientes*. INTA. Informe técnico. 363 pp.

Laclau, J.P., Bouillet, J.P. y Ranger, J. (2000). Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Ecología y gestión forestal*, 128 (3), 181-196.

Laclau, J.P. (2012). *La nutrición de las plantaciones de eucalipto y su impacto en el suelo*. XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Larocca, F., Dalla Tea, F. y Aparicio JL. (2004). *Técnicas de implantación y manejo de Eucalyptus grandis para pequeños y medianos forestadores de Entre Ríos y Corrientes*. XIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

López Reyes, L.Y., Domínguez Domínguez, M., Martínez Zurimendi, P., Zavala Cruz, J., Gómez Guerrero, A. y Posada Cruz, S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera Bosques*, 22(3), 49-60.

Martiarena, R. (2016). *Efecto de la disponibilidad de recursos sobre la eficiencia de uso y conservación de los nutrientes en función de las condiciones edafoclimáticas, edad y manejo de las plantaciones de Pinus taeda L. en la Mesopotamia Argentina*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/52446>

Pérez, C., Frangi, J., Goya, J., Luy, A. y Arturi, M. (2013). Contenido de nutrientes en las raíces finas y el mantillo de rodales de *Eucalyptus grandis* de diferente edad en la Mesopotamia Argentina. *Bosque*, 34(3), 303-310.

PEFIC (Plan estratégico foresto industrial de la provincia de Corrientes). (2013). Informe técnico. Recuperado el 19 de agosto de 2024 de <https://insitu.org.ar/PDF/PEFIC.pdf>

R Core Team. (2019). R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria.

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R., Carrasco-Letelier, L. y Raschid, C. (2019). Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunni* and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 438, 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.007>

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R.M., Carrasco-Letelier, L., Casnati, C.R. y Bentancor, L. (2020). Evaluation of nutrient content in biomass of *Eucalyptus* species from short rotation plantations in Uruguay. *Biomass and Bioenergy*, 134, 105502.

Resquín, F., Bentancor, L., Carrasco-Letelier, L., Rachid-Casnati, C. y Navarro-Cerrillo, R.M. (2022). Rotation length of intensive *Eucalyptus* plantations: How it impacts on productive and energy sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 166, 106607.

Rocha, J.H.T., du Toit, B. y de Moraes Goncalves, J.L. (2019). Nutrition with Ca and Mg and its application in *Eucalyptus* and *Pinus* plantations. *Forest Ecology and Management*, 442, 63-78.

Rodríguez-Soalleiro, R., Eimil-Fraga, C., Gómez-García, E., García-Villabrille, J.D., Rojo-Alboreca, A., Muñoz, F., Oliveira, N., Sixto, H. y Pérez-Cruzado, C. (2018). Exploring the factors affecting carbon and nutrient concentrations in tree biomass

components in natural forests, forest plantations and short rotation forestry. *Forest Ecosystems*, 5, 1-18.

Sanabria, M.C. y Matteio, J.P. (2017). *Ecorregión Mesopotámica Corrientes. Sistema productivo: Mixto (Forestal- Ganadero). Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina*. 1a ed. Entre Ríos: Ediciones INTA.

Schlatter, J. y Gerding, V. (2024). *Nutrición forestal*. Ediciones Universidad Austral de Chile. ISBN digital 978-956-390-246-4

Schumacher, M.V. y Poggiani, F. (1993). Biomass yield and nutrients remotion by *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden AND *Eucalyptus torelliana* F. Muell, Cultivated in anhembi sp. *Ciência Florestal*, 3, 21-32.

Scott, D.A. y Page-Dumroese, D.S. (2016). Wood bioenergy and soil productivity research. *BioEnergy Research*, 9(2), 507-517.

Smirnov, N.V. (1948). "Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions". *Annals of Mathematical Statistics*, 19, 279-2812.

Stahringer, N.I., Neves, J.C.L., Paulucio, R.B., Teixeira, J.L., Sussini, P.A., Argüelles, R.T. y Chamorro, L.L. (2018). Recomendación de fertilizantes para *Pinus* y *Eucalyptus* en Corrientes, Argentina utilizando balance nutricional. *IAH Versión Cono Sur*, 14.

Thompson, L.M., Troeh, F.R. (2021). *Soils and fertility*, 4° edición. Ed Reverté S.A. ISBN 978-84-291-9001-4.

Viera, M., Schumacher, M. y Bonacina, D. (2011). Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul, RS. *Revista Árvore*, 35(3), 371-379.

Volpe, M.A., Frechero, M., Casoni, A.I., Gauchat, M.E., Fassola, H.E., Lupi, A.M. y Acevedo, A. (2022). *Análisis de pre-factibilidad para desarrollar un proceso de*

conversión de residuos de madera de pino. Instituto de Suelos, INTA. Informe técnico.

Winck, R.A., Fassola, H.E., Barth, S.R., Keller, A.E. y Crechi, E.H. (2013). *Variación de la densidad básica de la madera de Eucalyptus grandis para diferentes edades y zonas agroecológicas de la región mesopotámica.* Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú, Misiones. Argentina.

CAPITULO 5. Influencia de parámetros ambientales en el crecimiento del clon *Eucalyptus grandis*³

5.1. Introducción

Ante el desafío implícito que representa el cambio climático, el establecimiento de plantaciones forestales conlleva a varios interrogantes sobre la sustentabilidad y la eficiencia en el uso de recursos (Andivia et al., 2013). Las mismas han sido criticadas por sus efectos sobre los ecosistemas, entre ellos la disminución del contenido hídrico y de nutrientes del suelo (FAO, 1987; Binkley y Stape, 2004; Tesón, 2011). Cuando las plantaciones forestales reemplazan a la vegetación nativa, ya sea arbórea (bosque nativo) o herbácea (pastizal natural), pueden generar grandes impactos ambientales. Estos cambios estructurales en los ecosistemas naturales se ven reflejados en la pérdida o atenuación de los servicios ecosistémicos que proveen: cambios en el proceso hidrológico, en los flujos de energía, en los ciclos minerales, en la estabilidad y fertilidad de los suelos, en la regulación del clima, entre otros (Chen et al., 1999; Tesón, 2011; Gyenge et al., 2024).

El clima manifiesta cambios rápidos y direccionales, que impactan de manera diversa y compleja sobre los ecosistemas y la producción, tanto a nivel regional y global (SAyDS, 2015). Tiene gran influencia en el crecimiento de las plantaciones forestales de *Eucalyptus* sp. (Campoe et al., 2016). La variación de los parámetros ambientales entre años tiene un impacto significativo en la productividad forestal (Stape et al., 2008) y cualquier cambio regional en el clima probablemente resultaría en cambios regionales en la producción (Binkley et al., 2017). Los pronósticos de cambio climático indican un aumento de la variabilidad climática que ya se observa en la actualidad, con una mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos. Para la provincia de Corrientes pronostican aumento de temperatura y precipitaciones (SAyDS, 2015). Estas proyecciones también implican un aumento en la frecuencia

³ Maggio, A.D., Caniza, F.J., Iermanó, M.J., Cellini, J.M. y Martínez Meier, A. (2021). Sustentabilidad ambiental de sistemas productivos con eucalipto: contenido hídrico del suelo y cambio climático. II Congreso Argentino de Agroecología. Resistencia, Chaco, Argentina.

e intensidad de sequías y consecuente estrés hídrico afectando a la producción regional (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2019). Por lo tanto, comprender la influencia de la variación del clima sobre el crecimiento de los árboles contribuye al conocimiento de los procesos que interviene en la productividad forestal y ayuda a dilucidar los impactos potenciales de los escenarios climáticos futuros en la producción forestal regional.

Los objetivos de este capítulo fueron determinar la influencia de parámetros ambientales en el crecimiento del clon *E. grandis* bajo diferentes densidades de plantación y dilucidar si el establecimiento de una plantación forestal modifica parámetros del sistema aire suelo. Con este trabajo se pretende generar conocimientos sobre el impacto de la variabilidad climática en la producción forestal y sobre la sustentabilidad ambiental de sistemas productivos con el clon *E. grandis* en relación con los sistemas que reemplazan (campo natural de pastoreo).

5.2. Materiales y Métodos

Durante un período de 2 años, desde abril de 2018 hasta marzo de 2020, se registraron parámetros ambientales dentro y fuera de los tratamientos de 3.333 árboles ha⁻¹ (AD), 1.429 árboles ha⁻¹ (MD) y 909 árboles ha⁻¹ (BD) del clon *E. grandis* 2136, y a su vez se determinó el contenido de agua del suelo y se registró el incremento mensual del diámetro a la altura del pecho de los árboles de cada tratamiento. Al comienzo de este periodo de evaluación la plantación tenía una edad de 1 año y 11 meses.

Se instaló un colector de datos climáticos Cavadevices modelo SCH10 de 4 canales en cada tratamiento (Figura 1 y 2). Se registró, durante un periodo de 2 años, la temperatura media, máxima y mínima (T_m , $T_{máx}$ y $T_{mín}$, °C, respectivamente), humedad relativa (HR, %) a 1,5 m de altura y la temperatura del suelo (TS, °C) a 10 cm de profundidad (Figura 2).

La precipitación (P, mm), evapo-transpiración potencial (E_{to} , mm), radiación neta (R_n , MJ.m²), T, HR y TS fue registrado fuera de los tratamientos, mediante la

estación meteorológica convencional instalada en el predio de la EEA INTA Bella Vista (Figura 3).

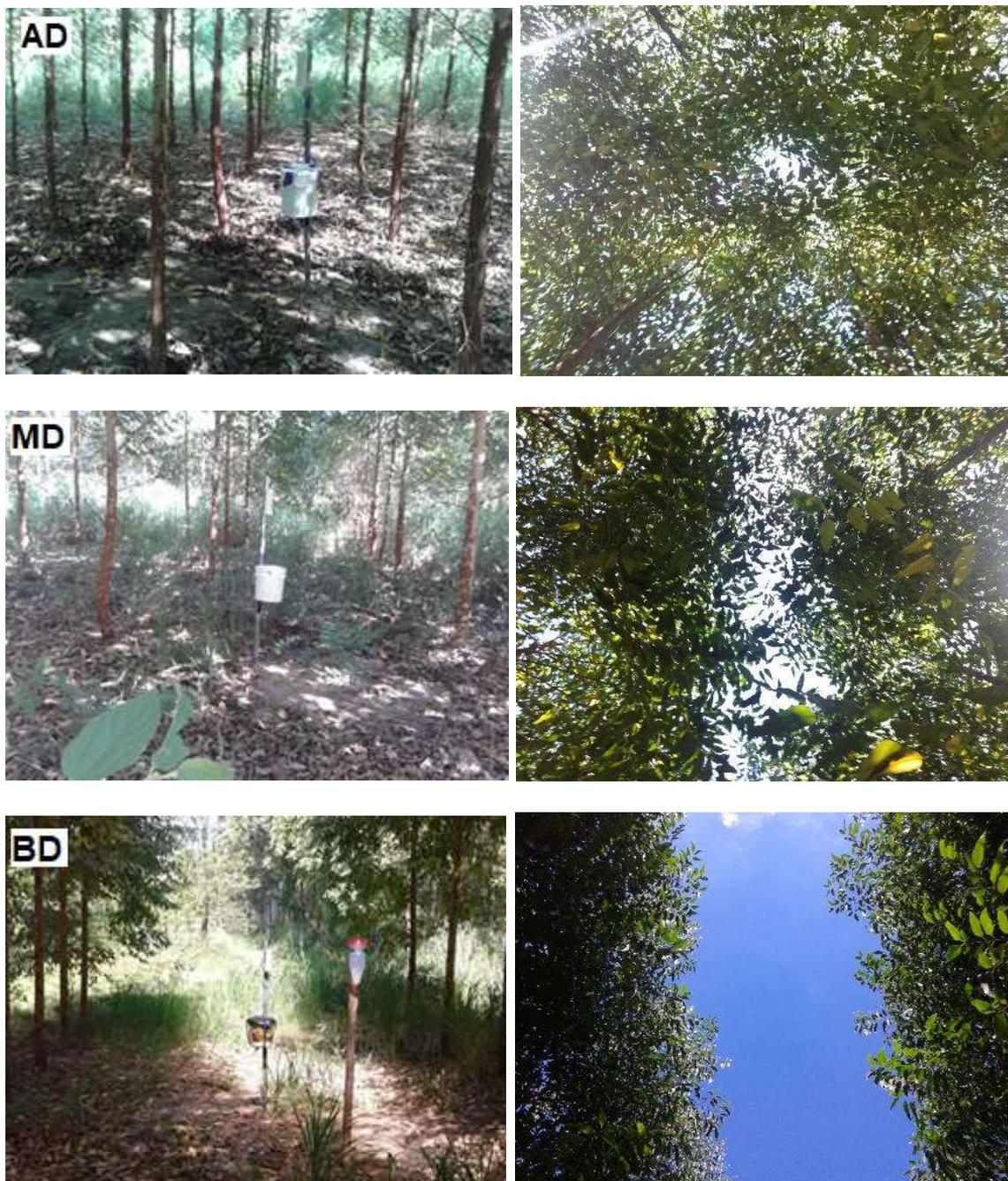


Figura 1. Izquierda: Colectores climáticos instalados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD). Derecha: Vista desde el colector hacia el cenit.



Figura 2. Colector climático de 4 canales (temperatura y humedad ambiente, temperatura y humedad suelo) instalados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD).



