

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**USO DE COBERTURAS VEGETALES COMO ALTERNATIVAS AL
CONTROL DE MALEZAS EN PLANTACIÓN DE *Eucalyptus spp***

por

Andrés LAVEGA LESCANO

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2026**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia

“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Dra.) Juana Villalba

Tribunal:

Ing. Agr. (Dra.) Juana Villalba

Ing. Agr. Ricardo Buzzo

Ing. Agr. (Mag.) Luciana Rey

Fecha:

12 de agosto de 2026

Estudiante:

Andrés Lavega Lescano

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi familia. Su apoyo incondicional ha sido mi mayor sostén en este camino y, sin ellos, nada de esto habría sido posible.

A mi directora de tesis, la Ing. Agr. Dra. Juana Villalba, por confiar en mí para este trabajo, así como por su compromiso, dedicación y acompañamiento durante estos años.

Un especial agradecimiento a los Ings. Agrs. Ricardo Buzzo y Emiliano Nessi, al igual que al personal de la empresa Forestal Oriental, por la colaboración, la excelente disposición y el espacio brindado durante el trabajo de campo.

Por último, expreso mi gratitud a la Facultad de Agronomía y a todo el equipo docente por brindarme las herramientas y los conocimientos necesarios para mi formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUCCIÓN.....	9
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 INTERFERENCIA DE LAS MALEZAS EN PLANTACIONES DE EUCALIPTOS	11
2.2 RESPUESTAS A LA ELIMINACIÓN DE LA INTERFERENCIA DE MALEZAS EN EUCALYPTUS	14
2.3 CONTROL DE MALEZAS EN PLANTACIONES DE EUCALIPTOS	18
2.4 CONTROL CULTURAL EN LA FILA DE PLANTACIÓN	19
2.4.1 Cultivos de cobertura.....	19
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1 LOCALIZACIÓN	24
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DE TRATAMIENTOS	24
3.3 METODOLOGÍA DE INSTALACIÓN	25
3.4 DETERMINACIONES.....	26
3.4.1 Evaluaciones de crecimiento de árboles.....	26
3.4.2 Evaluaciones de cobertura	26
3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	27
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 EVALUACIONES DE COBERTURA.....	29
4.2 EVALUACIONES DE CRECIMIENTO DE ÁRBOLES	40
5 CONCLUSIONES.....	50
6 BIBLIOGRAFÍA.....	52

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Descripción de los tratamientos	25
Tabla 2 Regresiones por fecha.....	30
Tabla 3 P-valor del modelo mixto para el efecto de la cobertura de cultivo, tiempo y su interacción	32
Tabla 4 Porcentaje de cobertura promedio por tratamiento y fecha de evaluación	33
Tabla 5 P-valor del modelo mixto para proporción de malezas.....	34
Tabla 6 Parámetros estadísticos sobre el efecto supresor de las especies sembradas obtenidos del SAS	39
Tabla 7 P-valor de los parámetros altura, DAC y Dcopa para cada fecha de evaluación	41
Tabla 8 <i>Promedios de los parámetros altura y DAC para todos los tratamientos a los 4 dpp</i>	42
Tabla 9 <i>Promedios de los parámetros altura y Dcopa para todos los tratamientos a los 105 dpp</i>	43
Tabla 10 Promedios de los parámetros altura y Dcopa para todos los tratamientos a los 133 dpp	45
Tabla 11 <i>Promedios de los parámetros altura, Dcopa y DAC para todos los tratamientos a los 227 dpp</i>	47
Tabla 12 <i>Promedios de los parámetros altura y DAC para todos los tratamientos a los 415 dpp</i>	48
Figura 1 Regresión entre cobertura de malezas (M) y cobertura de las especies sembradas (CC) por fecha.....	31
Figura 2 Regresión entre AUC de malezas y AUC de las especies sembradas	35
Figura 3 Cobertura de malezas y especies sembradas vs tiempo para todos los tratamientos juntos.....	36
Figura 4 Eficiencia de supresión para cada tratamiento	37
Figura 5 Contribución relativa de las especies evaluadas en la reducción de la cobertura de malezas	40

RESUMEN

La producción forestal sostenible enfrenta el desafío de reducir la dependencia de herbicidas de síntesis química para el control de malezas, impulsando la búsqueda de alternativas basadas en el control cultural. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes coberturas vegetales sembradas previo a la plantación sobre el enmalezamiento de la fila de plantación y el crecimiento inicial de *Eucalyptus spp.* El ensayo se llevó a cabo en el establecimiento “El Tembetarí”, propiedad de la empresa UPM Forestal Oriental S.A., ubicado 3 km al sur del kilómetro 68 de la ruta nacional No. 26, en el departamento de Paysandú, Uruguay. Las coberturas vegetales usadas fueron dos especies de gramíneas (*Avena strigosa* y *Lolium multiflorum*) y leguminosas (*Medicago sativa* y *Lotus corniculatus*), en distinta densidad de siembra y combinación de especies, lo que totalizó 13 tratamientos incluyendo al testigo operativo bajo control químico. Durante el período de evaluación se registraron variables dendrométricas (altura, DAC y Dcopa) y el porcentaje de cobertura de cultivos y malezas. Los resultados indicaron que las coberturas vegetales son una herramienta efectiva para la supresión del enmalezamiento, con una capacidad supresora tiempo-dependiente que comenzó a ser significativa a partir de los 66 dpp. Las mezclas de gramíneas con leguminosas resultaron ser la opción más eficiente, siendo la avena la especie con mayor contribución individual al efecto supresor. Sin embargo, se constató una interferencia temprana que probablemente fue por recursos hídricos y nutricionales que limitaron el crecimiento de los árboles. Hacia el final del periodo, el testigo operativo presentó un desarrollo significativamente superior, duplicando en los parámetros dendrométricos evaluados al resto de los tratamientos. Si bien el control cultural mediante el uso de cultivos de coberturas conlleva un costo en el crecimiento inicial del eucalipto, representa una estrategia viable para avanzar hacia sistemas de manejo más sostenibles y alineados con las certificaciones internacionales. Se recomienda profundizar en futuras investigaciones sobre el ajuste de densidades de siembra y el momento de instalación de las coberturas para minimizar la competencia directa con los árboles.

Palabras clave: *Eucalyptus spp.*, control cultural, cultivos de servicios, sostenibilidad forestal

ABSTRACT

Sustainable forest production faces the challenge of reducing dependence on synthetic chemical herbicides for weed control, driving the search for alternatives based on cultural control. The objective of this work was to evaluate the effect of different cover crops sown prior to planting on weed infestation in the planting row and the initial growth of *Eucalyptus* spp. The trial was conducted at the “El Tembetarí” estate, owned by UPM Forestal Oriental S.A., located 3 km south of the 68-kilometer mark of National Route 26 in the Department of Paysandú, Uruguay. The cover crops used consisted of two grass species (*Avena strigosa* and *Lolium multiflorum*) and two legumes (*Medicago sativa* and *Lotus corniculatus*), with varying sowing densities and species combinations, totaling 13 treatments including an operational control under chemical control. During the evaluation period, dendrometric variables (height, RCD, and crown diameter) and the percentage of crop and weed cover were recorded. The results indicated that cover crops are an effective tool for weed suppression, with a time-dependent suppressive capacity that became significant starting at 66 dpp. Grass and legume mixtures proved to be the most efficient option, with oats being the species with the highest individual contribution to the suppressive effect. However, an early interference for water and nutritional resources was observed, which limited tree growth. By the end of the period, the operational control showed significantly superior development, doubling the dendrometric parameters of the remaining treatments. While cultural control through the use of cover crops entails a biological cost in the initial growth of the eucalyptus, it represents a viable strategy to move toward more sustainable management systems aligned with international certifications. Future research is recommended to focus on adjusting sowing densities and the timing of cover crop establishment to minimize direct competition with the trees.

Keywords: *Eucalyptus* spp., cultural control, service crops, forest sustainability

1 INTRODUCCIÓN

El sector forestal en Uruguay ha obtenido un notorio crecimiento luego de ser aprobada la segunda Ley Forestal N° 15.939 en diciembre de 1987, la cual fomenta la protección del bosque nativo y el aumento de la superficie destinada a plantaciones comerciales en suelos con baja productividad para otros rubros agropecuarios (Uruguay XXI, 2025).

Respecto a lo anterior, la relevancia territorial del sector forestal en Uruguay se refleja en el crecimiento ininterrumpido de su masa forestal. Según los Resultados de la Cartografía Forestal Nacional 2024, la superficie efectiva de bosques plantados alcanzó las 1.161.851 hectáreas (6,6% del territorio nacional). Este incremento se complementa con las 847.181 hectáreas de bosque nativo registradas originalmente en 2021 y validadas en el reporte actual, alcanzando una superficie forestal total del 11,5% del país (Dirección General Forestal [DGF], 2024).

El crecimiento se sustenta en el establecimiento de plantaciones comerciales de distintas especies del género *Eucalyptus*, con destino en la producción de pulpa de celulosa y madera sólida (aserrado y debobinado), y del género *Pinus*, enfocado a la producción de aserrado y debobinado. De dichas plantaciones, alrededor del 72% corresponde a *Eucalyptus* y la brecha cada vez se agranda más dado por las condiciones de mercado (Uruguay XXI, 2025).

Uno de los principales manejos silviculturales que se realizan en los predios forestales es el control de malezas, debido a que estas representan un elevado grado de competencia por recursos y espacio en las etapas iniciales del crecimiento de los árboles, causando importantes pérdidas en el crecimiento y rendimiento futuro de la plantación (Pezzutti & Caldato, 2004).

De acuerdo con Assanelli y Godiño (2010), en Uruguay, previo a la plantación se realizan aplicaciones de glifosato en combinación con herbicidas preemergentes en toda el área o solamente en la fila de plantación. Posteriormente a la plantación, se controla principalmente con el uso de herbicidas selectivos en la fila para evitar daños en los árboles en crecimiento, pudiendo éstos ser preemergentes o posemergentes, dependiendo de la condición de emergencia de las malezas.

Por lo general, lo recomendable es mantener un control de malezas hasta el cierre de copa de los árboles, el cual ocurre entre el primer y segundo año de crecimiento.

La forestación en Uruguay está guiada por una política forestal basada en el manejo forestal sostenible, siendo esto determinante para que la mayoría de los bosques plantados en el país obtengan la certificación de las principales certificadoras del mundo, como lo son FSC y PEFC (Uruguay XXI, 2015).

En relación con eso, el control químico de malezas es la alternativa más utilizada pero no es la única opción. Es posible realizar un manejo integrado de malezas incluyendo métodos de control cultural empleando diferentes coberturas vegetales, las cuales podrían frenar el crecimiento de las malezas y de este modo contribuir hacia una producción más sustentable, buscando reducir los impactos negativos sobre el ambiente por el uso de sustancias químicas.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes coberturas vegetales sembradas previas a la plantación en el enmalezamiento de la fila de plantación y su efecto en el establecimiento y crecimiento de *Eucalyptus spp.*

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTERFERENCIA DE LAS MALEZAS EN PLANTACIONES DE EUCALIPTOS

El término maleza no presenta una definición única, y ésta se adecua según el sistema de producción que se esté considerando. Se entiende por malezas, al grupo de plantas que están creciendo en un lugar en el cual no son deseadas, generando un perjuicio en los sistemas productivos. Otra definición en sentido más amplio es el de especies vegetales que son indeseables en determinado lugar y en cierto tiempo, por lo cual es oportuno destacar que las malezas lo son en un determinado lugar y tiempo (Marzocca, 1976, como se cita en Albano Ordeix & Dávila Bottero, 2012).

Gran parte de la productividad de los eucaliptos se determina en la etapa de establecimiento de la plantación. En dicha etapa las técnicas de mayor impacto son la preparación del terreno, el control de malezas y la fertilización, por lo que la aplicación adecuada de cada una de ellas genera un incremento en la productividad, mejora la homogeneidad y beneficia la sustentabilidad (Larocca et al., 2004).

Desde una perspectiva económica y ambiental para la producción forestal, resulta crítico determinar con precisión el período durante el cual las plantaciones deben mantenerse libres de la interferencia de las malezas (Pezzutti & Caldato, 2004).

De acuerdo con Souza et al. (2003, como se cita en da Silva et al., 2012) la interferencia de las malezas con las especies forestales es posible dividirla en tres grupos: a) directa (competencia y alelopatía); b) indirecta (huésped de enfermedades y plagas); c) interferir con actividades productivas.

El establecimiento de los bosques forestales requiere de una buena preparación del suelo y un control eficiente de malezas por lo menos en la fase inicial de crecimiento, ya que los árboles son muy sensibles a la competencia por los recursos del sitio como la luz, el agua y los nutrientes (Tarouco et al., 2009).

Según Pereira et al. (2013) el éxito de las empresas forestales se logra cuando la instalación de los bosques se lleva a cabo correctamente mediante el uso de buenas prácticas agrícolas; entre ellas el manejo de malezas es de gran importancia, ya que la interferencia de las malezas es un factor limitante para el crecimiento de los árboles.

Los cultivos forestales están sujetos a la interferencia de las malezas, lo que se evidencia en un descenso cualitativo y cuantitativo de su producción. Dicha interferencia se debe principalmente a la competencia por los recursos del sitio, los cuales son

indispensables para el crecimiento (Costa et al., 2004, como se cita en Pereira et al., 2012; Toledo et al., 2003).

Según Gonçalves et al. (2000, como se cita en Toledo et al., 2003) durante el primer año de crecimiento los árboles no compiten entre sí por factores de crecimiento como luz, agua, nutrientes y espacio, ya que su sistema radicular explora parcialmente el volumen del suelo, por lo que su crecimiento está limitado por sus propias condiciones fisiológicas y por las malezas.

De acuerdo con Adams (2004) la competencia por recursos es la principal causa de la supresión del crecimiento de las plantas. El autor menciona que esto se denomina “competencia mediada por recursos” donde una planta agota determinado recurso que está limitando a otra.

La interferencia de las malezas en las etapas iniciales del crecimiento del eucalipto genera pérdidas elevadas en la productividad, afectando negativamente variables críticas como la sobrevivencia, la homogeneidad del rodal y el desarrollo en altura y diámetro de los árboles (Aparicio et al., 2018; García et al., 2000; Pitelli y Marchi, 1988, como se cita en Pereira et al., 2013; Tarouco et al., 2009).

Según Kogan (1992, como se cita en Albano Ordeix & Dávila Bottero, 2012) el nivel de competencia que realizan las malezas va a estar determinado por el momento en el que se establecen en la plantación y por características propias de ellas, como el ciclo de vida, su fisiología con relación a si son plantas con metabolismo C3 o C4, hasta incluso pueden ser de tipo parásitas, totales o parciales.

Durante la fase de establecimiento de las plantaciones de eucalipto, particularmente en los primeros dos años, el árbol es altamente sensible a la interferencia de las malezas, especialmente con especies de rápido crecimiento como las gramíneas. Esta interferencia se traduce en una severa competencia por recursos como agua, luz y nutrientes. Además, cuando la competencia sucede bajo condiciones de baja disponibilidad de nutrientes y agua, pueden generarse deficiencias en esta etapa inicial de desarrollo, por lo tanto, se puede justificar el efecto más severo de las malezas durante las primeras etapas de desarrollo de los árboles (Aparicio et al., 2018; Silva et al., 1997, como se cita en Toledo et al., 2003; Toledo et al., 2003; Tarouco et al., 2009).

Respecto a lo anterior, Adams et al. (2003) comentan que, el decaimiento del crecimiento en las plantaciones forestales cuando existe competencia ejercida por malezas se explica porque éstas limitan el acceso de los árboles al agua.

En este sentido, Adams (2004) menciona que la competencia por el agua causa una reducción en la disponibilidad de esta en el suelo debido a la presencia de las malezas. Además, comenta que, en sitios con baja capacidad de almacenamiento de agua, las gramíneas gracias a su sistema radicular pueden hacer que el agua del suelo sea un recurso limitante para los árboles jóvenes.

El nitrógeno y el agua del suelo son dos recursos muy necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas, donde éstos frecuentemente limitan el crecimiento de las plantaciones forestales (Adams, 2004). Al mismo tiempo, el autor señala que más allá de estos dos recursos, la competencia por luz también puede llegar a ser importante.

Las raíces de los eucaliptos recién plantados y de las malezas se ubican en los primeros centímetros del suelo, donde es mayor la disponibilidad de nutrientes (especialmente N y P). Además, los eucaliptos durante los primeros meses compiten débilmente, mientras que otras plantas más agresivas ocupan rápidamente el sitio consumiendo nutrientes y agua, interceptando luz y ocupando espacio, viéndose de esta manera perjudicado el crecimiento de los árboles (Adams, 2004; Larocca et al., 2004).

Además, la presencia de malezas puede disminuir la temperatura del suelo, reduciendo así el crecimiento de las raíces, la actividad microbiana y la mineralización del nitrógeno. En este sentido, en plantaciones de eucaliptos las malezas causaron una reducción del nitrógeno mineral entre un 70 y 84% (Ellis et al., 1985, como se cita en Adams, 2004).

Eyles et al. (2012) mencionan que realizar un control temprano de malezas puede mejorar el crecimiento de las plantaciones forestales al influir en la disponibilidad de agua y nutrientes del suelo.

En este aspecto, las condiciones libres de malezas permiten que los árboles jóvenes capturen recursos del sitio para asegurar un crecimiento temprano de forma rápida (Adams, 2004).

Respecto a lo anterior, da Silva et al. (2012) mencionan que la ventaja de establecer una plantación forestal con áreas libres de malezas en comparación con ningún manejo de la vegetación puede ser que el cierre de copa suceda varios años antes.

Pitelli y Marchi (1991, como se cita en Tarouco et al., 2009) indican que luego de la fase inicial de crecimiento, los eucaliptos estarán bien establecidos y que el cierre de las copas evitará gran parte del crecimiento de malezas.

2.2 RESPUESTAS A LA ELIMINACIÓN DE LA INTERFERENCIA DE MALEZAS EN EUCALYPTUS

De acuerdo con Kogan (1992, como se cita en Montouto Villareal & Cazaban Regusci, 2009) el efecto negativo sobre la plantación es más significativo cuanto más extenso sea el período de interferencia de las malezas, provocando una supresión del crecimiento en los árboles que se intensifica conforme se prolonga la competencia en el sitio.

Por el contrario, Toledo et al. (2003) señalan que lo anterior no es del todo cierto, ya que depende de la época del ciclo del cultivo en que suceda dicho periodo de coexistencia.

De acuerdo con Adams et al. (2003) el momento y la duración de las interacciones árbol – malezas se ve influenciada por la época en la que emergen las malezas con relación al tiempo de establecimiento de los árboles, las tasas de crecimiento y desarrollo de ambos, y la respuesta a la disponibilidad de recursos.

Adams (2004) comenta que, la investigación sobre malezas en plantaciones forestales generalmente está orientada hacia la fase de establecimiento de la plantación donde la competencia puede ser severa.

Larocca et al. (2004) indican que está ampliamente demostrado en estudios realizados en varias partes del mundo el efecto negativo de las plantas competidoras en el crecimiento de los eucaliptos.

En este sentido, Kogan (1992, como se cita en Albano Ordeix & Dávila Bottero, 2012) determinó el intervalo de tiempo que corresponde al período crítico de interferencia (PCI), el cual sucede desde el momento en que las malezas comienzan a interferir hasta aquel punto en que ya causaron el máximo daño.

El autor mencionado anteriormente, sostiene que se ha estimado, que el PCI ocurre en las primeras etapas del crecimiento de la plantación, aproximadamente entre los 20 a 50 días luego del establecimiento del monte. Dicho período coincide con una etapa en la que aumentan los requerimientos de nutrientes y asimilados.

En una investigación llevada a cabo por Toledo et al. (2000) concluyen que, las malezas comienzan a reducir significativamente el crecimiento de las plantas de eucalipto luego de 14-28 días de coexistencia y que debe haber un periodo de 140 días, denominado período total de prevención de interferencias (PTPI), en el cual la plantación

debe mantenerse libre de malezas para garantizar el pleno crecimiento del eucalipto durante el primer año.

La competencia con malezas durante los primeros años de establecimiento del eucalipto provoca una reducción drástica y progresiva en su desarrollo, afectando principalmente el diámetro y la altura de los árboles. Diversas investigaciones coinciden en que estas mermas de crecimiento se intensifican conforme aumenta el periodo de convivencia con la vegetación competidora, registrándose reducciones que oscilan entre el 25% y 70% en el diámetro, y entre el 16% y 68% en la altura, dependiendo de la duración de la interferencia y el tipo de manejo realizado. En general, se observa que el impacto suele ser más severo en el diámetro del fuste que en el crecimiento vertical, evidenciando la alta sensibilidad de la especie a la competencia inicial (Adams, 2004; Adams et al., 2003; Little & Van Staden, 2005; Toledo et al., 2000).

No obstante, algunas investigaciones sugieren que este impacto negativo podría disminuir a largo plazo. Toledo et al. (2003) observaron que, si bien existen reducciones iniciales importantes tanto en altura como en diámetro, estas tienden a atenuarse hacia los 48 meses de edad, con mermas que bajan del 38% al 16%. Según los autores, estos resultados insinúan una tendencia del eucalipto a recuperarse de la interferencia ejercida por las malezas a medida que el rodal avanza en su desarrollo.

Complementando lo anterior, se ha observado que el control de malezas impacta de forma más contundente en el diámetro que en la altura. Esto podría explicarse debido a que, ante la competencia por la luz, los árboles tienden a priorizar el crecimiento vertical en busca de radiación solar, sin reducir significativamente la altura a pesar de la interferencia (da Silva et al., 2012; Eyles et al., 2012).

Little y Van Staden (2005) comentan que, implementar un manejo adecuado de la vegetación permite maximizar el potencial productivo de la plantación, logrando incrementos significativos no solo en el diámetro y la altura, sino también en el volumen comercial por hectárea.

Además del impacto en el diámetro y la altura, la competencia altera profundamente la arquitectura y el vigor de los árboles, provocando reducciones críticas en el área foliar y en la acumulación de materia seca tanto en hojas como en tallos. Se ha observado que, en condiciones libres de interferencia, la producción de materia seca foliar y del fuste es significativamente superior, alcanzando incrementos de hasta un 78% en comparación con árboles que coexisten con la maleza; esto demuestra que

la competencia limita severamente la capacidad de la planta para generar tejidos estructurales (da Silva et al., 2012; Pereira et al., 2013; Tarouco et al., 2009).

Investigaciones realizadas por Little y Van Staden (2005) y Toledo et al. (2003) demuestran que, el impacto negativo de la interferencia se traduce finalmente en una pérdida drástica de la productividad forestal. Se ha demostrado que la convivencia con malezas puede reducir el volumen promedio de madera entre un 62% y 74%, dependiendo de la edad del rodal y la intensidad de la competencia. Por el contrario, la implementación de un manejo adecuado de la vegetación permite obtener ganancias de crecimiento superiores al 60% en madera comercial en comparación con rodales sin control, lo que evidencia el potencial productivo que se recupera al eliminar la competencia.