Figura 3. Estación meteorológica convencional instalada en el predio de la EEA INTA Bella Vista. Foto: M. Almirón

El contenido de agua del suelo (CH, mm) fue determinado utilizando la metodología presentada por Gudelj et al. (2018). Se realizaron mediciones manuales mensuales mediante la técnica de gravimetría durante 22 meses, desde abril de 2018 hasta marzo de 2020, excepto julio y agosto de 2019. En cada muestreo se tomaron 24 muestras de suelo en los primeros 30 cm de profundidad (12 muestras de 0 - 10 cm y 12 muestras de 10 - 30 cm) en el centro de la parcela, en los tratamientos y en un campo natural (CN) aledaño que tuvo la misma preparación del suelo que el ensayo y no se plantó (Figura 4). La técnica de gravimetría consiste en la toma de la muestra de suelo con un cilindro metálico de 100 cm³ o barreno edafológico, posterior determinación de su peso en el estado natural, luego secado en estufa a 103 ± 3 °C hasta alcanzar peso constante y determinación del peso final en estado seco. Con los datos obtenidos se determinó el contenido gravimétrico:

$$Hg = (PH - PS) / PS$$

Dónde:

Hg = contenido gravimétrico (g g⁻¹)

PH = peso húmedo (g)

PS = peso seco (g)

La densidad aparente del suelo (DA) se determinó por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986): se extrajeron 6 muestras en cada tratamiento y en el CN a las mismas profundidades definidas para el muestreo gravimétrico. Se emplearon cilindros de acero inoxidable de 100 cm³ (5,5 cm de altura x 4,5 cm de diámetro). Se aplicó la expresión:

$$DA = PS / VC$$

Dónde:

DA = densidad aparente del suelo (g cm⁻³)

PS = peso seco (g)

VC = volumen del cilindro (cm³)

Para determinar la lámina de agua contenida en cada profundidad se aplicó la siguiente expresión:

$$L = Hg \times DA \times z$$

Dónde:

L = lámina de agua (mm)

Hg = contenido gravimétrico (g g^{-1})

DA = densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

z = espesor (cm)



Figura 4. Campo natural de gramíneas (CN) aledaño al módulo experimental de densidad de plantación. Foto: A. Maggio

Se registró mensualmente el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) de los individuos de cada densidad de plantación. El área basal de cada individuo se calculó según la siguiente expresión:

$$AB = (DAP^2) \times (\pi \div 4)$$

Dónde:

AB = área basal individual (m^2)

DAP = diámetro a la altura del pecho (m)

El incremento de área basal mensual individual se calculó restando el valor anterior de la medición actual. El incremento mensual en área basal por hectárea (IMAB, m^2)

ha⁻¹) de cada tratamiento se calculó a partir de la sumatoria de los incrementos de área basal de los individuos multiplicados por un factor de conversión de 44,44 para el AD, 19,05 para el MD y 12,12 para el BD.

Se aplicó un análisis de regresión lineal multivariante (Backward Stepwise Regression) para relacionar el IMAB de cada tratamiento en función de los parámetros climáticos registrados (Campoe et al., 2016). Se eliminaron parámetros altamente correlacionados entre sí (temperatura media, radiación neta). Las variables estudiadas se sometieron a un análisis de homocedasticidad y normalidad. Un análisis de la varianza (ANOVA) seguido de diferentes pruebas post-hoc (dependiendo de la distribución de los datos) fue realizado para establecer diferencias significativas entre tratamientos para las variables precedentemente indicadas. El nivel de significancia se fijó en $p < 0,05$. Todos los análisis se realizaron utilizando el software R Core Team, 4.0.3. (R Core Team, 2019).

5.3. Resultados

En cuanto a los datos climáticos, excepto para el caso de T_{máx} y T_{mín} (ANEXO II Tablas 1 y 2), las demás variables ambientales registradas fueron significativamente diferentes dentro y fuera de las plantaciones. Las temperaturas máximas mensuales (Figura 5a) fueron mayores fuera de los tratamientos (estación meteorológica (EM)), siendo las mayores diferencias en las estaciones otoño - invierno. Las temperaturas mínimas mensuales (Figura 5b) fueron inferiores fuera de los tratamientos.

La HR ambiente fue inferior fuera de los tratamientos (Figura 5c), registrando diferencias significativas con los mismos (ANEXO II Tabla 3). Se encontraron diferencias de hasta 9 % de HR a lo largo del periodo evaluado, registrándose las mayores diferencias en las estaciones otoño invierno.

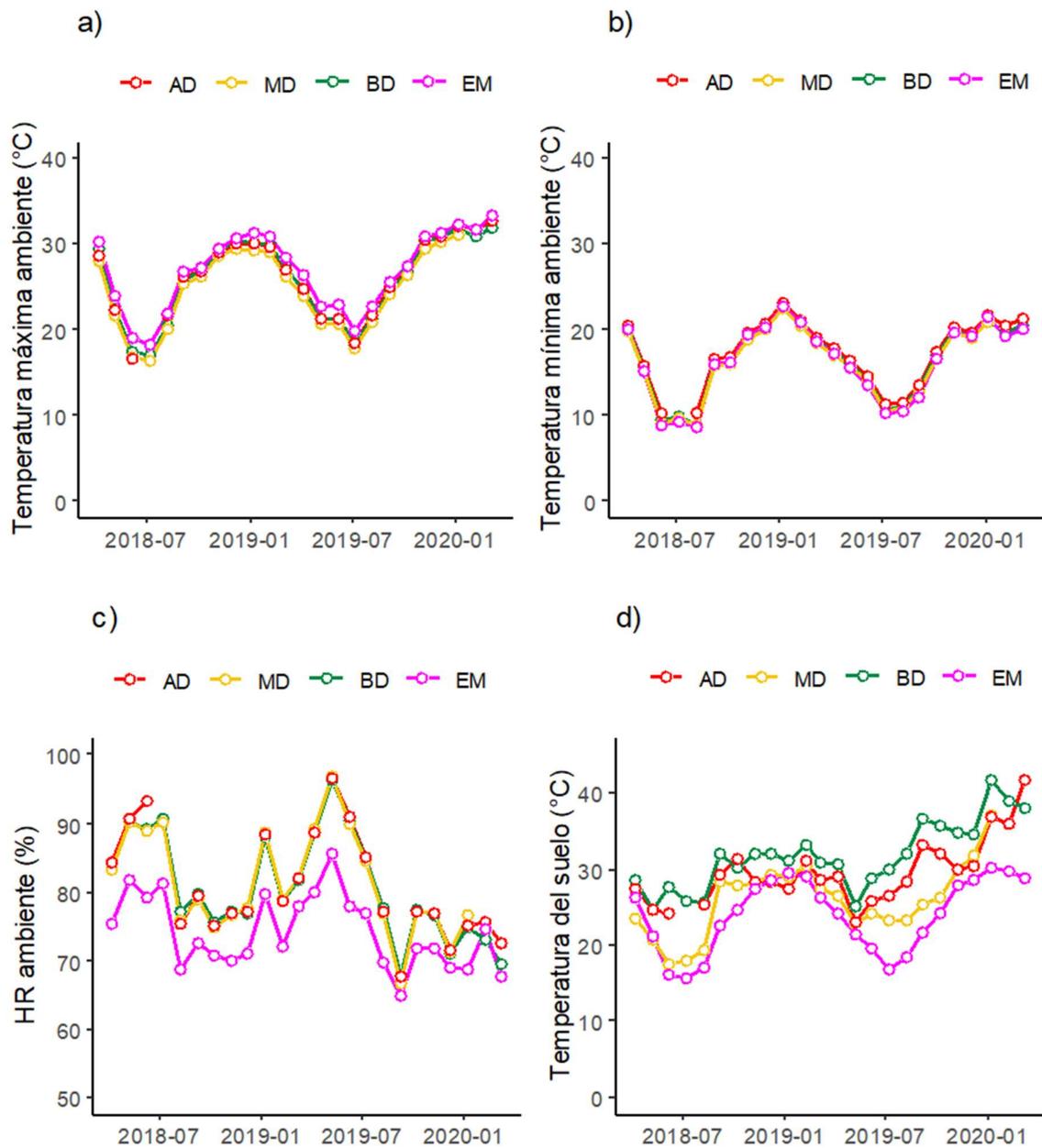


Figura 5. Parámetros ambientales registrados durante 2 años en la estación meteorológica (EM) y los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD): a) Temperatura máxima ambiente, b) Temperatura mínima ambiente, c) Humedad relativa ambiente, d) Temperatura del suelo.

La temperatura media del suelo fue menor fuera de los tratamientos (Figura 5d), registrando diferencias significativas con los tratamientos a lo largo de todo el periodo evaluado (ANEXO II Tabla 4). A su vez, entre tratamientos de densidad de

plantación, también fue significativamente diferente, registrando valores superiores de 5 °C y 10 °C del BD respecto a AD y MD. Las mayores diferencias se observaron en los periodos otoño invierno.

Se registraron diferencias significativas en el contenido de agua del suelo dentro y fuera de la plantación (Figura 6a), siendo un 50 % mayor el CH afuera de la plantación. La densidad de plantación no influyó en forma significativa en el CH en 15 de las 22 evaluaciones mensuales realizadas (ANEXO II Tabla 5), no obstante, se observó una disminución de este cuando aumenta la densidad. El tratamiento BD registró un 6,4 % y 12 % mayor de CH respecto al MD y AD. La DA del suelo en los primeros 10 cm de profundidad se diferenció entre tratamientos: MD se diferenció con respecto a AD y CN, mientras que BD no registró diferencias con ninguno de ellos. Los valores medios y desvío estándar fueron de $1,39 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$, $1,33 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$, $1,38 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$, $1,42 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$ para AD, MD, BD y CN respectivamente. En la profundidad del suelo de 10 - 30 cm no se registraron diferencias significativas ($p=0,9478$), siendo de $1,52 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$, $1,51 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$, $1,53 \pm 0,04 \text{ g cm}^{-3}$, $1,51 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$ para AD, MD, BD y CN respectivamente.

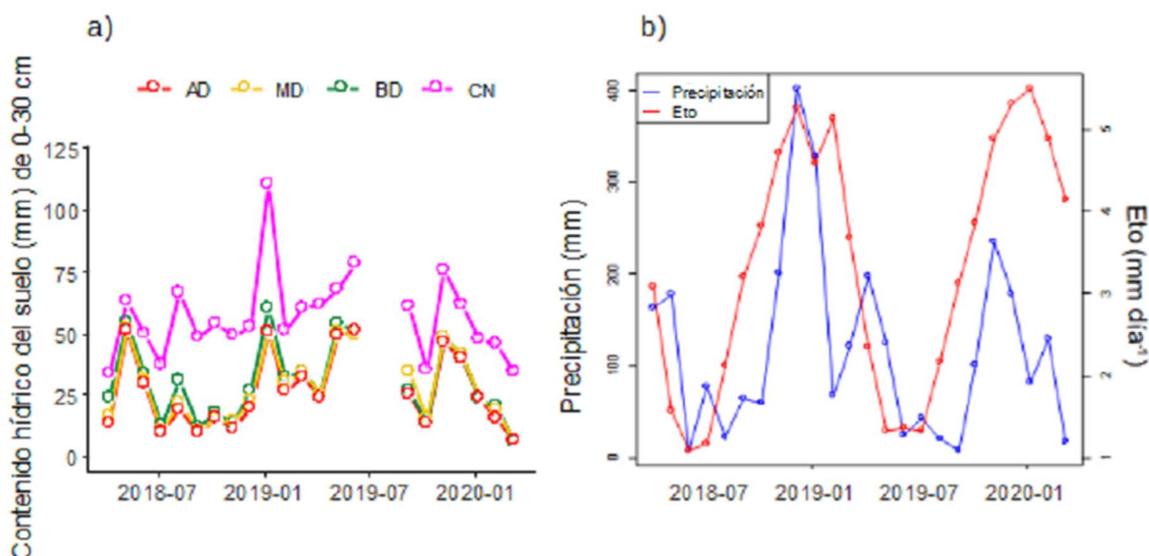


Figura 6. a) Contenido de agua del suelo de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y un campo natural (CN) evaluados por

gravimetría durante 22 meses. b) Precipitación y evapotranspiración potencial (Eto) registrados durante 2 años en la estación meteorológica.

En el primer año de evaluación se establecieron mayores incrementos en área basal en todos los tratamientos (Figura 7 y 8), periodo en el que se registraron mayores precipitaciones y CH (Figura 6), y menores valores de TS. En el segundo año de evaluación, se registró una disminución de la precipitación (31,2 %) y CH y aumento de la TS, influenciando en el IMAB. El mismo se redujo en 39,8 %, 37,7 % y 32,6 % en los tratamientos de AD, MD y BD respectivamente, en el 2° año respecto del 1° año.

El IMAB se relacionó con diversos parámetros ambientales (Tabla 1). En el tratamiento AD el IMAB se relacionó positivamente con $T_{mín}$ y P y en forma negativa con $T_{máx}$. En MD, la relación fue positiva con la $T_{mín}$ y la Eto, y negativa con la $T_{máx}$ y TS, mientras que en BD, la relación fue positiva con la $T_{mín}$ y Eto, mientras que negativa con la $T_{máx}$ y TS.

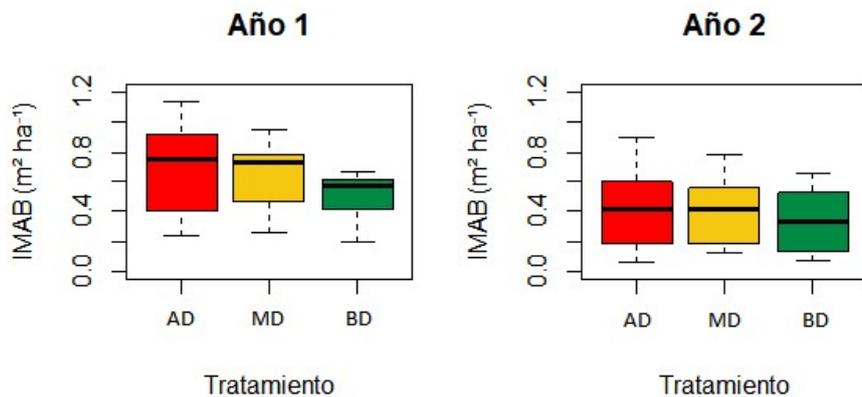


Figura 7. Incremento mensual en área basal (IMAB) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) registrados durante 24 meses.



Figura 8. Evolución del Incremento mensual en área basal (IMAB) de los tratamiento alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) registrados durante 24 meses.

Tabla 1. Modelo de regresión lineal de IMAB, parámetros e índices estadísticos de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD).