Más allá del impacto general de la competencia, la magnitud de la respuesta del eucalipto está estrechamente ligada a la estrategia de manejo adoptada y a las características del sitio. Al comparar el control total frente al realizado únicamente en la fila de plantación, se ha observado que la limpieza completa suele determinar un mayor crecimiento en variables como el DAP, altura y volumen comercial. Sin embargo, esta diferencia no es absoluta, ya que la respuesta está condicionada por la capacidad de exploración radicular que permita el suelo. Esto sugiere que un sitio con condiciones óptimas para el desarrollo de las raíces podría mitigar la competencia, permitiendo un crecimiento satisfactorio incluso sin un control total de la superficie (Aparicio et al., 2018).

La competencia por recursos, especialmente el nitrógeno, juega un papel crucial en el crecimiento inicial del eucalipto. Si bien se ha observado que la aplicación de este nutriente puede estimular una respuesta de crecimiento significativa incluso en presencia de competencia (Adams et al., 2003), otras investigaciones sugieren que la fertilización por sí sola no compensa la interferencia de las malezas. En estos casos, variables como el área foliar y la materia seca de hojas y tallos no muestran cambios significativos ante diferentes dosis de fertilizante si la maleza persiste, lo que indica que la vegetación competidora aprovecha el recurso ofrecido con mayor eficiencia que los árboles (Pereira et al., 2012).

La ineficiencia del eucalipto para competir por nutrientes se debe a que la vegetación competidora aprovecha la fertilización nitrogenada de manera mucho más efectiva y rápida que los árboles jóvenes. Este desequilibrio no solo impide que aprovechen el recurso, sino que puede comprometer la supervivencia de la plantación,

especialmente en sitios con baja disponibilidad hídrica donde el crecimiento acelerado de las malezas intensifica el estrés sobre los árboles, transformando un beneficio potencial en un factor de mortalidad (Adams, 2004; Prado & Barros, 1989).

En contraposición, los mayores beneficios de la fertilización se obtienen únicamente cuando existe un control efectivo de la competencia. Se ha demostrado que, en rodales libres de malezas, el eucalipto responde positivamente a la nutrición adicional, logrando maximizar su diámetro y la acumulación de materia seca tanto en hojas como en tallos al absorber eficientemente los recursos del suelo (Pereira et al., 2012; Prado & Barros, 1989).

De acuerdo con Adams (2004) y Eyles et al. (2012) la competencia por nitrógeno ha sido identificada como el factor determinante en la reducción del crecimiento inicial del eucalipto, dado que la vegetación competidora agota rápidamente las concentraciones de este nutriente en el suelo. Esta limitación se refleja directamente en el estado nutricional de los árboles. Se ha observado que, durante el primer año, los árboles bajo un control efectivo de malezas presentan niveles de nitrógeno foliar significativamente superiores en todas las posiciones de la copa en comparación con aquellos en competencia. No obstante, la respuesta a la fertilización tras la liberación de malezas puede ser lenta, ya que el árbol requiere un sistema radicular más desarrollado y apto para aumentar la captura de nutrientes, transformándola en un aumento del área foliar y crecimiento general, lo que impulsa directamente la productividad final del rodal.

La competencia por el agua representa, en diversas regiones, el principal factor limitante para el establecimiento de rodales jóvenes. Se ha demostrado que la presencia de gramíneas agota rápidamente la humedad del suelo, intensificando el estrés hídrico en los árboles y afectando su crecimiento. Fisiológicamente, este estrés inhibe las tasas de expansión foliar, lo que deriva en una disminución del índice de área foliar y de la interceptación de luz, reduciendo drásticamente el desarrollo general de los árboles (Adams, 2004).

Adams (2004) asegura que, la eliminación de malezas se traduce en una mejora inmediata de las relaciones hídricas de los árboles al incrementar la disponibilidad de agua en el suelo. A medida que la plantación avanza hacia su segundo año, el desarrollo de un sistema radicular más profundo permite al eucalipto acceder a reservas hídricas inaccesibles para la competencia, lo que mitiga progresivamente los efectos del estrés hídrico. En este escenario, la dinámica de competencia se transforma. Mientras que en condiciones secas el agua y el nitrógeno representan limitaciones simultáneas, en sitios

con humedad disponible es la competencia por nitrógeno la que se convierte en el factor determinante para el crecimiento.

La recuperación del crecimiento tras la eliminación de la competencia suele ser un proceso lento, lo que sugiere que los árboles suprimidos tienen una capacidad limitada para responder de forma inmediata a la mejora en las condiciones del sitio. Aunque esta respuesta puede potenciarse mediante la fertilización nitrogenada, los árboles no logran transformar la mayor disponibilidad de nutrientes en un rápido crecimiento aéreo. Es probable que, inicialmente, el árbol asigne la mayor parte de sus recursos al desarrollo del sistema radicular para explorar el perfil del suelo en profundidad, priorizando la captura de recursos limitados antes de manifestar un incremento significativo en la biomasa aérea (Adams, 2004).

2.3 CONTROL DE MALEZAS EN PLANTACIONES DE EUCALIPTOS

En la actualidad, el manejo se realiza mediante la integración de métodos químicos, mecánicos y culturales, aplicados de forma aislada o combinada. Entre las herramientas más empleadas se encuentran el uso de herbicidas, la implementación de coberturas vegetales y el uso de maquinaria como desmalezadoras y rotativas para el control físico de la vegetación (Da Ponte Canova & Salas, 2009; Toledo et al., 2003).

Respecto al uso de herbicidas, Chorbadjian y Kogan (2001) indican que, para lograr un efectivo control de malezas, se deben tener en cuenta factores como una adecuada dosificación, el volumen de aplicación apropiado, el estado de desarrollo más vulnerable de la maleza y la calidad del agua a utilizar en las aplicaciones.

En el rubro forestal, al igual que en otros cultivos, se utilizan herbicidas preemergentes y posemergentes para el combate de malezas. Dentro de los preemergentes más comunes se encuentran el s-metolaclor, isoxaflutole y oxifluorfen; mientras que, entre los posemergentes, el más utilizado es el glifosato, aunque también se emplean otros como haloxifop y clopyralid (UPM Forestal Oriental, 2023).

Con el objetivo de controlar las malezas en plantaciones de *Eucalyptus spp.* en Uruguay, se realiza un control en la fila o en área total (fila y entrefila) previo a la plantación mediante el uso de glifosato en combinación con otros herbicidas preemergentes. Para este fin, son muy utilizados productos con un prolongado periodo

de residualidad, que resulten selectivos para el eucalipto y posean un amplio espectro de control para las malezas más habituales en plantaciones forestales (Villalba, 2010).

También se llevan a cabo controles de malezas en posplantación, ya sea en área total o solo en la fila, dependiendo del manejo de la empresa y la situación específica de enmalezamiento. Dado que en este momento los árboles ya están en crecimiento, se utilizan herbicidas preemergentes y posemergentes selectivos para *Eucalyptus spp.* en la fila, evitando así efectos fitotóxicos. Por otro lado, si se realiza control en la entrefila con glifosato, las aplicaciones deben hacerse con extrema precaución, generalmente protegidas y en ausencia de viento para evitar daños por deriva hacia la plantación (Villalba, 2010).

2.4 CONTROL CULTURAL EN LA FILA DE PLANTACIÓN

2.4.1 Cultivos de cobertura

A pesar de la eficacia de los herbicidas, la tendencia actual en la gestión forestal se orienta hacia la reducción de la carga química, impulsando la búsqueda de estrategias más integradas y menos dependientes de insumos sintéticos. Este cambio responde a la creciente preocupación por el impacto ambiental y a la necesidad de cumplir con estándares internacionales de certificación que exigen prácticas más sostenibles.

A nivel mundial, existe una alta dependencia de un número reducido de principios activos para el control de malezas, lo cual ha favorecido la aparición de genotipos resistentes. Esta situación demanda un incremento en la frecuencia de las aplicaciones y en las dosis utilizadas para mantener la eficacia del control, intensificando con ello el impacto ambiental asociado (Shaner, 2014).

La producción forestal no es ajena a esta situación, empleando tradicionalmente el control químico mediante la aplicación de herbicidas como metodología principal. Para afrontar esta problemática, es primordial optimizar el uso de los recursos naturales mediante la implementación de medidas de manejo más sostenibles. En este sentido, surge la necesidad de adoptar un Manejo Integrado de Malezas (MIM), donde el control químico deje de ser la única opción y se complemente con diversas prácticas que, en conjunto, logren disminuir la interferencia de las malezas.

De acuerdo con Porta (2021) los cultivos de cobertura tienen la capacidad de reducir significativamente las poblaciones de malezas con un bajo impacto ambiental. Debido a esta eficiencia, son una herramienta clave para ser incorporada dentro de los programas de manejo integrado, ofreciendo una alternativa sostenible al control químico tradicional.

En la agricultura actual, los cultivos que se siembran durante los períodos de barbecho y que no tienen un fin de cosecha comercial han comenzado a denominarse “cultivos de servicios” (Pinto et al., 2017). Aunque el uso de cultivos con objetivos distintos a la producción, como es el caso de los cultivos de cobertura, existe desde principios del siglo XX, hoy en día hay un interés creciente en adoptar el término de cultivos de servicios para resaltar los beneficios ecosistémicos que estos aportan al sistema.

Con el propósito de fomentar el manejo sostenible de los bosques, organizaciones internacionales como el Forest Stewardship Council (FSC) han establecido restricciones rigurosas sobre el uso de herbicidas. Estas normativas buscan mitigar los riesgos potenciales a la salud humana y minimizar el impacto en el ambiente y los cuerpos de agua, tanto superficiales como subterráneos (Forest Stewardship Council [FSC], 2021).

Ante estas exigencias, los cultivos de cobertura se han consolidado como una de las alternativas más relevantes para el manejo de malezas y la reducción del uso de herbicidas. En este sentido, Porta (2021) observó que, su inclusión permite reducir significativamente el impacto ambiental en comparación con los barbechos químicos tradicionales, al disminuir el número de aplicaciones de herbicidas necesarias durante el ciclo.

A nivel mundial existe la combinación de distintos cultivos que comparten espacio y tiempo, donde a esta modalidad de producción se la conoce como cultivos asociados o asociación de cultivos.

Respecto a lo anterior, la asociación de cultivos consiste en sistemas complejos donde dos o más especies vegetales son sembradas en una misma superficie de terreno durante todo o parte de su ciclo, con la suficiente proximidad espacial que genera una competencia o complementación (Tamayo Ortiz & Alegre Orihuela, 2022).

Según Tamayo Ortiz y Alegre Orihuela (2022) la siembra de cultivos asociados se realiza desde épocas antiguas en América Latina y actualmente es posible encontrarla en territorios que realizan agricultura campesina.

Acerca de los cultivos de cobertura, hay información principalmente a nivel agrícola y muy escasa sobre forestación, ya que estos cultivos son utilizados frecuentemente en las producciones agrícolas. En este sentido, suelen sembrarse en los períodos de barbecho entre cultivos, es decir no conviven con el cultivo principal. Por el contrario, en el rubro forestal la implementación de cultivos de cobertura no es una práctica habitual, de hecho, son muy pocas las experiencias que se llevan a cabo. Además, en las plantaciones forestales, los cultivos de cobertura conviven con los árboles del rodal por un tiempo determinado (Guevara Bonilla et al., 2018).

En forestación existen también los sistemas agroforestales (SAF), en donde los árboles se combinan en un mismo sitio con cultivos herbáceos (agrícolas o pasturas) o animales, ya sea en arreglos espaciales o en secuencias en el tiempo, lo cual permite diversificar la producción y optimizar los efectos benéficos de las interacciones entre los componentes del sistema (Nair, 1993).

En nuestro país lo más frecuente es el sistema silvopastoril, el cual es un tipo de SAF donde se combina la producción forestal con las pasturas y los animales en la misma unidad de manejo (rodal o sitio).

Aunque el uso de cultivos de cobertura es muy frecuente en la agricultura y en el rubro forestal sean muy pocas las experiencias, sí es posible llevarlo a cabo.