Tratamientos	Tmáx	Tmín	TS	CH	Eto	P	R ²	ECM	p-valor	
	a	b	c	d	e	f	g			
AD	1,9822*	-0,1515*	0,1072*		-0,0066.	0,1976.	0,0015*	0,6349	0,0519	0,0056
MD	2,2949**	-0,1237*	0,1314***	-0,0556*	-0,0048.	0,2437*		0,6745	0,0273	0,0041
BD	1,9493***	-0,0873*	0,0621*	-0,0267*		0,1616*		0,5926	0,0212	0,0075

$$IMAB = a + b \times Tmáx + c \times Tmín + d \times TS + e \times CH + f \times Eto + g \times P + \varepsilon$$

IMAB = incremento mensual de área basal (m² ha⁻¹); Tmáx = temperatura máxima ambiente (°C); Tmín = temperatura mínima ambiente (°C); TS = temperatura del suelo (°C); CH = contenido de agua del suelo (mm); Eto = Evapo-transpiración potencial (mm); P = precipitación (mm); ε = error aleatorio; a-g = coeficientes de la ecuación de regresión multivariante. Nivel de significancia: . Significativo al nivel 0,1; * Significativo al nivel 0,05; ** Significativo al nivel 0,01; *** Significativo al nivel 0,001

5.4. Discusión

Las condiciones ambientales dentro de una plantación forestal tienden a diferir respecto de aquéllas fuera de ella, caracterizado por la modificación de variables del sistema aire-suelo (luz, temperatura del aire y del suelo, velocidad del viento, humedad atmosférica, etc.) (Gómez Sanz, 2004). En este capítulo determinamos que la cobertura forestal amortigua las temperaturas extremas del aire. Dentro de ella las temperaturas máximas son menores, consecuencia de la menor radiación

recibida respecto de lo que sucede fuera (Bahamonde et al., 2009), mientras que, las temperaturas mínimas son mayores, debido a que el canopy forestal intercepta la radiación y genera una capa de aire cálido que puede llegar hasta el suelo (Gómez Sanz, 2004). La humedad relativa ambiente aumentó significativamente, consecuencia de la continua transpiración de la vegetación y disminución de la velocidad del viento (Gómez Sanz, 2004).

La temperatura del suelo también se vio modificada, aumentando dentro de las plantaciones respecto de lo que sucede fuera de las mismas. En este parámetro diversos autores han encontrado distintos resultados y explicaciones en cuanto a cómo la cubierta forestal afecta esta variable. Payne y Gregory (1992) explican que la causa de encontrar una mayor TS dentro de la plantación podría deberse a que una cubierta herbácea mantiene una masa de aire casi inmóvil entre sus hojas que aísla al suelo de los flujos de calor, mientras que en un ecosistema forestal la columna de aire entre el suelo y el dosel forestal es mayor, por lo que la convección puede darse con una mayor facilidad. En una forestación hay mayor cantidad de hojarasca que en un pastizal. Carbonero Zalduegui (1984) menciona que la descomposición de la hojarasca es un proceso químico que libera energía, por lo que aumenta la temperatura del suelo. En contraposición, otros autores (Lidón Cerezuela, 2008; Bahamonde et al., 2009) establecieron que dentro de una masa forestal la temperatura del suelo es menor que fuera de la misma, consecuencia de la menor radiación recibida.

El contenido hídrico del suelo se redujo significativamente, consecuencia de la interceptación de la precipitación del dosel forestal (Jobaggy y Jackson, 2004; Tesón, 2011) y mayor requerimiento hídrico por parte de la forestación en relación con el campo natural (Chen et al., 2003; Noretto et al., 2005; Noretto y Jobaggy, 2014; Milione et al., 2020). Tener en cuenta estas modificaciones de parámetros ambientales dentro y fuera de la plantación forestal es relevante al momento de tomar decisiones respecto al cambio de uso del suelo, ya que las modificaciones del contenido hídrico del suelo y de otros parámetros ambientales pueden afectar procesos de los ecosistemas naturales como su descomposición, mineralización y productividad (Chen et al., 1999) e influir en la dinámica hídrica local y regional

(Jobaggy y Jackson, 2004; Noretto et al., 2008; Noretto y Jobaggy, 2014). El impacto hidrológico de las forestaciones también dependerá de su diseño, la especie implantada, su densidad, método de cosecha, rotación y ubicación de las plantaciones en la cuenca hidrográfica (Albaugh et al., 2013; Noretto y Jobaggy, 2014; Gyenge y Fernández, 2018).

La temperatura del suelo es un parámetro relevante en la agricultura, ya que una temperatura demasiado baja o alta afecta tanto a los organismos del suelo como a las plantas (Arguello Arias, 1991; Muñoz et al., 2009). Esta se relacionó significativamente con el IMAB en los tratamientos MD y BD. Varios autores (Arguello Arias, 1991; Ferreras et al., 1999; Muñoz et al., 2009) mencionan que las temperaturas del suelo óptima para la bioactividad oscilan entre 10 y 27 °C. En el 2° año de evaluación, observamos un aumento de la TS, superando el límite máximo óptimo, afectando el IMAB y deteniendo el crecimiento en varios individuos de todos los tratamientos. El aumento de la temperatura del suelo acelera los procesos microbiológicos (Jandl, 2005), sin embargo, las altas temperaturas perjudican a los microorganismos del suelo (Muñoz et al., 2009).

Callado et al. (2013) y Shimamoto et al. (2015) mencionan que, en climas subtropicales, el amplio rango de temperatura del aire juega un papel importante al influir en el crecimiento de los árboles. Las temperaturas máximas y mínimas determinaron significativamente el IMAB en todas las densidades de plantación. La temperatura tiene un gran impacto en varios procesos fisiológicos, como en la fotosíntesis, transpiración y respiración (Atkin et al., 2015), y en muchos procesos en relación con el carbono, como la productividad neta, la humedad del suelo, la descomposición de la hojarasca, entre otros (Jandl, 2005).

La temperatura y la precipitación constituyen factores determinantes del contenido hídrico del suelo (Pantano et al., 2014), el cual influye en el rendimiento de los sistemas productivos (Tesón, 2011; Ryan et al., 2020). Drew et al. (2008) y Stape et al. (2010) observaron que las plantaciones de *Eucalyptus* sp. pueden variar significativamente su productividad debido a la variabilidad de las precipitaciones. Estas variaciones pueden reducir entre un 30 - 50 % la producción de madera. En

el 2° año de evaluación se registró una disminución de las precipitaciones, provocando un desbalance entre la misma y la evapotranspiración potencial (Figura 6b). Se registró también un aumento de la temperatura del suelo y disminución de su contenido hídrico, principalmente en el periodo primavera verano, lo que provocó una disminución del IMAB. Los pronósticos de cambio climático indican un aumento de la variabilidad climática. Por ejemplo, simulando en el modelo del IMAB un aumento de la temperatura de 2 grados y disminución del 50 % de las precipitaciones y contenido de humedad del suelo, observamos que el crecimiento se reduce entre un 20 y 50 %. En este sentido, es necesario continuar con estudios a largo plazo para la calibración y validación de modelos ecofisiológicos que mejoren la capacidad de predecir la respuesta de los árboles bajo diferentes esquemas de manejo silvícola.

El establecimiento de plantaciones forestales con especies de rápido crecimiento es una de las medidas de mitigación del cambio climático implementadas por el Estado Nacional (MAyDS, 2021). En este sentido, varios autores (Stape et al., 2008; Campoe et al., 2016; Binkley et al., 2017) disparan una señal de alerta, ya que esta variabilidad del clima afectaría la productividad y sanidad de las plantaciones de *Eucalyptus* sp. a largo plazo. Si bien, en la presente tesis doctoral, las 3 densidades de plantación son evaluadas con fines energéticos, la densidad media y baja (MD y BD) son compatibles con esquemas de manejo para la producción de celulosa y madera sólida respectivamente. Estos sistemas productivos tienen diferentes turnos de cosecha (4 - 18 años), diferentes rotaciones en función del objetivo de producción, por lo que es de esperar que durante su rotación sufran más de un evento climático extremo (sequía, inundación) pudiendo verse afectado el crecimiento y supervivencia. Mejorar nuestro conocimiento de cómo el *E. grandis* responde a la variación climática es relevante para garantizar la viabilidad a largo plazo de las plantaciones forestales sin comprometer su productividad y sustentabilidad ambiental.

El cambio climático está orientando la investigación ante la necesidad de encontrar respuestas urgentes sobre la capacidad de adaptación de los ecosistemas forestales y las medidas de mitigación posibles. Por ello, es necesario continuar

estudiando el desarrollo de estos sistemas productivos con *Eucalyptus* sp. en estos ambientes marginales de la provincia de Corrientes, contribuyendo a discernir la influencia relativa de los posibles impactos del cambio climático futuro en relación con las actividades productivas regionales para poder planificar un adecuado uso del territorio en un marco de sustentabilidad ambiental.

5.5. Conclusiones

Las plantaciones forestales modifican parámetros del sistema aire-suelo. Dentro de ellas las temperaturas máximas son menores y las mínimas mayores, aumenta la HR ambiente y la temperatura del suelo, sin embargo, disminuyó el contenido hídrico del mismo en forma significativa respecto de lo que sucede fuera de ellas.

Estas modificaciones de los parámetros ambientales dentro y fuera de la plantación forestal son relevante al momento de tomar decisiones respecto al cambio de uso del suelo. La disminución del contenido hídrico del suelo y las modificaciones de otros parámetros ambientales pueden afectar procesos de los ecosistemas naturales.

La variación de los parámetros ambientales entre años influye en el crecimiento del clon *E. grandis*. Según el grado de competencia por recursos (densidad de plantación) diferentes parámetros tienen influencia en el crecimiento con distintos niveles de significancia. El crecimiento se redujo de forma similar en las 3 densidades de plantación, poniendo una señal de alerta, ya sea que produzcamos para energía o madera sólida. La reducción del crecimiento, sin necesidad de llegar a los casos extremos de mortandad, genera serios perjuicios, tanto al productor como al Estado Nacional y Provincial -dado que las plantaciones forestales con especies de rápido crecimiento se encuentran subsidiadas-.

El cambio climático juega un papel importante en las plantaciones de *Eucalyptus* sp., pudiendo afectar su productividad a largo plazo. Mejorar nuestro conocimiento de cómo el *E. grandis* responde a la variación climática es relevante para garantizar la viabilidad a largo plazo de las plantaciones forestales sin comprometer su productividad y sustentabilidad ambiental.

5.6. Bibliografía

Albaugh, J.M., Dye, P.J. y King, J.S. (2013). Eucalyptus and Water Use in South Africa. *International Journal of Forestry Research*, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/852540>

Andivia, E., Fernández, M., Alaejos, J. y Tapias R. (2013). *Consumo de agua de distintas especies leñosas utilizables como cultivos energéticos*. 6° Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz, España.

Arguello Arias, H. (1991). La descomposición de la materia orgánica y su relación con algunos factores climáticos y microclimáticos. *Agronomía Colombiana*, 8(2), 384-388.

Atkin, O.K., Bloomfield, K.J., Reich, P.B., Tjoelker, M.G., Asner, G.P., Bonal, D., Bönisch, G., Bradford, C.G., Cernusak, L.A., Cosío, E.G., Arroyo, D., Crous, K.Y., Domingues, T.F., Duques, J.S., Egerton, J.J.G., Evans, J.R., Farquhar, G., Fyllas, N.M., Gauthier, P.P.G., Gloria, E., Gimeno, T.E., Griffin, K.L., Guerrieri, R., Heskell, M.A., Huntingford, C., Ishida, F.Y., Kattge, J., Lambers, H., Liddell, M.J., Lloyd, J., Lusk, C.H., Martín, R.E., Maksimov, A.P., Maximov, T.C., Malhi, Y., Medlyn, B.E., Meier, P., Mercado, L.M., Mirotnick, N., Ng, D., Niinemets, Ü., O'Sullivan, O.S., Phillips, O.L., Pobres, L., Poot, P., Prentice, I.C, Salinas, N., Rowland, L.M., Ryan, M.G., Sitch, E., Martijón, T., Smith, N.G., Turnbull, M.H., VanderWel, MC., Valladares, F., Veneklaas, E.J., Weerasinghe, L.K., Wright, I.J., Wythers, K.R., JengXiang, Shuang Xiang. y Zaragoza-Castells, J. (2015). Global variability in leaf respiration in relation to climate, plant functional types and leaf traits. *New Phytologist*, 206(2), 614-636.

Bahamonde, H.A., Peri, P.L., Martínez Pastur, G. y Lencinas, M.V. (2009). *Variaciones microclimáticas en bosques primarios y bajo uso silvopastoril de *Nothofagus antarctica* en dos Clases de Sitio en Patagonia Sur*. I congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles. Posadas, Misiones, Argentina.

Binkley, D. y Stape, J.L. (2004). *Sustainable management of Eucalyptus plantations in a changing world. Eucalyptus in a Changing World*. Proc. of IUFRO Conf. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Brasil.

Binkley, D., Stape, J.L., Bauerle, W.L. y Ryan, M.G. (2010). Explaining growth of individual trees: light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1704-1713.

Binkley, D., Campoe, O.C., Gspaltl, M. y Forrester, D.I. (2013). Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. *Forest Ecology and Management*, 288, 5-13.

Binkley, D., Campoe, O., Alvares, C., Carneiro, R., Cegatta, I. y Stape J.L. (2017). The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 405, 271–283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>

Blake, G.R. y Hartge, K.H. (1986). *Bulk Density*. In: A Klute (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Pp. 363- 375. Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.

Callado, C.H., Roig, F.A., Tomazello-Filho, M. y Barros, C.F. (2013). Cambial growth periodicity studies of South American woody species—a review. *IAWA journal*, 34(3), 213-230.

Campoe, C.O., Munhoz, J.S.B., Alvares, C.A., Carneiro, R.L., de Mattos, EM., Ferez, A.P.C. y Stape, J. (2016). Meteorological seasonality affecting the growth of individual trees in forest plantations in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 380, 149-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.048>

Caniza, F. (2016). Silvicultura en la Mesopotamia Argentina. *Revista Chacra*. Recuperado el 20 de enero de 2023 de <https://www.revistachacra.com.ar/nota/silvicultura-en-la-mesopotamia-argentina/>

Carbonero Zalduegui, P. (1984). *Química del suelo y los fertilizantes*. Universidad Politécnica de Madrid, Cátedra XVI, Bioquímica y Química Agrícola.

Chen, J., Saunders, S.C., Crow, T.R., Naiman, R.J., Brosofske, K.D., Mroz, G.D., Brookshire, B.L. y Franklin, J.F. (1999). Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape Ecology. *Bioscience*, 49, 288-297.

Chen, C.R., Condrón, L.M., Davis, M.R. y Sherlock, R.R. (2003). Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 177, 539-557.

Drew, D.M., O'Grady, A.P., Downes, G.M., Read, J. y Worledge, D. (2008). Daily patterns of stem size variation in irrigated and unirrigated *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiology*, 28(10), 1573-1581.

FAO (Food and Agriculture Organization). (1987). Efectos ecológicos de los Eucaliptos. Publicación electrónica, ISBN: 92-5-302286-8. Roma, Italia. Recuperado el 25 de febrero de 2018 de <http://www.fao.org/docrep/016/ap415s/ap415s00.pdf>

Ferreras, L.A., Costa, J.L. y García, F.O. (1999). Temperatura Y contenido hídrico del suelo en superficie durante el cultivo de trigo bajo dos sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*, 17(2).

Gómez Sanz, V. (2004). Cubiertas forestales y respuesta microclimática. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 84-100.