Los cultivos de cobertura brindan numerosos beneficios, dentro de éstos, uno de los de mayor relevancia es sin duda, la capacidad de controlar el enmalezamiento. En este sentido, los principales mecanismos mediante los cuales reducen la presencia de malezas son la competencia por agua y nutrientes, así como también por medio del efecto “mulch” de la cobertura, lo cual genera un menor crecimiento debido a una reducción en la intercepción de luz (Brust et al., 2014).

Porta (2021) indica que, además de atenuar la presencia de malezas, el uso de cultivos de cobertura presenta otros beneficios como controlar la escorrentía y reducir la erosión.

Los cultivos de cobertura también pueden aumentar la materia orgánica del suelo (MOS) y mejorar la estructura de este. Además, Erenstein (2002, como se cita en Porta, 2021) señala que, entre los beneficios se encuentran el aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y de la actividad microbiana del suelo.

Según Morales et al. (2022) los beneficios proporcionados por los cultivos de cobertura se relacionan con las especies utilizadas. En relación con eso, las leguminosas aportan nitrógeno al suelo mediante la fijación biológica. Mientras que las

gramíneas producen grandes cantidades de biomasa, reducen la erosión del suelo, absorben nitratos residuales y los devuelven en forma de N orgánico.

Asimismo, los cultivos de cobertura permiten reducir las aplicaciones de herbicidas, convirtiéndose en una herramienta fundamental para generar un menor impacto negativo sobre el ambiente.

De acuerdo con Pound (1999), utilizar cultivos de cobertura en sistemas de producción con especies perennes, no solo es un método que controla el enmalezamiento, sino que además reduce los costos de plantación debido a un menor requerimiento de mano de obra para el control de malezas, y aporta nutrientes al suelo mejorando la fertilidad de estos, lo cual se verá reflejado en un mayor desarrollo de los árboles.

Por más que el control de malezas en forestación se puede realizar mediante métodos químicos, mecánicos o manuales, también puede llevarse a cabo culturalmente por medio de la utilización de restos de cosecha y cultivos de cobertura. En el caso de los restos de cosecha, previo a la plantación pueden ser despejados hacia la entrefila y frenar el crecimiento de las malezas por falta de luz y espacio, además de ser un gran aporte de nutrientes al suelo mediante su posterior descomposición.

Por otro lado, los cultivos de cobertura son sembrados con el objetivo de cubrir el suelo para protegerlo de efectos erosivos y, además pueden integrarse junto con el cultivo principal.

Según Guevara Bonilla et al. (2018) los cultivos de cobertura tienen la capacidad de suprimir a las malezas, por lo cual pueden utilizarse como un método alternativo de control sin afectar el crecimiento de los árboles. Además, recomiendan combinar distintos métodos de control de malezas y utilizar los cultivos de cobertura solo en la fila de plantación para reducir de esa manera los costos de establecimiento y mantenimiento.

Morales et al. (2022) mencionan que, los cultivos de cobertura normalmente se componen de una mezcla de especies de distintas familias, siendo las leguminosas, gramíneas y crucíferas las más utilizadas. A su vez, comentan que los cultivos de cobertura multiespecie aportan mayores beneficios que los cultivos de cobertura monoespecíficos.

En este trabajo se utilizaron especies de gramíneas y leguminosas, en diferentes combinaciones. Las gramíneas utilizadas fueron *Avena strigosa* (avena negra) y *Lolium multiflorum* (raigrás anual); en ellas destaca su rápido crecimiento y capacidad de competencia ejerciendo un mayor control frente a las malezas que otras familias. Es

importante resaltar que por dichas características puede afectar también el crecimiento de los árboles, pero la ventaja es que al ser plantas anuales cumplen su ciclo vital en pocos meses y se desecan naturalmente o es posible controlarlas de manera más sencilla que las malezas, usando graminicidas. También al desecarse, éstas no van a consumir agua y por ende no competirían con el eucalipto por recursos, pero sí continuarían ejerciendo control sobre las malezas ya que la cobertura seca sobre el suelo podría frenar el crecimiento de estas por la ausencia de luz (Kaspary et al., 2020).

Por otra parte, las especies de leguminosas utilizadas en el ensayo fueron *Medicago sativa* (alfalfa) y *Lotus corniculatus* (lotus). En este caso, a diferencia de las gramíneas, no son muy buenas competidoras y la razón de su uso está pensada más a largo plazo debido al aporte de nitrógeno que puede brindar esta familia de plantas mediante la fijación biológica.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN

El ensayo se llevó a cabo en el establecimiento “El Tembetarí”, propiedad de la empresa UPM Forestal Oriental S.A., ubicado 3 km al sur del kilómetro 68 de la ruta nacional No. 26, en el departamento de Paysandú, Uruguay.

La realización de este fue durante el periodo de abril de 2021 a diciembre del mismo año.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DE TRATAMIENTOS

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con 3 repeticiones para cada tratamiento. La parcela experimental correspondió a 3 filas con 6 árboles cada una, con una distancia entre arboles de 2,4 m y un ancho de fila (zona laboreada y por tanto de siembra) de 1,5 m, lo que totalizaba un tamaño de 64,8 m² para cada parcela experimental.

Las coberturas vegetales usadas fueron 2 especies de gramíneas y leguminosas, en distinta densidad de siembra y combinación de especies, lo que totalizó 13 tratamientos incluyendo al testigo operativo (Tabla 1). La aplicación de Dolomita fue diferencial y se ajustó según los requerimientos de cada leguminosa base, incluyendo tratamientos con y sin enmienda para una misma combinación de especies y densidades con el fin de comparar sus efectos.

Tabla 1
Descripción de los tratamientos

Trat.	Especie 1	Kg/ha	Especie 2	Kg/ha	Detalles	Dolomita (kg/ha)	SPT (kg/ha)
1	-	-	-	-	Testigo operativo	-	-
2	Alfalfa	20	-	-		4300	239
3	Alfalfa	40	-	-		4300	239
4	Alfalfa	20	Avena negra	50		4300	239
5	Alfalfa	20	Raigrás	25		4300	239
6	Lotus corniculatus	12	-	-		2200	108,7
7	Lotus corniculatus	24	-	-		2200	108,7
8	Lotus corniculatus	12	Avena negra	50		2200	108,7
9	Lotus corniculatus	12	Raigrás	25		2200	108,7
10	Avena negra	50	-	-		-	
11	Raigrás	25	-	-		-	
12	Lotus corniculatus	12	Avena negra	50		-	108,7
13	Lotus corniculatus	12	Raigrás	25		-	108,7

3.3 METODOLOGÍA DE INSTALACIÓN

El ensayo se instaló en una plantación de otoño de *Eucalyptus grandis*, para lo cual se llevó a cabo la preparación del sitio mediante un despejado de los residuos que quedan de la cosecha, y luego se realizó el laboreo del suelo, mediante una pasada de excéntrica y subsolador a 35 cm de profundidad, el 5/4/21.

Además, se realizó control de malezas preplantación el 26/4/21 con aplicación de glifosato (1440 g ea/ha) + s-metolaclor (2,1L de producto comercial/ha) en área total (fila + entrefila), para el testigo operativo. En los demás tratamientos (2 al 13) se aplicó únicamente glifosato (1440 g ea/ha), también en área total.

Por otro lado, los días 23/4/21 y 26/4/21 se hicieron aplicaciones de Dolomita en la fila de plantación en 1,5 m de ancho según lo indicado para cada tratamiento. Posteriormente se efectuó la siembra de las coberturas vegetales al voleo (también en la fila), la cual se llevó a cabo durante los días 28/4/21 y 29/4/21. En el área se instaló un pluviómetro en el sitio experimental para contar con datos de precipitaciones.

La plantación se realizó el 3/5/21 y se estableció en un marco de plantación de 2,4 m de distancia entre árboles y 3,2 m de distancia entre filas. El material genético

utilizado fue el clon XGRA 2341. Además, con la plantación, se llevó a cabo una fertilización starter para la cual se utilizó un fertilizante de liberación controlada en base a N y P.

Por otra parte, los tratamientos con leguminosas fueron fertilizados, luego de la siembra, con Superfosfato Triple (00-46-00), en diferentes dosis según la especie.

Posteriormente a la plantación, en el testigo operativo se hicieron dos aplicaciones de mantenimiento en la fila, según el manejo que la empresa realiza en sus plantaciones. Las mismas fueron a los 81 días posaplicación (dpa) de herbicidas preplantación (16/7/21) y 170 dpa (13/10/21). Para ambas se utilizaron herbicidas pre y posemergentes selectivos para eucalipto.

Además, el 15/9/21 (a los 140 días postsiembra) se aplicó cletodim (1L de producto comercial/ha) en los tratamientos 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 un graminicida selectivo para eucaliptos solamente en la fila con la finalidad de controlar las gramíneas sembradas, sin afectar a las leguminosas, las cuales se mantuvieron vivas.

3.4 DETERMINACIONES

3.4.1 Evaluaciones de crecimiento de árboles

Las determinaciones de crecimiento se realizaron a los 4, 105, 133, 227 y 415 días posplantación (dpp).

Estas consistieron en la medición de diámetro a la altura del cuello (Dac), diámetro de copa (Dc) y altura total de los árboles.

3.4.2 Evaluaciones de cobertura

Las evaluaciones de cobertura fueron realizadas a los 29, 66, 88, 148 y 225 días posplantación.

Se realizó una estimación visual del porcentaje de cobertura de las especies sembradas y de las malezas presentes en la fila de plantación, para lo cual se utilizó un rectángulo de 1m x 0.3 m, al cual se lo dividió en 4 partes iguales, quedando así 4 cuadrantes de 25 x 30 cm.

El rectángulo se lanzó 3 veces por fila en la primera evaluación (29 dpp) y 2 veces por fila en las mediciones restantes. Totalizando un lanzamiento de 9 veces por

parcela para la evaluación realizada a los 29 dpp y uno de 6 veces por parcela para las evaluaciones restantes.

Es importante destacar que en la evaluación realizada a los 148 dpp, no se evaluó la tercera fila en el bloque 1 de los tratamientos con gramíneas (4, 5, 8, 9, 10, 11, 12 y 13) por lo que el lanzamiento total fue de 4 veces únicamente en dicho bloque y tratamientos.

Se utilizaron los cuadrantes 2 y 3 para estimar el porcentaje de cobertura en el centro de la fila, que es el área objeto de este análisis.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para analizar la relación entre los cultivos de cobertura sembrados y las malezas en la fila de plantación, se agruparon los datos recogidos de todas las especies sembradas y las malezas todas juntas. Se realizó una regresión, primero para todas las fechas en conjunto, debido a la debilidad del análisis, se decidió realizar la regresión por fecha.

Luego se realizó un el análisis de modelo mixto, que permite el control de la dependencia temporal, variabilidad entre parcelas y dinámica del cultivo, usando mediciones repetidas.

También se analizó el área bajo la curva de los componentes cultivos de cobertura y malezas a lo largo del ciclo de crecimiento de los árboles desde la plantación hasta los 225 dpp. Para ello se integró las distintas coberturas para las distintas fechas de evaluación.

Para conocer cuál de las especies sembradas como cultivo de cobertura que componían la cobertura en el surco tuvo más peso en la cobertura general se realizó un análisis a través de modelo mixto generalizado.

Las mediciones de altura y DAC iniciales fueron analizados ajustando un modelo lineal mixto. Cuando se detectaron diferencias entre tratamientos, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significación de $p \leq 0,05$.