Gudelj, O., Arce, J. y Gudlej, V. (2018). *Metodología de muestreo y determinación de agua del suelo*. INTA Ediciones. ISSN: 2250-8511.

Gyenge, J. y Fernández, M.E. (2018). *Consumo de agua de las forestaciones. Relación con el ambiente y manejo silvícola*. Programa Nacional Forestales - PNFOR1104073. ISSN: 2545-7195. Hoja Informativa N° 8.

Gyenge, J., Gatica, G., Sandoval, M., Lupi, A.M., Gaute, M., Fernández, M.E. y Peri, P.L. (2024). Change of soil carbon storage in monoculture tree plantations across

wide environmental gradients: Argentina as a case study. *Forest Ecology and Management*, 552, e121565. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121565>

Jandl, R. (2005). Secuestro de carbono en bosques - El papel del suelo. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1).

Jobbagy, E. y Jackson, R.B. (2004). Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology*, 10(8), 1299-1312.

Lidón Cerezuela, A.L., Lado Monserrat, L., Llinares Palacios, J.V., Bautista Carrascosa, I. y Galiana Galán, F. (2008). Efecto de diferentes tratamientos selvícolas sobre la temperatura del suelo en un pinar de carrasco. *Cuadernos De La Sociedad Española De Ciencias Forestales*, 25. <https://doi.org/10.31167/csef.v0i25.9691>

Martiarena, R. (2016). *Efecto de la disponibilidad de recursos sobre la eficiencia de uso y conservación de los nutrientes en función de las condiciones edafoclimáticas, edad y manejo de las plantaciones de Pinus taeda L. en la Mesopotamia Argentina*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/52446>

Milione, G.M., Mujica, C.R., Bea, S.A. y Gyenge, J.E. (2020). Evaluación del impacto hidrológico de una forestación de *Eucalyptus viminalis* Labill. en un ambiente típico de la llanura Pampeana, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 119 (2), 1-14. <https://doi.org/10.24215/16699513e056>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2019). Plan de acción nacional de agro y cambio climático. Versión 1. Recuperado el 12 de febrero de 2019 de https://www.magyp.gob.ar/sitio/pdf/plan_sectorial_cc.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). Buenos Aires, Argentina. 342 pp.

Muñoz, A., López-Piñeiro, A., Albarrán, A. y Ramírez, M. (2009). Influencia de la agricultura de conservación en la temperatura del suelo y su relación con las poblaciones microbianas. *Revista de Ciencias Agrarias*, 32.

Nosetto, DM., Jobbagy, E.G. y Paruelo, J.M. (2005). Land use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, 11, 1101-1117.

Nosetto, M., Jobbágy, E., Tóth, T. y Jackson, R. (2008). Regional patterns and controls of ecosystem salinization with grassland afforestation along a rainfall gradient. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2), GB2015.

Nosetto, M.D. y Jobbagy, E.G. (2014). Plantaciones forestales: sus servicios e impactos hidrológicos. *Revista Producción Forestal*, 8(1), 18-20. ISSN: 1853-8096.

Pántano, V.C., Spescha, L.B., Penalba, O.C. y Murphy, G.M. (2014). Influencia de la variabilidad de temperatura y precipitación en la situación hídrica del suelo, en la región oriental de secano de la Argentina. *Meteorológica*, 39(2), 21-36.

Payne, D. y Gregory, P.J. (1992). *La temperatura del suelo*. En WILD, A. (Coord), Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 295-311 pp.

R Core Team. (2019). R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria.

Ryan, M.G., Stape, J.L., Binkley, D. y Alvares, C.A. (2020). Patterns between sites in the response of *Eucalyptus* plantations to irrigation, climate and intra-annual weather variation. *Forest Ecology and Management*, 475, 118444.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2015). Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. "Cambio Climático en Argentina; Tendencias y Proyecciones" (Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera). Buenos Aires, Argentina.

Shimamoto, C.Y., Botosso, P.C., Amano, E. y Marques, M. (2015). Stem growth rhythms in trees of a tropical rainforest in Southern Brazil. *Trees*, 30(1), 99-111.

Stape, J.L., Binkley, D. y Ryan, M.G. (2008). Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 920-930.

Stape, J.L., Binkley, D., Ryan, M.G., Fonseca, S., Loos, R.A., Takahashi, E.N. y Azevedo, M.R. (2010). The Brazilian *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on timber production. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1684-1694.

Tesón, N. (2011). *Balance hidrológico y flujo de nutrientes asociados al agua en plantaciones de Eucalyptus grandis, en Concordia (Entre Ríos)*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo].

CAPITULO 6. Integración: principales resultados y consideraciones

En el presente capítulo se presenta una integración de resultados y se remarcan las principales conclusiones de la tesis. Para ello, se responden una serie de interrogantes sobre estos sistemas intensivos de producción, relacionados con las hipótesis y los objetivos. Estos contribuyen a la comprensión de las implicancias del establecimiento de estos sistemas productivos en un marco de sustentabilidad ambiental.

¿El clon *E. grandis* tiene aptitud / potencial para el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas?

Las plantaciones forestales energéticas tienen como objetivo la obtención de grandes cantidades de biomasa en un corto período de tiempo (Fernández y Lupi, 2016; Arias Aguilar y Guevara, 2017; Resquín et al., 2020). No se requiere características especiales de calidad de madera, aunque la densidad básica y el contenido de lignina, están relacionadas con la producción de energía (Thomaz et al., 2007; Oliveira-Carneiro et al., 2014).

Eucalyptus, dado a su alta productividad, densidad de la madera y de su gran adaptación a distintos sitios, es uno de los géneros forestales más utilizados para el establecimiento de forestaciones energéticas (Vieira Rocha, 2011; Ferreira et al., 2017). Para *Eucalyptus* sp., no se dispone de información sobre producción de volumen y biomasa en esquemas de muy altas densidades de plantación en Argentina (Fernández y Lupi, 2016).

El clon *E. grandis* 2136 evaluado en la presente tesis doctoral, tuvo un buen desempeño bajo diferentes manejos silvícolas, creciendo en las lomas y planicies arenosas de la provincia de Corrientes. Registró un buen establecimiento en las 3 densidades de plantación analizadas (3.333 árboles ha⁻¹, 1.429 árboles ha⁻¹, 909 árboles ha⁻¹), con valores similares de supervivencia (desde 70 % a 86 %) a los reportados en la bibliografía para la región (Aparicio et al., 2018; Aparicio y Maggio, 2018). La productividad volumétrica por hectárea a los 50 meses de edad fue

superior (+20 %) a la publicada por otros autores (Aparicio et al., 2018; Caniza et al., 2018) para similares características de suelos (arenosos) en la provincia de Corrientes.

En lo referido a las propiedades de la madera de interés energético, los valores determinados de densidad básica en las distintas densidades de plantación están dentro de los rangos esperados para *E. grandis* creciendo en la región mesopotámica Argentina (López et al., 2003; Area et al., 2004; Caniza et al., 2008; Aparicio et al., 2011; López y López, 2011; Winck et al., 2013; Monteoliva et al., 2015). El contenido de lignina (Anexo III Tabla 1) fue inferior (5 % - 12 %) a lo publicado por otros autores (Area et al., 2004; Reina Schiavone, 2010; Leal et al., 2011; Gomez et al., 2012; Carneiro et al., 2017; Reina Schiavone, 2018). Posiblemente estas diferencias se deban a la evaluación temprana (50 meses) en la que se realizaron las determinaciones en el marco de esta tesis, comparativamente con los valores de referencia de la bibliografía (Soares et al., 2015).

Fernández y Lupi (2016) estimaron incrementos anuales de biomasa de fuste entre 3,5 Mg ha⁻¹ y 41,8 Mg ha⁻¹ en *Eucalyptus* sp. para el desarrollo de plantaciones dendroenergéticas (1.111 - 3.000 árboles ha⁻¹) en diversas regiones de Argentina. Para el *E. grandis* estimaron incrementos entre 11,1 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 41,8 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con turnos entre 4 y 7 años. El clon 2136 logró incrementos de 18,5 Mg ha⁻¹ año⁻¹, 17 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 13,2 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en los tratamientos de alta (3.333 árboles ha⁻¹), media (1.429 árboles ha⁻¹) y baja (909 árboles ha⁻¹) densidad de plantación a los 50 meses de edad, demostrando un buen crecimiento en estos ambientes de baja fertilidad natural de la provincia de Corrientes. Estos resultados responden con la hipótesis que indica que “La producción de biomasa aérea de una forestación clonal está directamente relacionada con la densidad de plantación. A mayor número de individuos por hectárea, se obtiene mayor producción de biomasa aérea en un corto período”.

En conclusión, el clon de *E. grandis* 2136 tuvo un buen desempeño bajo diferentes manejos silvícolas, creciendo en las lomas y planicies arenosas de la provincia de Corrientes. Demostró aptitud para el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas. Las 3 densidades de plantación evaluadas podrían utilizarse para el establecimiento de plantaciones energéticas.

¿Las plantaciones dendroenergéticas utilizan más nutrientes y agua que las plantaciones forestales convencionales establecidas en estos suelos?

La intensificación de la producción de las plantaciones forestales con fines energéticos implica un uso intensivo del suelo y el paisaje (Fernández y Lupi, 2017). Este uso intensivo responde a la reducción de la rotación, el uso de material genético de alta productividad y la aplicación de técnicas silvícolas que maximizan el crecimiento (Arias Aguilar y Guevara, 2017; Resquín et al., 2020). Dado que las plantaciones forestales se han establecido mayormente en suelos marginales para la agricultura (Aparicio et al., 2005), se presentan como un gran desafío en términos de la sostenibilidad a largo plazo. En la provincia de Corrientes, las lomas y planicies arenosas se caracterizan por ser suelos de baja fertilidad natural (Escobar et al., 1996; Sanabria y Matteio, 2017), por lo que su capacidad productiva podría ser afectada por el establecimiento de estas plantaciones de uso intensivo de los recursos (Young y Steffen, 2008).

En este trabajo determinamos que las altas densidades de plantación (3.333 y 1.429 árboles ha⁻¹) no se diferenciaron de forma significativa en el contenido de materia orgánica, carbono orgánico y stock de nutrientes del suelo a los 50 meses de edad, respecto a la menor densidad de plantación (909 árboles ha⁻¹), la cual, a su vez, es compatible con un esquema de manejo convencional (madera sólida). Esto indicaría, que estos sistemas intensivos de producción no provocarían una mayor demanda de nutrientes del sitio en comparación con los sistemas forestales convencionales establecidos en estos suelos, al menos al considerar la primera rotación y hasta la fecha de evaluación aquí realizada. Nuevos estudios se deberían realizar para determinar el impacto de estos sistemas productivos sobre la fertilidad

del sitio en rotaciones sucesivas. Estos resultados no responden con la hipótesis que indica que “Las plantaciones forestales de alta densidad con fines dendroenergéticos, disminuyen el contenido de nutrientes en el suelo, en relación a las plantaciones convencionales, comprometiendo la capacidad productiva y ambiental de los sitios”.

En lo referido al contenido de agua del suelo, si bien se determinó una disminución en relación al aumento de la densidad de plantación, esta no se diferenció significativamente entre densidades de plantación. Estos resultados responden con la hipótesis que indica que “El contenido de agua del suelo en una forestación está directamente relacionado con la magnitud de la precipitación bruta y con la densidad de la plantación. A mayor número de individuos por hectárea, se reduce el contenido de agua de los suelos”.

En relación a la exportación de nutrientes producto del aprovechamiento del fuste de estos sistemas intensivos (3.333 y 1.429 árboles ha⁻¹), no se diferenció a la de un sistema convencional para la obtención de madera aserrable (909 árboles ha⁻¹). Sin embargo, el tipo de aprovechamiento adoptado para estos sistemas dendroenergéticos es relevante en el mantenimiento de la capacidad productiva del sitio. El aprovechamiento del árbol completo involucra una gran exportación de nutrientes en relación con los otros sistemas de aprovechamiento. La permanencia en el sitio de los residuos de cosecha, ya sean hojas y ramas solamente o también corteza, implica una gran reducción de exportación de nutrientes. Por lo tanto, en estos sistemas intensivos de producción de corta rotación, cobra especialmente relevancia, la adopción de prácticas silvícolas que favorezcan el mantenimiento de la fertilidad y capacidad productiva del sitio, sobre todo en estos ambientes de baja fertilidad natural de la provincia de Corrientes.

En conclusión, las altas densidades de plantación (3.333 y 1.429 árboles ha⁻¹) no implican mayor exportación de nutrientes (en el suelo y la biomasa aérea) y disminución del contenido de agua del suelo respecto a la menor densidad de plantación (909 árboles ha⁻¹). Esto indica que las plantaciones

con fines energéticos, no provocan mayor disminución de la capacidad productiva del sitio en relación a un manejo de silvícola convencional para madera sólida, considerando la primera rotación (4 años). Se recomienda utilizar el sistema de aprovechamiento de fuste sin corteza para la cosecha de plantaciones energéticas.

¿Cuál es el turno de aprovechamiento de las plantaciones con fines energéticas?

Para la determinación del turno de aprovechamiento de estos sistemas productivos energéticos, es relevante conocer la biomasa acumulada y la evolución de los compartimentos con la edad. Esto permite maximizar la producción de biomasa de fuste en el corto plazo, optimizando los sistemas de aprovechamiento forestal y manejo de residuos, en beneficio de mantener la capacidad productiva del sitio (Fernández y Lupi, 2016; Resquín et al., 2022).

La biomasa acumulada de fuste por hectárea se incrementó al aumentar la densidad de plantación y la edad. Fue significativamente diferente a los 12 meses de edad, siendo mayor en AD respecto de MD y BD. A los 50 meses, esas diferencias dejaron de ser significativas.

Se registró un cambio en la proporción de la biomasa de los compartimentos del árbol en relación con la edad. La biomasa de fuste tuvo un aumento en la proporción de la biomasa total a lo largo del período evaluado. A los 50 meses se maximizó la proporción de biomasa de fuste en relación a la biomasa total (88,3 %, 84,8 % y 82,6 %).

Fernández y Lupi (2016) estimaron turnos de aprovechamiento entre 4 y 7 años para el desarrollo de plantaciones dendroenergéticas con *E. grandis* (1.111 – 3.000 árboles ha⁻¹) en regiones de Argentina con balance hídrico positivo. Arias Aguilar y Guevara (2017) indican que el turno de aprovechamiento adecuado para estos sistemas intensivos de producción, es aquel con el que se maximiza el crecimiento medio a lo largo de la vida de la forestación.