En el caso de las evaluaciones posteriores debido a la heterogeneidad en el número de árboles producto del daño que ocasionaron ciervos en el área experimental, el análisis se realizó también ajustando un modelo lineal mixto, pero considerando

tratamiento como efecto fijo y bloque y árbol como efectos aleatorios. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significación de $p \leq 0,05$.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 EVALUACIONES DE COBERTURA

La hipótesis de trabajo es que la cobertura que realizan las especies sembradas reduce la cobertura de malezas. Para ello se confeccionó un indicador de cobertura de cultivo, donde se agrupó todas las especies, para lo cual se tomó las evaluaciones de % cobertura en el centro de la fila.

Debido a que el análisis de todas las fechas juntas no mostró una relación lineal significativa ($R^2 = 0.0008$), se procedió a realizar regresiones individuales para cada fecha de evaluación (Tabla 2). Este análisis permitió identificar que la supresión de malezas no fue constante a lo largo del ciclo, sino que varió con el estado de desarrollo y establecimiento del cultivo.

Al analizar cada fecha por separado, se observó que a los 29 DPP, la pendiente fue positiva y no significativa, lo cual indicó que en esa etapa inicial tanto el cultivo como las malezas están emergiendo simultáneamente sin interferirse. Sin embargo, la supresión de malezas por efecto del cultivo sembrado comenzó a ser significativa recién a partir de los 66 DPP, acentuándose hacia los 88 y 225 DPP.

Este comportamiento era el esperado, ya que durante los primeros dos meses las especies sembradas se encontraban en una fase de crecimiento inicial enfocada en el desarrollo radicular y la cobertura aérea era aún escasa, dejando porciones de suelo desnudo que fueron aprovechados por las malezas. A partir de los 66 DPP, los cultivos de cobertura lograron un desarrollo foliar suficiente para empezar a sombrear el suelo y competir efectivamente por recursos. Hacia los 88 y 225 DPP, el desarrollo foliar de las especies generó una interferencia mucho más fuerte, logrando finalmente la reducción de malezas que se buscaba en la hipótesis inicial.

Tabla 2
Regresiones por fecha

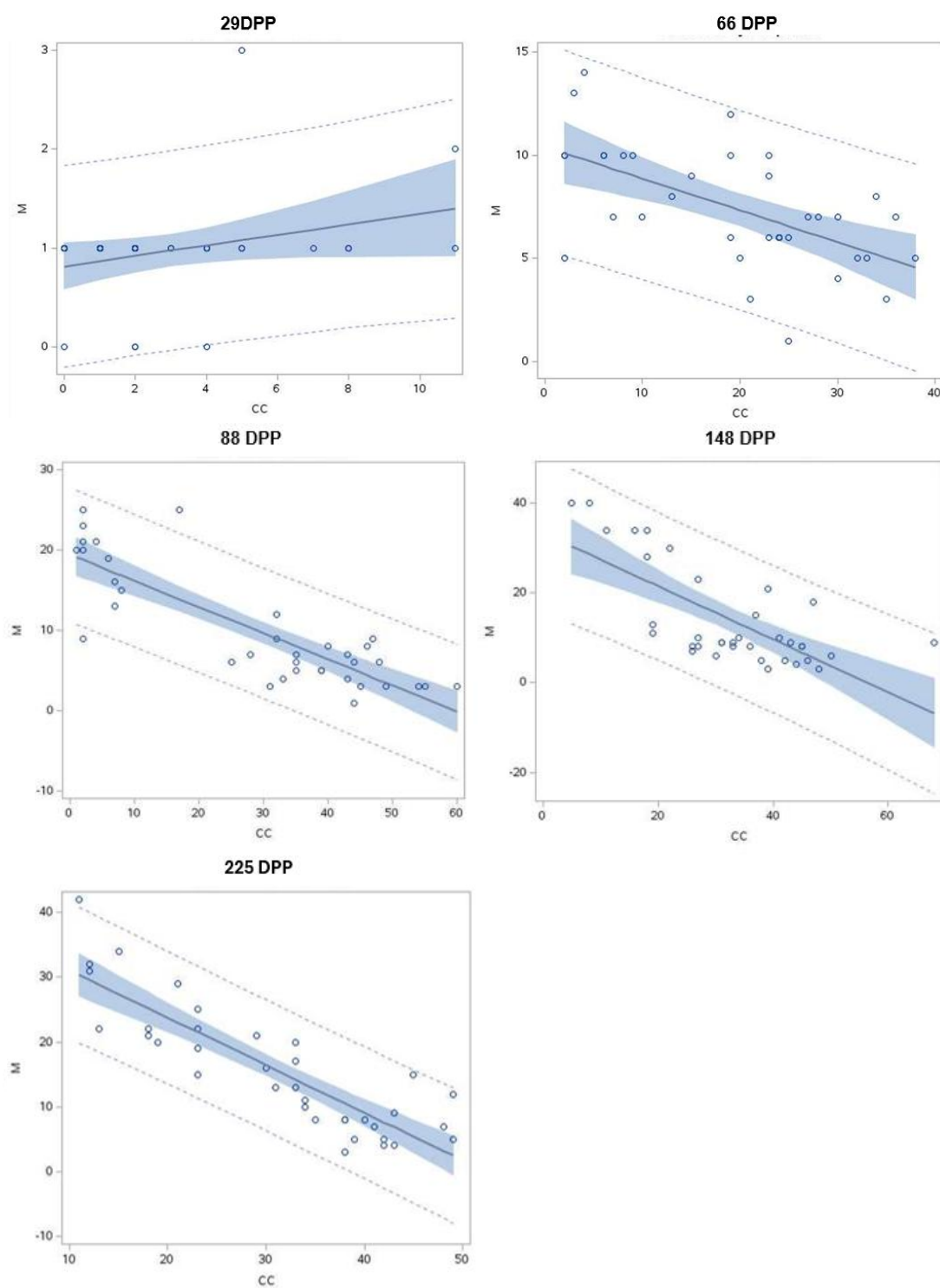
Fecha	Pendiente	p-valor	R ²
29 DPP*	positiva	0,0682	0,094
66 DPP	negativa	0,0001	0,349
88 DPP	negativa	0,0001	0,713
148 DPP	negativa	0,0001	0,505
225 DPP	negativa	0,0001	0,753

Nota. *DPP: días posplantación.

A continuación, se presenta una figura donde se observa la regresión entre el porcentaje de cobertura de malezas y de los cultivos de cobertura para las diferentes fechas de evaluación.

Figura 1

Regresión entre cobertura de malezas (M) y cobertura de las especies sembradas (CC) por fecha



Nota. M: porcentaje de cobertura de malezas; CC: porcentaje de cobertura de todas las especies sembradas. DPP: días posplantación.

Lo mencionado anteriormente se aprecia visualmente en la Figura 1, donde a los 29 DPP se observó una regresión positiva entre la cobertura de malezas y las especies sembradas, lo cual indicó la ausencia de un efecto supresor en esta etapa. Esto se debe a que los cultivos se encontraban en una fase de establecimiento, presentando un mínimo desarrollo foliar que resultó insuficiente para interceptar la luz o competir por el espacio, lo que permitió la coexistencia con las malezas en el sitio sin generar interferencia.

Sin embargo, a partir de los 66 DPP y hasta la última fecha de la evaluación (225 DPP) hubo un cambio en la pendiente volviéndose negativa, lo que evidenció el efecto supresor progresivo de la cobertura de las especies sembradas sobre la cobertura de malezas. En este sentido, a medida que el porcentaje de cobertura del cultivo aumentó, la cobertura de malezas disminuyó de forma proporcional. Este efecto fue particularmente marcado a los 88 y 225 DPP, donde se evidenció que el desarrollo foliar alcanzado por los cultivos de cobertura fue el factor determinante para regular la presencia de malezas, respaldando la eficacia del control cultural.

A partir de los resultados obtenidos, se pudo observar en las gráficas que el efecto supresor de los cultivos varió para cada fecha de evaluación. Es por esto por lo que a continuación, se presenta la tabla 3 con los valores de significancia del modelo mixto para el efecto de la cobertura de los cultivos sobre las malezas, así como los correspondientes datos observados en el campo (Tabla 4).

Tabla 3

P-valor del modelo mixto para el efecto de la cobertura de cultivo, tiempo y su interacción

Factor	p-valor
Cobertura de especies sembradas (CC)	0.0370
Tratamiento	0.0001
DPP	0.0001
CC x DPP	0.0001

Tabla 4*Porcentaje de cobertura promedio por tratamiento y fecha de evaluación*

Tratamiento	29 DPP (%)	66 DPP (%)	88 DPP (%)	148 DPP (%)	225 DPP (%)
T2	1,3	3,3	2,7	11,3	13,3
T3	0,7	6,3	5,0	16,0	16,0
T4	5,3	25,0	33,7	30,0	33,3
T5	5,0	31,7	47,3	44,0	35,7
T6	0,0	7,0	3,7	33,3	24,7
T7	2,0	9,3	8,7	44,7	30,7
T8	6,0	22,0	32,7	36,0	43,0
T9	3,7	33,0	47,0	46,3	44,7
T10	3,0	17,0	36,0	21,3	23,0
T11	3,7	22,3	43,7	34,3	24,7
T12	1,7	23,7	36,3	29,3	41,7
T13	3,3	32,3	50,7	43,0	42,0

Nota. T2: Alfalfa 20 kg/ha + Dol.*; T3: Alfalfa 40 kg/ha + Dol.; T4: Alfalfa + Avena + Dol.; T5: Alfalfa + Raigrás + Dol.; T6: Lotus 12 kg/ha + Dol.; T7: Lotus 24 kg/ha + Dol.; T8: Lotus + Avena + Dol.; T9: Lotus + Raigrás + Dol.; T10: Avena; T11: Raigrás; T12: Lotus + Avena; T13: Lotus + Raigrás. *Dol.: Dolomita.

Como se indicó previamente el efecto supresor varió para cada fecha de evaluación; dicha supresión de malezas dependió del momento del ciclo del cultivo de cobertura. En este sentido, a los 29 DPP los cultivos estaban en etapas iniciales de su crecimiento por lo que el porcentaje de cobertura lógicamente fue menor. Sin embargo, la cobertura de malezas también fue baja, pero en este caso debido al control químico realizado previo a la plantación.

A partir de los 66 DPP los cultivos comenzaron a cubrir más la fila debido a su propio crecimiento y desarrollo, generándose con el paso del tiempo mayor competencia por los recursos y de esa manera supresión en el crecimiento de las malezas. Debido a las características de los cultivos utilizados, esto es más representativo en etapas iniciales en los tratamientos de gramíneas ya que estas especies se destacan por su rápido crecimiento y capacidad de competencia.

Desde los 88 DPP hasta los 225 DPP, lo mencionado previamente se evidencia más fuertemente, debido a que el desarrollo de los cultivos (leguminosas y gramíneas) fue mayor, generando esto una mayor capacidad de competir por recursos con las malezas, deteniendo notablemente su crecimiento y por ende el porcentaje de cobertura de estas.

Es importante resaltar que las gramíneas utilizadas son anuales y que, tras la finalización química de su ciclo de crecimiento, los restos generan un efecto “mulch” que aún ejerce control sobre las malezas debido a la ausencia de luz en la superficie de suelo. En este sentido para los 225 DPP en los tratamientos con especies de gramíneas, debido a la aplicación de graminicida, la cobertura sobre el suelo estaba seca, frenando el crecimiento de malezas.