Para determinar el turno de aprovechamiento de estos sistemas utilizamos el criterio de cortabilidad de máxima producción continua. En este criterio se fija un turno de forma continua (continuos ciclos productivos), con el fin de producir la mayor cantidad de volumen. El turno se fija en el punto donde la curva del incremento periódico anual (IPA) e incremento medio anual (IMA) se igualan (Hernández Ramos et al., 2016). Observando las curvas de crecimiento de las 3 densidades de plantación (Figura 1), el turno está cercano a los 4 años de edad. Sin embargo, como ya vimos en el capítulo 5, la reducción pronunciada del IPA entre el 3 y 4 año, podría deberse a la disminución de la precipitación y la variación de los parámetros ambientales entre años que influyó en el crecimiento (reducción del IMAB entre años), y no a una cuestión propia del crecimiento de la especie, por lo que es de esperar que el turno de máxima producción continua se alcance en un periodo próximo y/o posterior a las evaluaciones.

Otros autores (Guo et al., 2002; Sixto et al., 2007; Mola-Yudego y Aronsson, 2008; Rodriguez et al., 2013; Sochacki et al., 2013; Tolosana Esteban et al., 2013; Guerra et al., 2014; Morales et al., 2015; Junior et al., 2016; Acuña et al., 2018; Resquín et al., 2018; Moya et al., 2019) han reportado en la bibliografía turnos de aprovechamiento entre 2 - 6 años para el género *Eucalyptus* en Oceanía, Europa, Norteamérica, Chile, Brasil y Uruguay, en densidades de plantación, entre 1.111 - 15.000 árboles ha⁻¹. A su vez, reportaron turnos entre 1 - 4 años para los géneros *Populus*, *Salix*, *Robinia* y *Paulownia*, en densidades de plantación de 5.000 a 33.000 árboles ha⁻¹ en Europa y Norteamérica.

En conclusión, las plantaciones forestales del clon *E. grandis* con fines energéticos tendrían un turno de aprovechamiento cercano a los 4 años, según el criterio de cortabilidad de máxima producción continua. Se recomienda continuar evaluando turnos superiores.

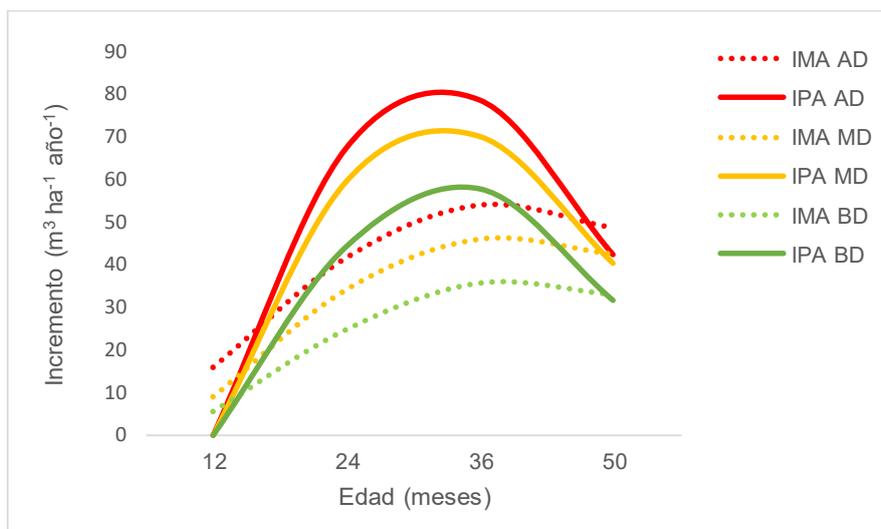


Figura 1. Curvas de crecimiento de volumen (incremento periódico anual (IPA) e incremento medio anual (IMA)) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD).

¿Cuál es la densidad de plantación recomendada para el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas?

Fernández y Lupi (2016) y Resquín et al. (2020) mencionan que las plantaciones forestales con fines energéticos se caracterizan por las altas densidades de plantación involucradas. En este sentido, determinamos que la muy alta densidad de plantación (3.333 árboles ha⁻¹) no registró diferencias significativas en la producción de biomasa de fuste, comparada con densidad menores (1.429 y 909 árboles ha⁻¹) a los 50 meses de edad. Esto indica que se justifica la reducción de la densidad de plantación para la producción de biomasa con fines energéticos, implicando una importante reducción en los costos de establecimiento (Figura 2, Anexo III Tabla 2). Además, con densidades menores de plantación (1.429 y 909 árboles ha⁻¹) el crecimiento individual en volumen y biomasa se duplicó. En las mismas se obtuvieron productos de mayores dimensiones (16 cm DAP) que en la mayor densidad (10 cm DAP). Estas características son favorables, desde el punto de vista de la industria de generación de energía, ya que el abastecimiento con trozas de mayores dimensiones (en la actualidad, se abastecen de residuos de aserraderos y con material de raleo (10 cm de DAP)), mejoraría la operatividad y la

eficiencia del sistema (comunicación personal del jefe de planta de Genergiabio Corrientes S.A.).

Por otra parte, una reducción de la densidad de 1.429 árboles ha⁻¹ a 909 árboles ha⁻¹, no determinó diferencias en el desarrollo individual del árbol, pero si determinó pérdidas en la biomasa acumulada por hectárea (22,8 %) (Figura 3). Por lo tanto, la densidad de plantación de 1.429 árboles ha⁻¹ optimizó el desarrollo individual y la producción de biomasa por hectárea, siendo la densidad de plantación que más alternativas de uso ofrece al poder ser utilizada tanto como biomasa como para aserrado. En un contexto de cambio climático será cada vez más relevante considerar la multifuncionalidad o multipropósito de las plantaciones forestales, permitiendo la obtención de diversos productos forestales (diversificación de la producción) y además cumpliendo otras importantes funciones como fijación de C, regulación el ciclo del agua y el clima, entre otras (Fernández y Gyenge, 2016).

En conclusión, la densidad de plantación de 1.429 árboles ha⁻¹ es recomendada para el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas. La misma optimizó la producción de biomasa de fuste por hectárea y el desarrollo individual, posibilitando la obtención de otros productos forestales, además de la biomasa para energía.

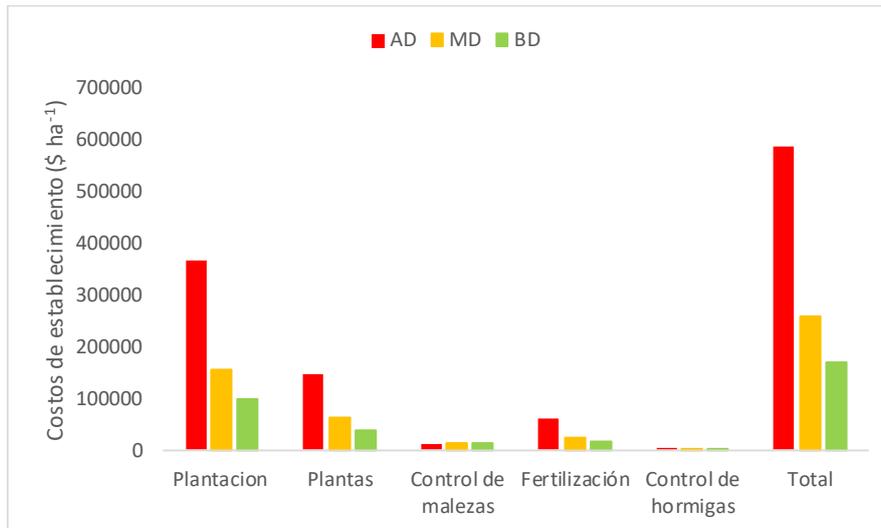


Figura 2. Costos de establecimiento de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD).

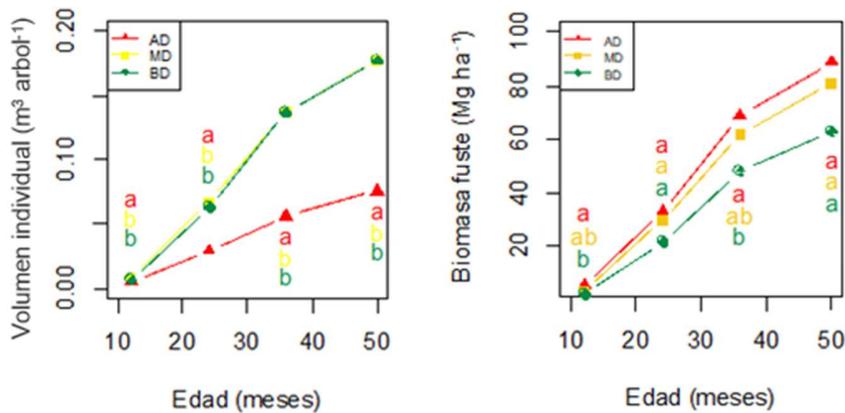


Figura 3. Volumen individual (m³ arbol⁻¹) y biomasa de fuste por hectárea (Mg ha⁻¹) de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) evaluados a los 12, 24, 36 y 50 meses de edad.

Las plantaciones forestales y el cambio de uso del suelo. ¿La variabilidad climática afecta a las plantaciones forestales?

El establecimiento de plantaciones forestales con especies introducidas de rápido crecimiento es una de las medidas de mitigación del cambio climático

implementadas por el Estado Nacional y que presentan cierto grado de desarrollo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). Sin embargo, aún existen interrogantes sobre la sustentabilidad de estos sistemas y las consecuencias del cambio de uso del suelo. En este trabajo determinamos que, más allá de la densidad de plantación, al establecerse una plantación forestal, se produce una modificación de los parámetros del sistema aire-suelo, dentro de ella las temperaturas máximas son menores y las mínimas mayores, aumenta la HR ambiente y la temperatura del suelo, y disminuye el contenido hídrico del mismo en forma significativa respecto de fuera de ella. Estas modificaciones del ambiente son relevantes al momento de tomar decisiones respecto al cambio de uso del suelo, ya que estos cambios pueden afectar procesos estructurales de los ecosistemas naturales. Cuando las plantaciones forestales reemplazan a la vegetación nativa, ya sea arbórea (bosque nativo) o herbácea (pastizal natural), pueden generar grandes impactos ambientales, que se ven reflejados en la pérdida o atenuación de los servicios ecosistémicos que proveen: cambios en el proceso hidrológico, en los flujos de energía, en los ciclos minerales, en la estabilidad y fertilidad de los suelos, en la regulación del clima, entre otros (Chen et al., 1999; Tesón, 2011; Gyenge et al., 2024).

Por otro lado, las plantaciones forestales pueden utilizarse como una herramienta de manejo a nivel de cuenca (Nosetto y Jobaggy, 2014). Los escenarios futuros de cambio climático para la provincia de Corrientes pronostican aumento de temperatura y precipitaciones, aumento del caudal de ríos y ascenso de la napa freática (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015). En este sentido, las plantaciones forestales podrían ser utilizadas para mitigar excesos hídricos en un marco de planificación del uso del territorio (Fernández y Gyenge, 2016).

Además, estas proyecciones de cambio climático también indican un aumento de la variabilidad climática, con una mayor frecuencia de eventos extremos. Esto implica un aumento en la frecuencia e intensidad de sequías y consecuente estrés hídrico (MAGyP, 2019). El clima tiene gran influencia en el crecimiento (Campoe et al., 2016), y en la productividad (Stape et al., 2008) de las plantaciones forestales de

Eucalyptus sp. En este trabajo determinamos que la reducción de la precipitación y la variación de los parámetros ambientales entre años influyó en el crecimiento del clon *E. grandis*, reduciendo el crecimiento del área basal en todas las densidades de plantación en forma similar (33 % - 35 %). Con lo cual, existe una señal de alerta, ya que, la disminución del crecimiento en plantaciones forestales, podría traer serios perjuicios relacionados con la rentabilidad del sistema en sí, no solo para el productor sino también para el Estado. Esto, es independiente de si vayamos a producir madera para usos sólidos o bioenergía. El cambio climático juega un papel importante en las plantaciones de *Eucalyptus* sp., pudiendo afectar su productividad a largo plazo. Por ello, es relevante discernir la influencia relativa de los posibles impactos del cambio climático futuro en relación con las actividades productivas, para poder planificar un adecuado uso del territorio en un marco de sustentabilidad ambiental.

En conclusión, el establecimiento de plantaciones forestales produce modificaciones en el ambiente, sin embargo, pueden ser utilizadas como una herramienta de manejo en un marco de planificación de uso del territorio. La variación del clima afecta el crecimiento de las plantaciones forestales.

Establecimiento de proyectos integrales dendroenergéticos (plantaciones forestales e industria de generación de energía). ¿Es factible y viable el abastecimiento de la industria dendroenergética solamente con plantaciones forestales?

A nivel mundial, el establecimiento de forestaciones dendroenergéticas constituye una de las estrategias utilizadas con el fin de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles (Ipinza y Barros, 2011; Fernández y Lupi, 2016; López Reyes et al., 2016; Resquín et al., 2022).

En la provincia de Corrientes, en la actualidad, existen 2 proyectos de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa forestal, uno ubicado en Santa Rosa, otro

en Gobernador Virasoro. Son proyectos de gran envergadura, instalados gracias a elevadas inversiones internacionales y programas nacionales de apoyo al desarrollo de energías renovables (RenovAR, 2016; Ministerio de Minería y Energía, 2017). Utilizan los residuos de aserraderos y de plantaciones forestales (material de raleo) para la generación de energía eléctrica que inyectan al sistema interconectado nacional (Volpe et al., 2022). En estas zonas la actividad forestal es su principal producción, y los residuos forestales son unas de las principales problemáticas. En este sentido, la generación de energía eléctrica a partir de residuos forestales constituye una solución a la reducción de residuos forestales.

La central térmica Genergiabio Corrientes S.A., instalada en Santa Rosa, utiliza 20.000 Mg mes⁻¹ de residuos y material de raleo de biomasa forestal para la generación de 20 MW (Volpe et al., 2022). En base a las productividades de biomasa de fuste logradas por las densidades de plantación evaluadas, el abastecimiento de la industria solamente con biomasa forestal proveniente de plantaciones (Figura 4), implicaría un aprovechamiento mensual de 260, 280 y 360 ha según las densidades de plantación (AD, MD y BD, respectivamente). Proyectada al año resultaría entre 3.000 ha a 4.300 ha según la densidad de plantación. Entonces, un proyecto de esta índole, requiere entre 12.000 ha a 18.000 ha de forestaciones, manejadas con una rotación continua de 4 años, si el abastecimiento se realizara con biomasa solamente proveniente de plantaciones forestales. Esto indica que la provincia de Corrientes tiene potencial para la instalación de este tipo de proyectos. Cuenta con el recurso, más de 500.000 ha forestadas (CFI, 2018) y 3.000.000 ha de tierras aptas para la forestación (PEFIC, 2013). Sin embargo, surge la incertidumbre sobre la sustentabilidad ambiental de los mismos a escala de cuenca o paisaje, sobre todo en zonas sin tradición forestal, ya que, a estos proyectos dendroenergéticos, si se los abastece solamente con plantaciones, implican el establecimiento de una gran superficie de plantaciones forestales en cercanía a la industria.