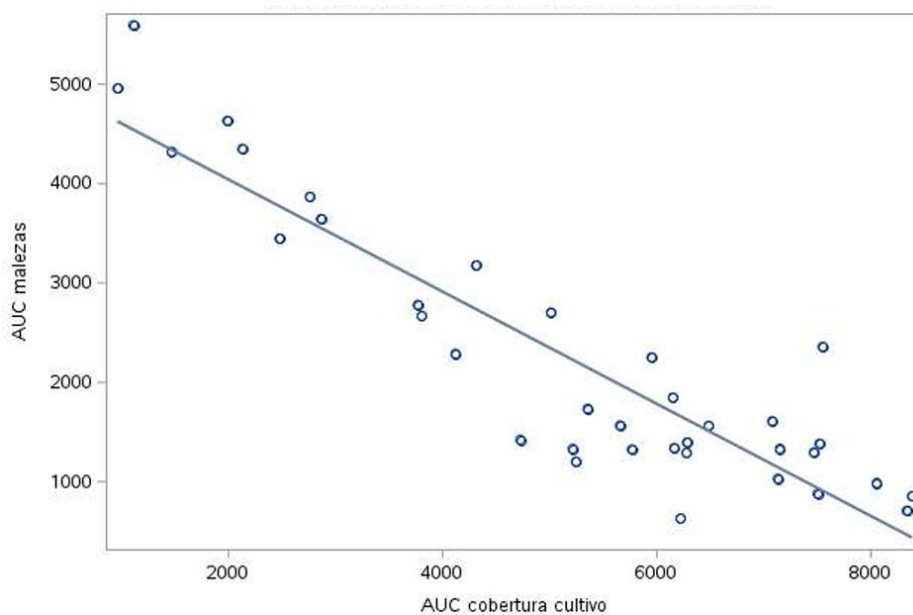
En función de los resultados obtenidos se pudo evidenciar que la capacidad supresora de las especies sembradas aumentó a lo largo del ciclo de estas.

El efecto supresor de los cultivos de cobertura también es respaldado por el análisis de la proporción de malezas, el cual reveló una interacción estadísticamente significativa entre la cobertura de especies sembradas (CC) y los días ($p = 0.0001$). Esto sugiere que a medida que crece la cobertura de los cultivos, menor proporción es ocupada por las malezas. En la siguiente tabla se presentan los valores de significancia del modelo mixto para la proporción de malezas.

Tabla 5
P-valor del modelo mixto para proporción de malezas

Factor	p-valor
Cobertura de especies sembradas (CC)	0.0001
Días	0.0004
CC x días	0.0001

Otra forma de analizar el comportamiento de las coberturas de cultivos y malezas a lo largo del ciclo de crecimiento de los árboles es el área bajo la curva de cada componente. En ese sentido, el área bajo la curva (AUC) representa el crecimiento acumulado a lo largo del tiempo. Es por esto por lo que, a continuación, se presenta la Figura 2 en la cual se observa la regresión entre las AUC de malezas y cultivo.

Figura 2*Regresión entre AUC de malezas y AUC de las especies sembradas*

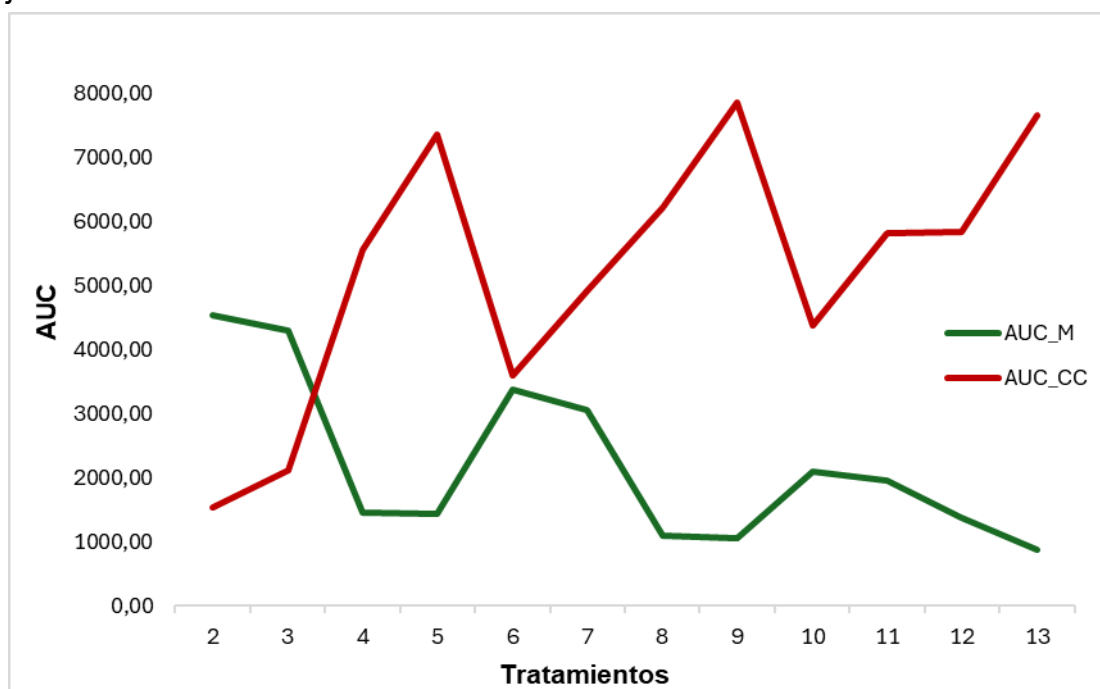
Nota. AUC malezas: área bajo la curva de malezas. AUC cobertura cultivo: área bajo la curva del cultivo.

Al observar el gráfico de área bajo la curva (AUC) de cultivo y maleza se aprecia que presentaron una relación negativa muy clara, donde las parcelas con mayor acumulación de cobertura de cultivo tuvieron menor acumulación de maleza durante el ciclo.

A continuación, se observa en la Figura 3 cómo fue la cobertura de los cultivos y las malezas en cada tratamiento en el tiempo, lo cual puede explicar la tendencia mencionada anteriormente.

Figura 3

Cobertura de malezas y especies sembradas vs tiempo para todos los tratamientos juntos



Nota. AUC_M: área bajo la curva de malezas. AUC_CC: área bajo la curva del cultivo (coberturas sembradas). T2: Alfalfa 20 kg/ha + Dol.*; T3: Alfalfa 40 kg/ha + Dol.; T4: Alfalfa + Avena + Dol.; T5: Alfalfa + Raigrás + Dol.; T6: Lotus 12 kg/ha + Dol.; T7: Lotus 24 kg/ha + Dol.; T8: Lotus + Avena + Dol.; T9: Lotus + Raigrás + Dol.; T10: Avena; T11: Raigrás; T12: Lotus + Avena; T13: Lotus + Raigrás. *Dol.: Dolomita.

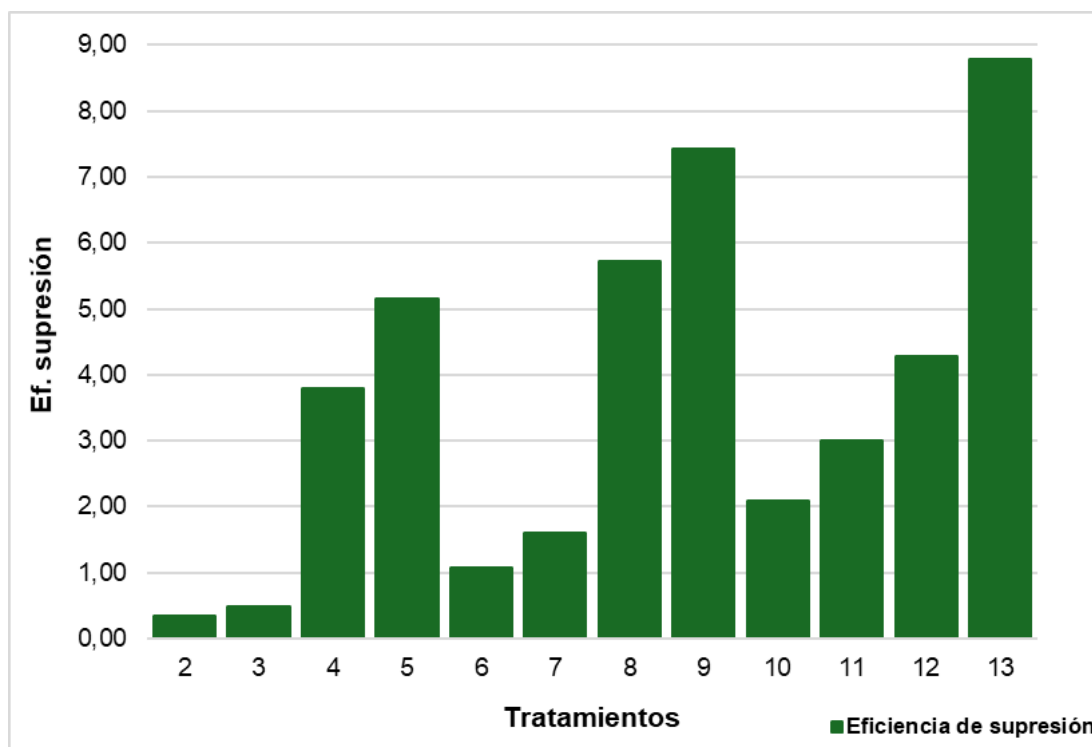
El área bajo la curva (AUC) representa el crecimiento acumulado a lo largo del tiempo, en esta gráfica se visualiza claramente cómo frente a un mayor desarrollo acumulado de los cultivos (coberturas sembradas) se observaron menores desarrollos en la cobertura de malezas. En este sentido, se destacan tres tratamientos con la máxima capacidad de acumulación de cobertura (T5, T9 y T13), donde el AUC_CC presentó los valores más altos del ensayo y, por consecuencia directa, el AUC_M exhibió los desarrollos más limitados. Esta marcada supresión, además de la competencia por recursos, podría estar asociada quizá a efectos alelopáticos de las especies sembradas.

Los únicos tratamientos donde no se observó efecto supresor de los cultivos, fueron el T2 y T3. En estas parcelas, el crecimiento acumulado de las malezas a lo largo del ciclo superó al de las especies sembradas. Este comportamiento se explica porque dichos tratamientos estuvieron conformados únicamente por alfalfa, especie que posee un establecimiento inicial lento que limita su aptitud competitiva y su uso estaba pensado más hacia el mediano y largo plazo para el aporte de nitrógeno.

Lo mencionado anteriormente se puede evidenciar mediante el cálculo de un indicador llamado eficiencia de supresión, el cual refiere a la capacidad de una cobertura vegetal para controlar malezas. Dicho indicador se realiza teniendo en cuenta el AUC de los cultivos de cobertura y el AUC de maleza. En este sentido, eficiencia de supresión= AUC_{CC} / AUC_M . A continuación, se presenta la Figura 4, donde se observa un ranking de este para cada tratamiento.

Figura 4

Eficiencia de supresión para cada tratamiento



Nota. T2: Alfalfa 20 kg/ha + Dol.*; T3: Alfalfa 40 kg/ha + Dol.; T4: Alfalfa + Avena + Dol.; T5: Alfalfa + Raigrás + Dol.; T6: Lotus 12 kg/ha + Dol.; T7: Lotus 24 kg/ha + Dol.; T8: Lotus + Avena + Dol.; T9: Lotus + Raigrás + Dol.; T10: Avena; T11: Raigrás; T12: Lotus + Avena; T13: Lotus + Raigrás. *Dol.: Dolomita.

A partir de los resultados obtenidos del indicador eficiencia de supresión, y como se mencionó anteriormente, queda en evidencia la baja capacidad de control en los tratamientos 2 y 3 conformados por alfalfa. En estos tratamientos, el indicador está por debajo del 1, lo que confirma que el crecimiento acumulado de las malezas a lo largo del ciclo superó al del cultivo, debido al lento establecimiento inicial de la alfalfa.

El resto de los tratamientos presentaron una eficiencia de supresión mayor a 1, lo cual indica que hubo mayores crecimientos acumulados de las especies sembradas por sobre malezas. Dentro de este grupo, los tratamientos 6, 7 y 10 mostraron una eficiencia intermedia. Este comportamiento se debe a que están conformados por

leguminosas de lento establecimiento (lotus en T6 y T7) o, en el caso del T10, solamente por avena. Si bien la avena tiene un crecimiento inicial rápido y genera un efecto mulch al secarse, su capacidad de supresión acumulada fue menor a la de las mezclas. Estos tratamientos, si bien lograron superar a las malezas, no alcanzaron un control tan contundente como el de otros tratamientos superiores.