En conclusión, las plantaciones forestales con *E. grandis* son una fuente prometedora de biomasa para contribuir al abastecimiento de materia prima de industrias energéticas, sobre todo en zonas de alta actividad forestal (plantaciones, aserraderos, carpinterías, industria, entre otras). Resulta necesario continuar con estudios a escala mayores y en otras regiones de la provincia, con el fin de dilucidar la conveniencia o no, de incorporar y expandir este tipo de proyectos energéticos renovables (plantaciones forestales e industria de generación de energía eléctrica) en otras regiones no forestales.

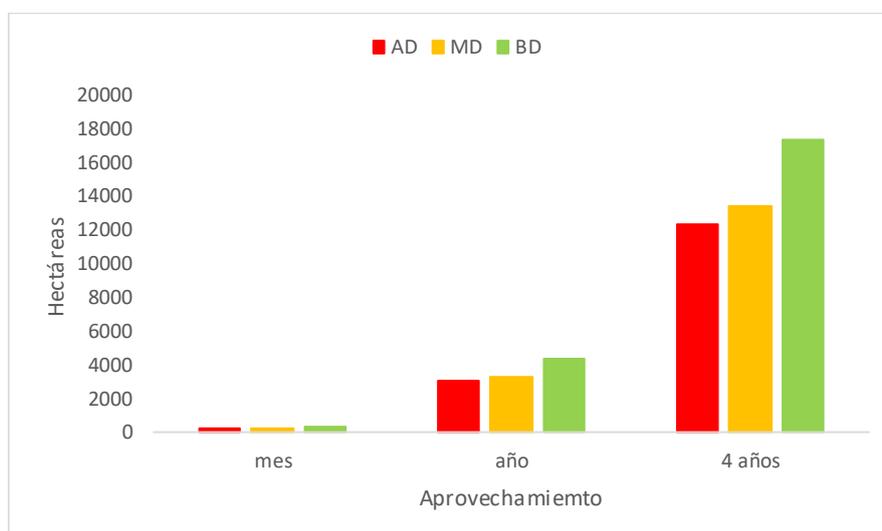


Figura 4. Superficie necesaria de aprovechamiento de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD y BD) para abastecer un proyecto integral de generación de energía de 20 MW.

El impulso a la generación de energías renovables, en particular a partir de la biomasa forestal, son oportunidades para la provincia de Corrientes, ya que cuenta con el recurso y las condiciones climáticas favorables, representando un aporte significativo a la captura de C y contribuyendo a la mitigación del calentamiento global. Además, representa un impulso sectorial y beneficia el desarrollo económico regional. En esta tesis doctoral determinamos que las plantaciones

dendroenergéticas con el clon *E. grandis* son una fuente prometedora de biomasa para la generación de energía. Si bien, los resultados presentados son a nivel de ensayo, aportan información para el conocimiento de estos sistemas productivos, contribuyendo a la toma de decisiones, en pos de una adecuada planificación del uso del territorio en un marco de sustentabilidad ambiental. Aún es escaso el conocimiento sobre el manejo sustentable de plantaciones forestales con fines energéticos en Argentina, por lo que resulta relevante continuar con la evaluación de las mismas. Existen interrogantes sobre su impacto sobre el ecosistema a escala de paisaje, el consumo de nutrientes y agua a nivel de cuenca, costos ambientales ocultos, impacto de las sucesivas rotaciones sobre la capacidad productiva del sitio, tratamientos silvícolas óptimos bajo condiciones edafoclimáticas específicas, manejo de rebrote, entre otros. Será necesario dar continuidad a estas problemáticas, abordando los estudios sobre las plantaciones forestales dendroenergéticas, centrados en factores complementarios a los abordados en esta tesis, por ejemplo: otros clones, sitios, densidades de plantación y turnos de aprovechamientos, manejo del rebrote, entre otros aspectos, con el fin de dilucidar y aportar a un manejo silvícola específico y adecuado para estos sistemas productivos en un marco de sustentabilidad ambiental.

6.1. Bibliografía

Aparicio, J.L. (2001). *Rendimiento y biomasa de Eucalyptus nitens con alternativas nutricionales para una silvicultura sustentable en un suelo rojo arcilloso*. [Tesis de Magister en ciencias, mención silvicultura. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales].

Aparicio, J.L., Larocca, F. y Dalla Tea, F. (2005). Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*. *Idia XXI: revista de información sobre investigación y desarrollo agropecuario*, 5(8), 66-69.

Aparicio, J.L., Caniza, F.J. y Larocca, F. (2011). *Crecimiento y caracteres de la madera de materiales genéticos de Eucalyptus grandis con manejo para uso sólido*

en un suelo malezal. Resultados a los 8 años de edad. Consorcios Forestales Corrientes Norte, Corrientes Centro y Río Uruguay. Informe técnico.

Aparicio, J.L. (2011). *Efecto del manejo de residuos de cosecha de Pinus elliottii en el costo oculto de nutrientes y en el crecimiento de pino híbrido en un suelo arenoso de Corrientes.* XXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Aparicio, J.L., Maggio, A. y Fragueiro, L. (2018). *Control de malezas de Eucalyptus grandis: Respuestas a diferentes anchos de control.* XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Aparicio, J.L. y Maggio, A. (2018). *Respuesta a la fertilización con NPK en 5 clones de Eucalyptus grandis en planicies arenosas de Corrientes.* XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Area, M., Felissia, F., Nuñez, C. y Venica, A.V. (2004). *Estudio comparativo de especies de Eucalyptus y su respuesta al pulpado NSSC.* III Congreso Iberoamericano de Investigación en celulosa y papel. Cordoba, España.

Arias Aguilar, D. y Guevara, M. (2017). *Establecimiento, manejo y aprovechamiento de plantaciones dendroenergéticas.* Universidad nacional de ciencias forestales. Honduras. Informe técnico. 72 pp.

Barth, S.R. (2016). *Efectos de la densidad de plantación sobre la biomasa aérea y las propiedades físico-mecánicas de la madera de Grevillea robusta A. Cunningham.* [Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba].

Bessonart, S., Zabala, J.P., Uguet Vaquer Piloni, J.P. y Vera Bravo, C. (2022). *Boletín de precios de productos y servicios forestales. Zona: Centro y Sudoeste de Corrientes (agosto 2022).* INTA, SAGyP. Publicación técnica.

Campoe, C.O., Munhoz, J.S.B., Alvares, C.A., Carneiro, R.L., de Mattos, EM., Ferez, A.P.C. y Stape, J. (2016). Meteorological seasonality affecting the growth of

individual trees in forest plantations in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 380, 149-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.048>

Caniza, F.J., Mastrandrea, C., Alberti, S., Aparicio, J.L. y Ingaramo, L. (2008). *Efecto del raleo en la densidad básica de la madera de Eucalyptus grandis*. XXIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Caniza, F. (2016). Silvicultura en la Mesopotamia Argentina. Revista Chacra. Recuperado el 20 de enero de 2023 de <https://www.revistachacra.com.ar/nota/silvicultura-en-la-mesopotamia-argentina/>

Carneiro, A.D.C.O., Vital, B.R., Frederico, P.G.U., Figueiró, C.G., de Freias Fialho, L. y da Silva, C.M.S. (2017). Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 8(3).

Chen, J., Saunders, S.C., Crow, T.R., Naiman, R.J., Brosfokske, K.D., Mroz, G.D., Brookshire, B.L. y Franklin, J.F. (1999). Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape Ecology. *Bioscience*, 49, 288-297.

Chuyong, G., Newbery, D. y Songwe, N. (2000). Litter nutrients and retranslocation in a central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. *New Phytology*, 148, 493-510.

Consejo federal de inversiones (CFI). 2018. *Actualización del inventario forestal de bosques implantados en la provincia de Corrientes*, Argentina. Informe técnico. 45 pp.

Escobar, E.H., Ligier, H.D., Melgar, R., Matteio, H. y Vallejos, O. (1996). *Mapa de suelos de la provincia de Corrientes*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales. EEA Corrientes. 432 pp.

Fernández, M.E. y Gyenge, J. (2016). Árboles y agua: una relación recíproca que tenemos que conocer para orientar el manejo forestal sustentable. Instituto Nacional

de Tecnología Agropecuaria. Recuperado el 19 de julio de 2021 de http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_arboles_y_agua_2016.pdf

Fernández, R. y Lupi, A.M. (2016). *Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en Argentina*. Acuerdo INTA FAO. Ediciones INTA.

Fernández, R. y Lupi, A.M. (2017). *Plantaciones con fines energéticos: Consideraciones tecnológicas y ambientales frente a su implementación*. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Ferreira, M.C., Santos, R.C.D., Castro, R.V.O., Carneiro, A.D.C.O., Silva, G.G.C.D., Castro, A.N.M., Costas, F.L. y Pimenta, A.S. (2017). Biomass and energy production at short rotation *Eucalyptus* clonal plantations deployed in Rio Grande do Norte. *Revista Árvore*, 41 (5), e410504. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000500004>

Gómez, E.A., Ríos, L.A. y Peña, J.D. (2012). Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia. *Información tecnológica*, 23(6), 73-86.

Goya, J.F., Frangi, J.L. y Dalla Tea, F. (1997). Relación entre biomasa aérea, área foliar y tipos de suelos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata, Argentina*, 102(2), 11-21.

Guerra, S.P., Garcia, E.A., Lanças, K.P., Rezende, M.A. y Spinelli, R. (2014). Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. *Fuel*, 137, 360-363.

Guo, L.B., Sims, R.E.H. y Horne, D.J. (2002). Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand.: I: biomass and nutrient accumulation. *Bioresource Technology*, 85(3), 273-283.

Gyenge, J., Gatica, G., Sandoval, M., Lupi, A.M., Gaute, M., Fernández, M.E. y Peri, P.L. (2024). Change of soil carbon storage in monoculture tree plantations across wide environmental gradients: Argentina as a case study. *Forest Ecology and Management*, 552, e121565. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121565>

Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, A., Jesús, J., García-Magaña, H., García-Espinoza, G. G., ... & Hernández-Vargas, J. A. (2016). Turnos técnicos para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. En Hidalgo. Mexico. *Revista Forestal Baracoa*, 35, Número Especial, 1-8.

Ipinza, R. y Barros, S. (2011). *El Cambio Climático, los Bosques y la Silvicultura*. Instituto forestal Chile. Informe técnico. 145 pp.

Junior, H.J.E., de Melo, R.X., Sartori, M.M.P., Guerra, S.P.S. y Ballarin, A.W. (2016). Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 90, 15-21.

Laclau, J.P., Bouillet, J.P. y Ranger, J. (2000). Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Ecología y gestión forestal*, 128(3), 181-196.

Laclau, J.P. (2012). *La nutrición de las plantaciones de eucalipto y su impacto en el suelo*. XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Leal, L.E., Juárez, V. y Terán, M. (2011). Composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden procedente de Finca Las Maravillas, Departamento de Orán, Salta. *Quebracho*, 19(2), 75-83.

López, J.A., Parisi, L.M. y Harrand, L. (2003). *Densidad de la madera de 3 huertos semilleros de progenies de Eucalyptus grandis*. Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

López, A.J. y López, J.A. (2011). *Eucalyptus grandis en el sudeste de Corrientes: Variación de densidad de la madera*. XXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina.

López Reyes, L.Y., Domínguez Domínguez, M., Martínez Zurimendi, P., Zavala Cruz, J., Gómez Guerrero, A. y Posada Cruz, S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera Bosques*, 22(3), 49-60

Martinez Meier, A., Sanchez, L., Pastorino, M., Gallo, L. y Rozenberg, P. (2008). What is hot in tree rings? The wood density of surviving Douglas-firs to the 2003 drought and heat wave. *Forest Ecology and Management*, 256, 837-843.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2019). Plan de acción nacional de agro y cambio climático. Versión 1. Recuperado el 12 de febrero de 2019 de https://www.magyp.gob.ar/sitio/pdf/plan_sectorial_cc.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). Buenos Aires, Argentina. 342 pp.

Ministerio de Minería y Energía. (2017). Programas nacionales de apoyo al desarrollo de energías renovables. Recuperado el 16 de marzo de 2017 de <https://www.minem.gob.ar/energia-electrica/energias-renovables/prensa/26675/entro-en-operaciones-el-primer-proyecto-de-biomasa-forestal-del-renovar>

Mola-Yudego, B. y Aronsson, P. (2008). Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 32(9), 829-837.

Monteoliva, S., Barotto, A.J. y Fernandez, M.E. (2015). Anatomía y densidad de la madera en Eucalyptus: variación interespecífica e implicancia en la resistencia al estrés abiótico. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 114(2), 209-217.

Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuna, E., Mola-Yudego, B. y González-García, S. (2015). Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 99, 239-249.

Moya, R., Tenorio, C. y Oporto, G. (2019). Short rotation wood crops in Latin American: A review on status and potential uses as biofuel. *Energies*, 12(4), 705.

Nosetto, M.D. y Jobaggy, E.G. (2014). Plantaciones forestales: sus servicios e impactos hidrológicos. *Revista Producción Forestal*, 8(1),18-20. ISSN: 1853-8096.

Oliveira-Carneiro, A., Mendes-Castro, A.N., Oliveira-Castro, R., Cavalcante dos Santos, R., Papaspyrou-Ferreira, L., Pereira-Damáso, R. y Rocha-Vital, B. (2014). Potencial energético de la madera de *Eucalyptus* sp. en función de la edad y de diferentes materiales genéticos. *Revista Árvore*, 38(2), 375-381.

PEFIC (Plan estratégico foresto industrial de la provincia de Corrientes). (2013). Informe técnico. Recuperado el 19 de agosto de 2024 de <https://insitu.org.ar/PDF/PEFIC.pdf>

Reina Schiavone, L.M. (2010). Influencia de la composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus globulus* en los parámetros de pulpeo Kraft.

Reina Schiavone, L. (2018). Estudio de la composición química de distintos materiales lignocelulósicos: caracterización de las ligninas y compuestos de alto valor agregado.