Es así como en los tratamientos restantes (T4, T5, T8, T9, T11, T12 y T13) el indicador de eficiencia fue más elevado, evidenciando una alta capacidad de la cobertura de estos cultivos en el control de malezas, logrando su supresión considerablemente, causando crecimientos acumulados a lo largo del tiempo muy limitados en las malezas. Entre ellos se destaca el T13 como el máximo exponente del ranking. La alta capacidad de supresión de estos tratamientos se atribuyó a su composición, son mayoritariamente mezclas de leguminosas con gramíneas (T4, T5, T8, T9, T12 y T13) y en el caso de T11 solamente conformado por raigrás. En este sentido, la combinación del rápido crecimiento inicial de las gramíneas con la persistencia foliar de las leguminosas permitió mantener el sitio con una cobertura vegetal densa durante todo el ciclo, afectando drásticamente el desarrollo de las malezas al limitar el acceso a la luz y recursos. Cabe destacar que, tal como se analizó en el apartado anterior de evaluación de crecimiento de árboles, esta elevada capacidad de supresión y ocupación del sitio por parte de los tratamientos superiores también afectó negativamente el desarrollo inicial del eucalipto, confirmando la fuerte competencia ejercida por las coberturas más agresivas. Es importante contextualizar estos resultados considerando la disponibilidad hídrica en el periodo experimental. De acuerdo con los registros históricos de precipitación para la zona y los datos recabados en el área experimental (datos no presentados), durante el periodo experimental las precipitaciones fueron 43% inferiores al promedio histórico.

En el análisis de cuál de las especies sembradas fue más determinante en la cobertura general y causó mayor efecto supresor de malezas, se estimaron los siguientes parámetros.

Tabla 6

Parámetros estadísticos sobre el efecto supresor de las especies sembradas obtenidos del SAS

Efecto	Estimación	Error estándar	DF	t valor	p-valor
A	-0,1153	0,1154	130	-1,00	0,3198
L	-0,3347	0,05358	143	-6,25	0.0001
R	-0,3560	0,03915	74,4	-9,09	0.0001
Av	-0,4393	0,05248	81,2	-8,37	0.0001

Nota. A: Alfalfa. L: Lotus. R: Raigrás. Av: Avena.

A partir de la tabla surge que la única especie que no tuvo efecto supresor en las malezas fue la alfalfa, debido a que el p-valor fue de 0,3198 ($> 0,05$). A pesar de que los datos indican que no realizó una contribución significativa en la reducción de malezas durante el periodo evaluado, es fundamental destacar los beneficios de esta especie. Al tratarse de una leguminosa con capacidad de fijación biológica de nitrógeno, esta especie realizará aportes de nitrógeno claves para el desarrollo de los árboles en etapas más avanzadas del ciclo del árbol. Estos beneficios suelen manifestarse a largo plazo, excediendo el periodo de la evaluación de esta tesis. Adicionalmente, su condición de especie perenne le otorga una mayor persistencia y estabilidad temporal en comparación con las gramíneas, permitiendo que sus ventajas nutricionales se mantengan de forma prolongada en el sitio.

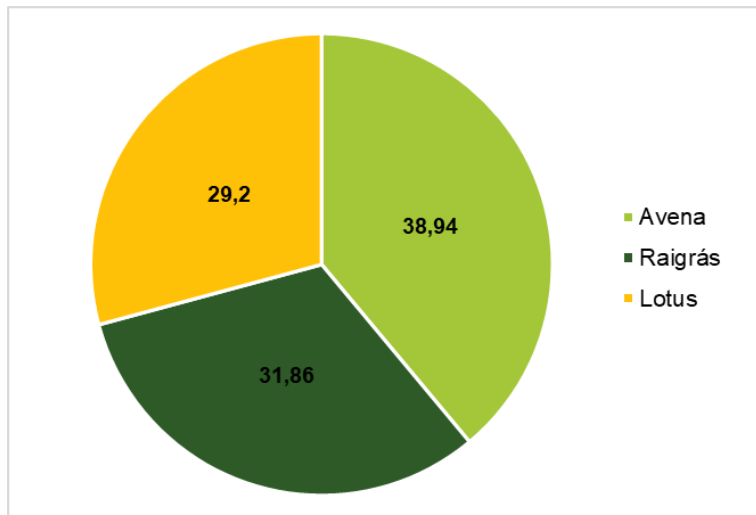
El resto de las especies sí generaron efecto supresor en las malezas ya que su p-valor fue $< 0,05$, siendo resultados estadísticamente significativos. Los valores observados en la tabla indican deben interpretarse como que por cada incremento del 1% en la cobertura del cultivo, se constató una disminución proporcional en la maleza. Específicamente, la avena redujo la cobertura de malezas en un 0,44%, el raigrás en un 0,36% y el lotus en un 0,33%.

Para determinar la importancia relativa de cada especie sembrada, se procedió a la suma de los valores absolutos de aquellos cultivos con efectos estadísticamente significativos sobre la reducción de malezas, obteniendo un valor total de 1,13 ($0,44+0,36+0,33$). Al dividir cada efecto individual por el total para obtener su contribución, se observó que la avena presentó la mayor contribución relativa con un 38.94%, seguida por el raigrás con un 31.86% y el lotus con un 29.20%. En síntesis, los resultados revelaron que, si bien las tres especies son determinantes, la supresión de la comunidad de malezas está mediada principalmente por la avena (Figura 5). Esto sugiere que, aunque la combinación de especies es efectiva,

se evidencia que la avena destaca como la especie con mayor capacidad competitiva para la supresión de malezas.

Figura 5

Contribución relativa de las especies evaluadas en la reducción de la cobertura de malezas



4.2 EVALUACIONES DE CRECIMIENTO DE ÁRBOLES

La evaluación del crecimiento consistió en la medición de parámetros dendrométricos como la altura, el diámetro a la altura del cuello (DAC) y el diámetro de copa.

Como fuera comentado, durante el período de evaluación de esta investigación, se registró el ingreso de ciervos al área de ensayo, por lo tanto, los árboles con daño fueron descartados para la determinación de promedios y de los análisis estadísticos posteriores. No obstante, la supervivencia de los árboles no se vio afectada de manera diferencial entre los tratamientos y alcanzó un promedio general del 95 %.

Tabla 7*P-valor de los parámetros altura, DAC y Dcopa para cada fecha de evaluación*

Fecha	Altura	DAC	Dcopa
4 dpp*	0,9498	0,7220	-
105 dpp	0,0037	-	<.0001
133 dpp	<.0001	-	<.0001
227 dpp	<.0001	<.0001	<.0001
415 dpp	<.0001	<.0001	-

Nota. *dpp: días posplantación. Diámetro a la altura del cuello (DAC), diámetro de copa (Dcopa).

A los 4 dpp no se observaron diferencias significativas en ninguna variable ($p > 0,05$), lo cual indica que todos los árboles estaban en iguales características de crecimiento.

Sin embargo, a partir de los 105 dpp, la Altura ($p = 0,0037$) y el Dcopa ($p < .0001$) ya muestran diferencias significativas. Esto sugiere que los tratamientos empezaron a diferenciarse temprano en el desarrollo aéreo. Esta tendencia se consolida a partir de los 133 dpp, donde todas las variables dendrométricas (Altura, DAC y Dcopa) mostraron respuestas altamente significativas ($p < 0,0001$), indicando que las diferencias son sólidas y persistentes en el tiempo.

A continuación, se presentan las tablas con los promedios de las variables de interés para cada fecha de evaluación.

Tabla 8*Promedios de los parámetros altura y DAC para todos los tratamientos a los 4 dpp*

Tratamiento	Altura (cm)	DAC (cm)
T1	18,3 A	0,16 A
T2	18,7 A	0,16 A
T3	18,3 A	0,17 A
T4	18,7 A	0,16 A
T5	18,3 A	0,17 A
T6	18,0 A	0,16 A
T7	18,7 A	0,17 A
T8	18,7 A	0,18 A
T9	18,3 A	0,15 A
T10	18,3 A	0,15 A
T11	18,0 A	0,17 A
T12	18,3 A	0,16 A
T13	18,7 A	0,18 A

Nota. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas. Prueba de Tukey-Kramer. T1: testigo operativo; T2: Alfalfa 20 kg/ha + Dol.*; T3: Alfalfa 40 kg/ha + Dol.; T4: Alfalfa + Avena + Dol.; T5: Alfalfa + Raigrás + Dol.; T6: Lotus 12 kg/ha + Dol.; T7: Lotus 24 kg/ha + Dol.; T8: Lotus + Avena + Dol.; T9: Lotus + Raigrás + Dol.; T10: Avena; T11: Raigrás; T12: Lotus + Avena; T13: Lotus + Raigrás. *Dol.: Dolomita.

Cabe destacar que, debido a los tratamientos herbicidas aplicados, el testigo (T1) se encontró limpio de malezas durante todo el ciclo y por este motivo, representa el crecimiento potencial de los árboles, constituyendo la referencia de desarrollo óptimo que se busca alcanzar mediante la inclusión de los diferentes cultivos de cobertura.

En la tabla 9, a los 105 dpp se observaron diferencias significativas en el crecimiento de los árboles para ambas variables. En cuanto a la altura, las mezclas de leguminosas con avena (T4 y T8) y alfalfa con raigrás (T5) superaron estadísticamente al tratamiento de Lotus en densidad alta (T7). Sin embargo, al realizar la comparación con el testigo operativo (T1), se observó que ninguno de los tratamientos con cultivos de cobertura generó diferencias significativas en la altura de los árboles.

En cuanto al Dcopa, el testigo operativo (T1), destacó con el mayor crecimiento diferenciándose significativamente de las mezclas de alfalfa + avena (T4), alfalfa + raigrás (T5), lotus + avena (T8 y T12) y lotus + raigrás (T9 y T13), así como de las

gramíneas puras (T10 y T11). Asimismo, el T1 no presentó diferencias significativas con los tratamientos conformados solamente por leguminosas: alfalfa (T2 y T3) y lotus (T6 y T7).

Este comportamiento sugiere una respuesta a la competencia ejercida por las coberturas sembradas, en particular por aquellas que incluyen gramíneas de rápido crecimiento inicial (avena y raigrás). La alta agresividad radicular de las gramíneas genera una elevada competencia por recursos hídricos y nutricionales en el suelo; esta limitación restringe la capacidad de los árboles para destinar recursos hacia el desarrollo foliar (expresada en su mayoría por el Dcopa). Por contrapartida, en el testigo operativo (T1) y en los tratamientos que solo tienen leguminosas, debido a la menor interferencia inicial (control químico en testigo y menor crecimiento de leguminosas) permitió un mayor aprovechamiento de los recursos por parte de los árboles, traduciéndose en una mayor área foliar (expansión de la copa).

Tabla 9

Promedios de los parámetros altura y Dcopa para todos los tratamientos a los 105 dpp

Tratamiento	Altura (cm)	Dcopa (cm)
T1	23,8 AB	11,5 A
T2	21,5 AB	10,2 AB
T3	23,3 AB	10,7 AB
T4	24,6 A	9,5 B
T5	24,4 A	9,8 B
T6	23,2 AB	10,9 AB
T7	21,0 B	10,6 AB
T8	24,7 A	10,0 B
T9	23,0 AB	9,5 B
T10	22,7 AB	9,6 B
T11	23,7 AB	9,9 B
T12	22,7 AB	10,0 B
T13	22,7 AB	9,6 B

Nota. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas. Prueba de Tukey-Kramer. T1: testigo operativo; T2: Alfalfa 20 kg/ha + Dol.*; T3: Alfalfa 40 kg/ha + Dol.; T4: Alfalfa + Avena + Dol.; T5: Alfalfa + Raigrás + Dol.; T6: Lotus 12 kg/ha + Dol.; T7: Lotus 24 kg/ha + Dol.; T8: Lotus + Avena + Dol.; T9: Lotus + Raigrás + Dol.; T10: Avena; T11: Raigrás; T12: Lotus + Avena; T13: Lotus + Raigrás. *Dol.: Dolomita.