RenovAR 2016. Plan de Energías Renovables en Argentina. Recuperado el 22 de abril de 2016 de <https://portalweb.cammesa.com/Documentos%20compartidos/Noticias/RenovAr/RenovAR%20%20Resumen%20Preliminar%20de%20Ofertas%20Recibidas.pdf>

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R.M., Rachid-Casnati, C., Hirigoyen, A., Carrasco-Letelier, L. y Duque-Lazo, J. (2018). Allometry, Growth and Survival of Three *Eucalyptus* Species (*Eucalyptus benthamii* Maiden and Cambage, *E. dunnii* Maiden and *E. grandis* Hill ex Maiden) in High-Density Plantations in Uruguay. *Bosques*, 9(12).

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R., Carrasco-Letelier, L. y Raschid, C. (2019). Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 438, 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.007>

Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R.M., Carrasco-Letelier, L., Casnati, C.R. y Bentancor, L. (2020). Evaluation of nutrient content in biomass of *Eucalyptus* species from short rotation plantations in Uruguay. *Biomass and Bioenergy*, 134, 105502.

Resquín, F., Bentancor, L., Carrasco-Letelier, L., Rachid-Casnati, C. y Navarro-Cerrillo, R.M. (2022). Rotation length of intensive *Eucalyptus* plantations: How it impacts on productive and energy sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 166, 106607.

Rocha, J.H.T., du Toit, B. y de Moraes Goncalves, J.L. (2019). Nutrition with Ca and Mg and its application in *Eucalyptus* and *Pinus* plantations. *Forest Ecology and Management*, 442, 63-78.

Rodríguez, A., Acuña, E., Cancino, J., Muñoz, F. y Rubilar, R. (2013). Evaluación del crecimiento de plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus globulus*, según densidad de plantación y turno de rotación en suelos contrastantes de la región del Biobío, Chile. *Ciencia e Investigación Forestal*, 19(1), 7-18.

Sanabria, M.C. y Matteio, J.P. (2017). *Ecorregión Mesopotámica Corrientes. Sistema productivo: Mixto (Forestal– Ganadero). Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina*. 1a ed. Entre Ríos: Ediciones INTA.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2015). *Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. "Cambio Climático en Argentina; Tendencias y Proyecciones"*. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. Buenos Aires, Argentina. Informe técnico.

Sixto, H., Hernández, M., Barrio, M., Carrasco, J. y Cañellas, I. (2007). Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 16(3), 277-294

Sochacki, S.J., Harper, R.J., Smettem, K.R., Dell, B. y Wu, H. (2013). Evaluating a sustainability index for nutrients in a short rotation energy cropping system. *GCB Bioenergy*, 5(3), 315-326.

Stahringer, N.I., Neves, J.C.L., Paulucio, R.B., Teixeira, J.L., Sussini, P.A., Argüelles, R.T. y Chamorro, L.L. (2018). Recomendación de fertilizantes para *Pinus* y *Eucalyptus* en Corrientes, Argentina utilizando balance nutricional. *IAH Versión Cono Sur*, 14.

Stape, J.L., Binkley, D. y Ryan, M.G. (2008). Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 920-930.

Soares, V.C., Bianchi, M.L., Trugilho, P.F., Höfler, J. y Pereira, A.J. (2015). Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. *Cerne*, 21, 191-197.

Tesón, N. (2011). *Balance hidrológico y flujo de nutrientes asociados al agua en plantaciones de Eucalyptus grandis, en Concordia (Entre Ríos)*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo].

Thomaz, D.T., Magalhães, W.L.E., de Lima, E.A. y da Silva, H.D. (2007). *Poder calorífico da madeira e do carvão vegetal: lignina e carbono fixo como determinantes*. VI Evento de Iniciação Científica da Embrapa Florestas. Brasil.

Tolosana Esteban, E., Ladera Fernandez, J. y Gonzalez Doncel, I. (2013). *Propuestas de gestión de plantaciones de pino marítimo (Pinus pinaster Ait.) y de eucalipto blanco (Eucalyptus globulus Labill) para producción de biomasa para uso energético en Asturias (España)*. 6° Congreso Forestal español. Vitoria Gasteiz, España. ISBN: 978-84-937964-9-5.

Viera, M., Schumacher, M. y Bonacina, D. (2011). Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul, RS. *Revista Árvore*, 35(3), 371-379.

Volpe, M.A., Frechero, M., Casoni, A.I., Gauchat, M.E., Fassola, H.E., Lupi, A.M. y Acevedo, A. (2022). *Análisis de pre-factibilidad para desarrollar un proceso de conversión de residuos de madera de pino*. Instituto de Suelos, INTA. Informe técnico.

Winck, R.A., Fassola, H.E., Barth, S.R., Keller, A.E. y Crechi, E.H. (2013). *Variación de la densidad básica de la madera de Eucalyptus grandis para diferentes edades y zonas agroecológicas de la región mesopotámica*. Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú, Misiones. Argentina.

Young, F. y Steffen, P. (2008). Biocombustibles como estrategia de desarrollo: ¿Rumbo hacia la sustentabilidad o hacia una nueva periferia? *Revista POLIS*, 7 (21), 167-177. <https://doi.org/10.4067/s0718-65682008000200009>

ANEXO I

Tabla 1. Número de individuos evaluados en cada periodo del clon *E. grandis*.

Edad (meses)	Variable	AD			MD			BD		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
12	DAP	21	24	25	20	24	17	25	23	24
	H	21	24	25	20	24	17	25	23	24
	Densidad básica de la madera	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Volumen (cubicación destructiva)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Biomasa (determinación destructiva)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Volumen (estimación con modelo)	21	24	25	20	24	17	25	23	24
	Biomasa (estimación con modelo)	21	24	25	20	24	17	25	23	24
24	DAP	15	24	25	18	21	14	24	17	24
	H	15	24	25	18	21	14	24	17	24
	Densidad básica de la madera	2	2	2	2	2	2	2	2	0
	Volumen (cubicación destructiva)	2	2	2	2	2	2	2	2	0
	Biomasa (determinación destructiva)	2	2	2	2	2	2	2	2	0
	Volumen (estimación con modelo)	15	24	25	18	21	14	24	17	24
	Biomasa (estimación con modelo)	15	24	25	18	21	14	24	17	24
36	DAP	15	24	25	18	21	14	24	17	24
	H	15	24	25	18	21	14	24	17	24
	Densidad básica de la madera	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Volumen (cubicación destructiva)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Biomasa (determinación destructiva)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Volumen (estimación con modelo)	15	24	25	18	21	14	24	17	24
	Biomasa (estimación con modelo)	15	24	25	18	21	14	24	17	24
50	DAP	15	24	25	18	21	14	24	17	24
	H	15	24	25	18	21	14	24	17	24
	Densidad básica de la madera	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Volumen (cubicación destructiva)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Biomasa (determinación destructiva)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Volumen (estimación con modelo)	15	24	25	18	21	14	24	17	24
	Biomasa (estimación con modelo)	15	24	25	18	21	14	24	17	24

R= repetición

Tabla 2. Número de individuos evaluados en cada periodo del clon híbrido X78.

Variable	12 meses		24 meses	
	R1	R2	R1	R2
DAP	21	18	21	18
H	21	18	21	18
Densidad básica de la madera	3	3	2	2
Volumen (cubicación destructiva)	3	3	2	2
Biomasa (determinación destructiva, apeo, pesaje)	3	3	2	2
Volumen (estimación con modelo)	21	18	21	18
Biomasa (estimación con modelo)	21	18	21	18

R= repetición

Tabla 3. Variables consideradas en el estudio de ACP.

Especie	Densidad de plantación	Productividad anual (IMA)	Balace hidrológico	Índice de Martonne	Temperatura media anual	Limitaciones de sitio	Observaciones
<i>E. viminalis</i>	1.500	38,2	200	36,8	13,8	3	Suelos de textura gruesa del sudoeste de Bs. As., alta productividad, sin problemas de drenaje.
<i>E. viminalis</i>	1.500	31,8	200	36,8	13,8	3	Suelos de textura gruesa del sudoeste de Bs. As., alta productividad, sin problemas de drenaje.
<i>E. viminalis</i>	1.500	12,7	200	36,8	13,8	4	Suelos de textura gruesa del sudoeste de Bs. As., baja productividad, sin problemas de drenaje.
<i>E. viminalis</i>	1.111	15,6	250	28,6	16,3	4	Valles serranos y áreas de la llanura del sur y sudoeste de Córdoba. Suelos profundos y bien drenados.
<i>E. viminalis</i>	2.500	18,7	250	28,6	16,3	4	Valles serranos y áreas de la llanura del sur y sudoeste de Córdoba. Suelos profundos y bien drenados.
<i>Populus sp.</i>	27.777	46,3	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Populus sp.</i>	10.000	43,7	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Populus sp.</i>	15.565	35,7	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Populus sp.</i>	6.944	37,3	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Populus sp.</i>	1.111	9,6	250	28,6	16,3	4	Valles serranos y áreas de la llanura del sur y sudoeste de Córdoba. Suelos profundos y bien drenados.
<i>Populus sp.</i>	2.500	12,0	250	28,6	16,3	4	Valles serranos y áreas de la llanura del sur y sudoeste de Córdoba. Suelos profundos y bien drenados.
<i>Salix sp.</i>	20.000	45,0	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	20.000	40,8	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	20.000	36,0	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).

Especie	Densidad de plantación	Productividad anual (IMA)	Balance hidrológico	Índice de Martonne	Temperatura media anual	Limitaciones de sitio	Observaciones
<i>Salix sp.</i>	20.000	41,4	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	20.000	32,6	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos),
<i>Salix sp.</i>	20.000	21,4	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	20.000	18,3	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	20000	13,9	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	20.000	41,3	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	20.000	31,2	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	20.000	43,3	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	20.000	41,8	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, estaquero, Sitio: sistematizado, con adecuado manejo del agua (con drenaje y provisión de agua sin excesos).
<i>Salix sp.</i>	1.600	12,0	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, sitios alta calidad de manejo del agua.
<i>Salix sp.</i>	1.600	6,3	250	42,9	16,3	2	Delta del Paraná, sitios baja calidad de manejo del agua.
<i>Salix sp.</i>	1.600	16,0	250	42,9	16,3	1	Delta del Paraná, sitios alta calidad de manejo del agua.
<i>Salix sp.</i>	1.600	11,1	250	42,9	16,3	2	Delta del Paraná, sitios baja calidad de manejo del agua.
<i>E. grandis</i>	2.500	28,0	500	44,0	21,3	6	Lomadas y planicies arenosas del centro-oste de Corrientes y terrazas del Río Uruguay. (limitantes: susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, baja fertilidad y retención de humedad).
<i>E. grandis</i>	2.500	33,3	500	44,0	21,3	6	Lomadas y planicies arenosas del centro-oste de Corrientes y terrazas del Río Uruguay. (limitantes:

Especie	Densidad de plantación	Productividad anual (IMA)	Balace hidrológico	Índice de Martonne	Temperatura media anual	Limitaciones de sitio	Observaciones
							susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, baja fertilidad y retención de humedad).
<i>E. grandis</i>	2.000	23,8	500	44,0	21,3	6	Lomadas y planicies arenosas del centro-oste de Corrientes y terrazas del Río Uruguay. (limitantes: susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, baja fertilidad y retención de humedad).
<i>E. grandis</i>	3.000	20,0	500	44,0	21,3	6	Lomadas y planicies arenosas del centro-oste de Corrientes y terrazas del Río Uruguay. (limitantes: susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, baja fertilidad y retención de humedad).
<i>E. sp. (clon X78)</i>	3.333	19,3	350	41,9	20,0	6	Lomadas y planicies arenosas del centro-oste de Corrientes y terrazas del Río Uruguay. (limitantes: susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, baja fertilidad y retención de humedad).
<i>E. sp. (clon 2136)</i>	3.333	16,5	350	41,9	20,0	6	Lomadas y planicies arenosas del centro-oste de Corrientes y terrazas del Río Uruguay. (limitantes: susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, baja fertilidad y retención de humedad).
<i>E. grandis</i>	2.500	30,0	350	44,0	21,3	7	Suelos mestizos y arcillosos de Entre Ríos y malezales de Corrientes. (Limitantes: condiciones de hidromorfismo, anegamiento temporario y baja fertilidad en malezales).
<i>E. grandis</i>	2.500	25,0	350	44,0	21,3	7	Suelos mestizos y arcillosos de Entre Ríos y malezales de Corrientes. (Limitantes: condiciones de hidromorfismo, anegamiento temporario y baja fertilidad en malezales).
<i>E. grandis</i>	2.500	15,4	350	44,0	21,3	7	Suelos mestizos y arcillosos de Entre Ríos y malezales de Corrientes. (Limitantes: condiciones de hidromorfismo, anegamiento temporario y baja fertilidad en malezales).
<i>E. grandis</i>	2.500	33,3	900	56,0	21,3	5	Suelos rojos arcillosos de Misiones y noreste de Corrientes y pedregosos de Misiones (limitantes: susceptibilidad a la erosión, y la profundidad efectiva en el segundo grupo).
<i>E. grandis</i>	2.500	41,8	1.100	56,0	21,3	5	Suelos rojos arcillosos de Misiones y noreste de Corrientes y pedregosos de Misiones (limitantes: susceptibilidad a la erosión, y profundidad efectiva en el segundo grupo).
<i>P. taeda</i>	2.500	19,1	1.100	56,0	21,3	6	Suelos bien drenados y con drenaje moderado de Misiones y Corrientes.

Especie	Densidad de plantación	Productividad anual (IMA)	Balace hidrológico	Índice de Martonne	Temperatura media anual	Limitaciones de sitio	Observaciones
<i>P. taeda</i>	2.500	11,1	1.100	56,0	21,3	7	Suelos bien drenados y con drenaje restringido de Misiones y Corrientes.
<i>E. camaldulensis</i>	1.111	16,0	50	30,8	22,5	10	Formosa, suelos de alta productividad (limitantes: fuertes restricciones edáficas, suelos pesados).
<i>E. camaldulensis</i>	1.111	6,5	50	32,0	21,3	11	Chaco – Formosa (limitantes: fuertes restricciones edáficas, suelos pesados).
<i>E. camaldulensis</i>	1.111	3,5	50	23,1	22,5	11	Formosa, suelos de baja productividad (limitantes: fuertes restricciones edáficas, suelos pesados).
<i>E. camaldulensis</i>	1.666	25,7	450	39,1	18,8	11	NOA (limitantes: heladas y la falta de humedad del suelo).
<i>E. grandis</i>	2.500	7,1	200	28,0	21,3	10	Áreas con balance hídrico positivo del centro-este de Chaco y Formosa y Norte de Santa Fe.
<i>E. grandis</i>	1.666	32,5	450	39,1	18,8	11	NOA (limitantes: heladas y la falta de humedad del suelo).
<i>E. grandis</i>	1.666	13,1	450	39,1	18,8	11	NOA (limitantes: heladas y la falta de humedad del suelo).
<i>E. tereticornis</i>	1.111	6,3	50	32,0	21,3	11	Chaco (limitantes: fuertes restricciones edáficas, suelos pesados).

ANEXO II

Tabla 1. Temperatura máxima ambiente (°C) registrados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y la estación meteorológica (EM). Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

Fecha	Tratamientos				p-valor
	AD	MD	BD	EM	
04/2018	28,6 bc	28,1 c	29,3 ab	30,2 a	0,0056
05/2018	22,2 a	21,7 a	22,3 a	23,9 a	0,0991
06/2018		16,8 a	17,4 a	19,0 a	0,1450
07/2018		16,4 a	17,0 a	18,1 a	0,4348
08/2018		20,0 a	20,4 a	21,9 a	0,3110
09/2018	26,1 a	25,4 a	25,8 a	26,7 a	0,8450
10/2018	26,8 a	26,3 a	26,7 a	27,2 a	0,7860
11/2018	29,0 a	28,6 a	29,1 a	29,4 a	0,7990
12/2018	30,1 a	29,5 a	30,5 a	30,8 a	0,6320
01/2019	30,1 a	29,2 a	30,1 a	31,2 a	0,2880
02/2019	29,7 a	29,0 a	29,9 a	31,0 a	0,2420
03/2019	27,1 a	26,2 a	27,1 a	28,4 a	0,0945
04/2019	24,8 ab	23,9 b	24,6 ab	26,4 a	0,0173
05/2019	21,3 ab	20,6 b	21,2 ab	22,7 a	0,0420
06/2019	21,3 a	20,7 a	21,2 a	22,9 a	0,1580
07/2019	18,4 a	17,7 a	18,2 a	19,9 a	0,4340
08/2019	21,6 a	20,8 a	21,3 a	22,7 a	0,4520
09/2019	24,9 a	24,1 a	24,3 a	25,6 a	0,6970
10/2019	27,4 a	26,4 a	26,9 a	27,4 a	0,8621
11/2019	30,4 a	29,5 a	30,1 a	30,9 a	0,4870
12/2019	30,9 a	30,2 a	30,9 a	31,2 a	0,7800
01/2020	32,2 a	31,2 a	31,8 a	32,4 a	0,4680
02/2020	31,7 a		30,9 a	31,7 a	0,4780
03/2020	32,7 a		31,8 a	33,4 a	0,3310

Tabla 2. Temperatura mínima ambiente (°C) registrados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y la estación meteorológica (EM). Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

Fecha	Tratamientos				p-valor
	AD	MD	BD	EM	
04/2018	20,5 a	19,9 a	20,2 a	20,0 a	0,6150
05/2018	15,7 a	15,1 a	15,4 a	15,0 a	0,7969
06/2018		8,9 a	9,3 a	8,8 a	0,8231
07/2018		9,5 a	9,8 a	9,2 a	0,8040
08/2018		8,7 a	8,9 a	8,5 a	0,8080
09/2018	16,6 a	15,8 a	16,1 a	15,9 a	0,8830
10/2018	16,7 a	16,0 a	16,2 a	16,1 a	0,5631
11/2018	19,6 a	18,9 a	19,0 a	19,3 a	0,7510
12/2018	20,7 a	20,1 a	20,3 a	20,3 a	0,9100
01/2019	23,0 a	22,4 a	22,8 a	22,8 a	0,8260
02/2019	21,1 a	20,5 a	20,7 a	20,8 a	0,8730
03/2019	19,1 a	18,4 a	18,6 a	18,5 a	0,7890
04/2019	17,8 a	17,1 a	17,3 a	17,1 a	0,7070
05/2019	16,3 a	15,7 a	16,0 a	15,6 a	0,8030
06/2019	14,6 a	14,0 a	14,1 a	13,5 a	0,8120
07/2019	11,2 a	10,5 a	10,7 a	10,2 a	0,8560
08/2019	11,5 a	10,8 a	11,1 a	10,3 a	0,7600
09/2019	13,5 a	12,8 a	13,0 a	12,1 a	0,5010
10/2019	17,3 a	16,5 a	16,9 a	16,6 a	0,7416
11/2019	20,2 a	19,5 a	19,8 a	19,5 a	0,2048
12/2019	19,7 a	19,0 a	19,1 a	19,1 a	0,7460
01/2020	21,7 a	20,9 a	21,0 a	21,5 a	0,4240
02/2020	20,5 a		19,6 a	19,2 a	0,3550
03/2020	21,4 a		20,5 a	20,0 a	0,1200

Tabla 3. Humedad relativa ambiente (%) registrados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y la estación meteorológica (EM). Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

Fecha	Tratamientos				p-valor
	AD	MD	BD	EM	
04/2018	84,2 a	83,3 a	83,2 a	75,3 b	<0,0001
05/2018	90,7 a	90,1 a	90,2 a	81,7 b	0,0001
06/2018		88,8 a	89,0 a	79,2 b	<0,0001
07/2018		90,3 a	90,6 a	81,1 b	<0,0001
08/2018		75,7 a	77,1 a	68,6 b	0,0096
09/2018	79,3 a	78,8 a	79,7 a	72,4 a	0,1200
10/2018	75,1 a	74,8 a	75,6 a	70,6 a	0,1900
11/2018	76,8 a	76,5 a	77,1 a	70,0 b	0,0192
12/2018	77,0 a	77,6 a	76,8 a	71,0 a	0,1430
01/2019	88,3 a	88,6 a	88,0 a	79,6 b	<0,0001
02/2019	78,7 a	78,9 a	78,7 a	72,0 b	0,0008
03/2019	82,0 a	81,9 a	81,8 a	77,8 a	0,2599
04/2019	88,7 a	89,0 a	88,7 a	80,0 b	<0,0001
05/2019	96,6 a	96,8 a	96,2 a	85,6 b	0
06/2019	90,9 a	89,8 a	90,3 a	77,8 b	<0,0001
07/2019	84,9 a	84,6 a	84,7 a	76,7 a	0,0714
08/2019	77,1 a	76,8 a	77,5 a	69,6 b	0,0013
09/2019	67,6 a	66,6 a	67,6 a	64,8 a	0,8047
10/2019	77,0 a	77,1 a	77,2 a	71,6 a	0,3780
11/2019	76,9 a	76,8 a	76,6 a	71,7 a	0,2207
12/2019	71,4 a	71,2 a	70,8 a	68,9 a	0,8060
01/2020	75,1 a	76,5 a	74,9 a	68,6 b	0,0126
02/2020	75,5 a		73,0 a	74,4 a	0,7789
03/2020	72,4 a		69,4 a	67,5 a	0,6296

Tabla 4. Temperatura del suelo (°C) a los 10 cm de profundidad registrados en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y la estación meteorológica (EM). Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

Fecha	Tratamientos				p-valor
	AD	MD	BD	EM	
04/2018	27,5 a	23,5 c	28,6 a	26,2 b	0
05/2018	24,6 a	20,8 b	24,7 a	21,2 b	<0,0001
06/2018		17,6 b	27,7 a	16,2 c	0
07/2018		17,8 b	25,8 a	15,6 c	<0,0001
08/2018		19,2 b	25,6 a	17,1 b	<0,0001
09/2018	29,2 b	28,3 b	32,0 a	22,4 c	<0,0001
10/2018	31,2 a	27,9 c	30,1 b	24,7 d	0
11/2018	28,4 b	28,2 b	32,0 a	27,4 b	0,0027
12/2018	28,3 b	29,2 b	32,0 a	28,4 b	0,0017
01/2019	27,4 c	28,9 bc	31,1 a	29,4 b	0,0001
02/2019	31,0 b	30,4 b	33,2 a	28,9 b	<0,0001
03/2019	28,4 b	27,4 bc	30,9 a	26,1 c	<0,0001
04/2019	29,1 a	26,4 b	30,5 a	24,2 c	0
05/2019	22,9 b	22,7 b	25,1 a	21,4 c	<0,0001
06/2019	25,7 b	24,1 c	28,9 a	19,5 d	<0,0001
07/2019	26,4 b	23,2 c	29,9 a	16,8 d	0
08/2019	28,4 b	23,3 c	32,0 a	18,5 d	<0,0001
09/2019	33,1 b	25,3 c	36,7 a	21,7 d	<0,0001
10/2019	31,9 b	26,2 c	35,7 a	24,2 c	<0,0001
11/2019	29,9 b	29,9 b	34,6 a	27,9 c	0,0002
12/2019	30,4 bc	31,8 b	34,6 a	28,5 c	<0,0001
01/2020	36,8 b	37,1 b	41,5 a	30,1 c	<0,0001
02/2020	35,9 b		38,9 a	29,6 c	0
03/2020	41,7 a		38,0 b	28,7 c	0

Tabla 5. Contenido hídrico del suelo (mm) de 0 - 30 cm de profundidad evaluado por gravimetría en los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD) y un campo natural (CN).

Fecha	Tratamientos				p-valor
	AD	MD	BD	CN	
04/2018	1,36 c	1,61 c	2,40 b	3,33 a	<0,0001
05/2018	5,10 a	5,15 a	5,49 a	6,28 a	0,2571
06/2018	2,96 b	3,09 b	3,35 b	4,95 a	0,0150
07/2018	0,99 b	1,05 b	1,25 b	3,73 a	<0,0001
08/2018	1,91 c	2,15 bc	3,05 b	6,65 a	0,0077
09/2018	0,98 b	1,06 b	1,21 b	4,86 a	0,0008
10/2018	1,57 b	1,44 b	1,77 b	5,39 a	<0,0001
11/2018	1,13 c	1,43 b	1,32 b	4,87 a	<0,0001
12/2018	1,99 c	2,27 bc	2,69 b	5,25 a	<0,0001
01/2019	5,04 c	5,01 c	6,01 b	11,06 a	0,0079
02/2019	2,67 c	3,00 bc	3,19 b	5,10 a	<0,0001
03/2019	3,26 b	3,41 b	3,45 b	6,03 a	<0,0001
04/2019	2,41 b	2,49 b	2,52 b	6,19 a	0,0334
05/2019	4,88 b	5,06 b	5,40 b	6,82 a	<0,0001
06/2019	5,09 b	4,92 b	5,12 b	7,84 a	<0,0001
09/2019	2,49 b	3,43 b	2,65 b	6,08 a	0
10/2019	1,30 c	1,55 b	1,43 bc	3,51 a	0,0103
11/2019	4,60 b	4,83 b	4,84 b	7,52 a	<0,0001
12/2019	3,98 b	4,16 b	4,16 b	6,16 a	0,0426
01/2020	2,42 b	2,35 b	2,30 b	4,76 a	0
02/2020	1,51 b	1,88 b	2,00 b	4,57 a	0
03/2020	0,63 b	0,63 b	0,59 b	3,42 a	0,0409

ANEXO III

Contenido de Lignina

Cuando se realizó el estudio de biomasa a los 50 meses de edad, se recolectaron seis muestras de fuste al DAP por tratamiento para la determinación del contenido de lignina. Las mismas fueron molidas y enviadas al laboratorio de Tecnología Química (PLAPIQUI, Bahía Blanca). El contenido de lignina se determinó por un método extractivo, desarrollado por el laboratorio. Este método se basa en un procedimiento hidrotérmico. El mismo constituye una alternativa al método clásico empleado para determinar la concentración de lignina (Klason). El tratamiento hidrotérmico fue realizado a las muestras en el reactor Parr a 220 °C, el cual permite la extracción de la gran parte de la hemicelulosa y de la celulosa de las muestras, dejando como remanente una fracción degradada de estos componentes de las maderas.

Una vez secadas las muestras, se realizó su descomposición térmica en atmósfera inerte, mediante la técnica DSC-TGA. La descomposición ocurre en dos etapas. La primera, a menor temperatura, corresponde a la descomposición térmica de la fracción degradada de la hemicelulosa y celulosa, este evento corresponde al pico detectado a 76,74 °C. La segunda etapa de descomposición, en la cual se determina la concentración de lignina, se asocia con el pico a 339,74 °C. De esta forma, la descomposición de la lignina ocurre en un evento separado de los otros componentes de las maderas, permitiendo así su determinación mediante el análisis térmico.

El contenido de lignina fue significativamente superior en el tratamiento AD, respecto de MD y BD (2,9 % y 1,62 %, respecto de los tratamientos MD y BD) (Tabla 1).

Tabla 1. Contenido de lignina evaluado a los 50 meses de edad de los tratamientos de alta, media y baja densidad de plantación (AD, MD, BD). Letras distintas establecen diferencias significativas ($p < 0,05$).

	AD	MD	BD	<i>p</i> -valor
	Media \pm de	Media \pm de	Media \pm de	
Contenido de lignina (%)	20,4 \pm 0,332 a	17,5 \pm 0,258 c	18,8 \pm 0,248 b	<0,0001

de = desvío estándar

Costos de establecimiento

En base al boletín de costos de servicios forestales publicado en agosto de 2022 para la región centro y sur de la provincia de Corrientes (Bessonart et al., 2022), se calcularon en forma aproximada los costos de establecimiento de las densidades de plantación (Tabla 2).

Tabla 2. Costos de establecimiento de las densidades de plantación alta, media y baja (AD, MD y BD).

Actividad, producto	AD	MD	BD
	3.333 árboles ha ⁻¹	1.429 árboles ha ⁻¹	909 árboles ha ⁻¹
Plantación (\$ ha ⁻¹)*	365.558	156.743	99.706
Plantas (\$ ha ⁻¹ **)	148.319	63.591	40.451
Control de malezas (\$ ha ⁻¹ ***)	12.180	12.180	12.180
Fertilización (\$ ha ⁻¹ ****)	60.411	25.901	16.476
Control de hormigas (\$ ha ⁻¹ *****)	1.160	1.160	1.160
Total (\$ ha ⁻¹)	587.658	259.575	169.972

* Incluye las actividades de preparación del terreno, marcación, plantación, fertilización, control de hormigas, control de maleza y reposición de fallas hasta el año de plantado. (no incluye insumos y material de plantación).

** Clon *E. grandis* *** Aplicación total de 4 l ha⁻¹ de glifosato, 2 aplicaciones. **** Fosfato diamónico 100 g pl⁻¹.

***** Fipronil granulado. 2 kg ha⁻¹