A los 133 dpp (Tabla 10), se acentuó la tendencia de crecimiento observada en la evaluación anterior, evidenciándose de forma más marcada las diferencias respecto al testigo operativo (T1). En este sentido, el testigo operativo se consolidó como el tratamiento con mayor crecimiento tanto en altura como en diámetro de copa. En cuanto a la altura, el T1 junto con los tratamientos de alfalfa (T3) y lotus (T6) mostraron un crecimiento superior, diferenciándose significativamente del tratamiento de avena (T10); asimismo el T1 se diferenció de la mezcla de lotus + raigrás (T9). Por otra parte, destaca la recuperación del tratamiento con lotus (T7), que pasó de presentar el menor desempeño en la evaluación anterior a posicionarse entre los de mayor crecimiento. Esta respuesta puede atribuirse a que, una vez superada la etapa crítica de establecimiento, el lotus logra estabilizar su cobertura, mejorando sus relaciones hídricas y nutricionales, lo que se traduce en una menor interferencia sobre el crecimiento del eucalipto en comparación con las mezclas más agresivas

Respecto al Dcopa, se identificaron contrastes marcados entre tratamientos. El testigo operativo y los tratamientos de alfalfa (T3) y lotus (T6) superaron significativamente en crecimiento a la mayoría de los tratamientos, aunque mostraron similitud estadística con T2 y T7 conformados por las mismas especies de leguminosas, pero con diferentes densidades de siembra. Por el contrario, estos se diferenciaron significativamente de un grupo numeroso de tratamientos de bajo desempeño integrado principalmente por las mezclas de gramíneas con leguminosas y las gramíneas puras (T4, T5, T8, T9, T10, T11 y T12). Esta tendencia sugiere que las gramíneas, ya sea solas o en mezcla, ejercieron una competencia más fuerte por recursos (agua y nutrientes) afectando el crecimiento en diámetro de copa del eucalipto en comparación con las leguminosas puras, cuyo ritmo de crecimiento resultó en menor interferencia para el desarrollo de la copa en esta etapa.

El comportamiento a los 133 dpp indicaría que la competencia seguramente se habría extendido a los recursos edáficos (agua y nutrientes). Este factor estaría restringiendo el potencial de crecimiento general de los tratamientos en comparación con el testigo operativo, el cual, al mantenerse bajo control químico y libre de competencia, se habría beneficiado, logrando así una mayor expresión del vigor de los árboles.

Tabla 10*Promedios de los parámetros altura y Dcopa para todos los tratamientos a los 133 dpp*

Tratamiento	Altura (cm)	Dcopa (cm)
T1	34,2 A	27,0 A
T2	32,6 AB C	24,6 AB
T3	33,5 AB	24,8 A
T4	30,7 AB C	19,7 C
T5	30,4 AB C	17,6 C
T6	33,7 AB	25,5 A
T7	33,5 AB C	24,4 AB
T8	31,7 AB C	19,4 C
T9	29,6 B C	16,2 C
T10	29,4 C	18,0 C
T11	32,5 AB C	18,8 C
T12	31,0 AB C	19,0 C
T13	31,1 AB C	20,0 B C

Nota. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas. Prueba de Tukey-Kramer. T1: testigo operativo; T2: Alfalfa 20 kg/ha + Dol.*; T3: Alfalfa 40 kg/ha + Dol.; T4: Alfalfa + Avena + Dol.; T5: Alfalfa + Raigrás + Dol.; T6: Lotus 12 kg/ha + Dol.; T7: Lotus 24 kg/ha + Dol.; T8: Lotus + Avena + Dol.; T9: Lotus + Raigrás + Dol.; T10: Avena; T11: Raigrás; T12: Lotus + Avena; T13: Lotus + Raigrás. *Dol.: Dolomita.

El análisis de los promedios a los 227 dpp bajo la prueba de Tukey (Tabla 11) reveló que el testigo operativo consolidó su dominancia, superando significativamente al resto de los tratamientos en los tres parámetros evaluados.

En altura y diámetro de copa, el crecimiento de los árboles convivientes con cultivos de cobertura se vio fuertemente limitado, registrándose los valores más bajos en la mezcla de lotus + raigrás (T9). Esta brecha tan marcada respecto al testigo operativo (T1) refleja el efecto de la competencia acumulada durante los meses de primavera e inicio del verano; mientras el T1 dispuso de la totalidad de los recursos del sitio, el resto de los tratamientos enfrentó una interferencia continua por nutrientes y agua en un período de alta demanda.

Este fenómeno se explicaría porque, en las condiciones climáticas de Uruguay, la primavera representa un periodo de mayor actividad de crecimiento. Por un lado, las leguminosas (alfalfa y lotus) inician su fase de mayor crecimiento estacional. Simultáneamente, el eucalipto también se reactiva al superar el estancamiento invernal,

demandando recursos para potenciar su crecimiento. Por el contrario, las gramíneas (avena y raigrás) ya se encontraban como cobertura seca debido al graminicida previamente aplicado. En consecuencia, la competencia se habría maximizado al coincidir los períodos de mayor requerimiento hídrico y nutricional de las leguminosas vivas, con la etapa de mayor demanda del cultivo forestal y el efecto acumulado de las gramíneas (cuando estaban vivas), lo que habría resultado en la marcada diferencia de vigor observada.

En cuanto al DAC, se apreció un resultado relevante, donde el tratamiento de alfalfa en densidad de siembra baja (T2) fue el único en mantener similitud estadística con el testigo (T1), mientras que el resto de los tratamientos presentaron un crecimiento significativamente inferior. Este comportamiento sugiere que la alfalfa, al establecerse con una menor densidad y poseer un hábito de crecimiento menos agresivo, permitió que el árbol no sufriera tanto la competencia por agua y nutrientes como ocurrió con las mezclas que tenían gramíneas. En este sentido, el T2 se posicionó como la opción menos interferente para el incremento del DAC. Por el contrario, el resto de los tratamientos confirmaron la presión competitiva de los cultivos de cobertura, afectando el vigor general del árbol al alcanzar esta etapa del ciclo.

Tabla 11

Promedios de los parámetros altura, Dcopa y DAC para todos los tratamientos a los 227 dpp

Tratamiento	Altura (cm)	Dcopa (cm)	DAC (cm)
T1	144,6 A	138,5 A	2,86 A
T2	79,5 B	68,5 B C	2,26 A
T3	80,1 B	70,5 B	1,23 B
T4	71,6 B C	59,3 B C D	0,99 B
T5	66,5 B C D	57,4 C D	0,89 B
T6	73,3 B C	58,8 B C D	1,05 B
T7	69,4 B C D	57,4 B C D E	0,98 B
T8	70,5 B C D	60,1 B C D	0,99 B
T9	58,2 D	44,3 E	0,77 B
T10	77,1 B	67,0 B C	1,10 B
T11	75,4 B	66,5 B C	1,04 B
T12	71,9 B C	56,7 C D	0,92 B
T13	60,6 C D	47,9 D E	0,83 B

Nota. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas. Prueba de Tukey-Kramer. T1: testigo operativo; T2: Alfalfa 20 kg/ha + Dol.*; T3: Alfalfa 40 kg/ha + Dol.; T4: Alfalfa + Avena + Dol.; T5: Alfalfa + Raigrás + Dol.; T6: Lotus 12 kg/ha + Dol.; T7: Lotus 24 kg/ha + Dol.; T8: Lotus + Avena + Dol.; T9: Lotus + Raigrás + Dol.; T10: Avena; T11: Raigrás; T12: Lotus + Avena; T13: Lotus + Raigrás. *Dol.: Dolomita.

Al finalizar el periodo de evaluación a los 415 dpp (Tabla 12), el testigo operativo (T1) se consolidó como el tratamiento con los mayores crecimientos tanto en altura como en DAC, diferenciándose significativamente de todos los tratamientos con cultivos de cobertura. En términos de altura y DAC el T1 superó en más del doble al tratamiento de lotus + raigrás (T9), el cual registró el menor desempeño del ensayo junto con el T7 (lotus). Específicamente, el T9 registró la menor altura promedio, mientras que ambos tratamientos (T7 y T9) exhibieron el menor (DAC).

Tabla 12*Promedios de los parámetros altura y DAC para todos los tratamientos a los 415 dpp*

Tratamiento	Altura (cm)	DAC (cm)
T1	446,3 A	6,98 A
T2	251,5 B C	3,75 B C D
T3	238,6 B C D	3,46 B C D
T4	238,2 B C D	3,70 B C
T5	232,1 B C D	3,39 B C D
T6	196,9 D E F	2,94 D E
T7	182,4 E F	2,60 E
T8	230,3 B C D	3,41 B C D
T9	169,9 F	2,65 E
T10	253,6 B	4,00 B
T11	248,9 B C	3,78 B C
T12	212,7 C D E	3,18 C D E
T13	211,9 C D E	3,16 C D E

Nota. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas. Prueba de Tukey-Kramer. T1: testigo operativo; T2: Alfalfa 20 kg/ha + Dol.*; T3: Alfalfa 40 kg/ha + Dol.; T4: Alfalfa + Avena + Dol.; T5: Alfalfa + Raigrás + Dol.; T6: Lotus 12 kg/ha + Dol.; T7: Lotus 24 kg/ha + Dol.; T8: Lotus + Avena + Dol.; T9: Lotus + Raigrás + Dol.; T10: Avena; T11: Raigrás; T12: Lotus + Avena; T13: Lotus + Raigrás. *Dol.: Dolomita.

Esta marcada brecha evidencia que el beneficio del control químico prevaleció sobre la estrategia de cultivos de cobertura en la etapa de establecimiento. El menor desempeño de los tratamientos con cultivos se atribuye a una interferencia temprana y prolongada por recursos. En este sentido, la competencia radicular y el consumo de agua de las coberturas durante el primer año generaron un retraso en el crecimiento del eucalipto que no pudo ser revertido, aun en aquellos tratamientos que se desecaron en forma eficiente las especies gramíneas sembradas. Cabe destacar que estas mermas registradas en nuestro ensayo se habrían ubicado dentro de los parámetros de pérdida esperados según la revisión bibliográfica previa.

A esta edad del rodal, queda claro que la sensibilidad del eucalipto a la competencia inicial es un factor determinante, ya que los posibles beneficios de los cultivos de cobertura (como el aporte de nitrógeno o materia orgánica) no lograron compensar el costo del crecimiento perdido por la convivencia directa con las especies sembradas, al menos en el período de evaluación de este trabajo. En este contexto, resultarían de interés futuras evaluaciones, que deberían estimar en etapas más

avanzadas del ciclo del eucalipto si el aporte de nitrógeno por parte de las leguminosas y la mejora en la estructura del suelo podrían compensar el retraso inicial de crecimiento.

Esta pérdida significativa en el crecimiento inicial evidencia que, para validar la viabilidad operativa de las coberturas vegetales frente al uso de herbicidas, en futuras investigaciones se debería adelantar el momento de aplicación del graminicida, así como ajustar las densidades de siembra para minimizar la competencia directa con los árboles.

5 CONCLUSIONES

Las coberturas vegetales evaluadas, excepto los tratamientos compuestos únicamente por alfalfa, redujeron significativamente el enmalezamiento en la fila de plantación, evidenciando su potencial como herramienta de manejo cultural. Sin embargo, su capacidad supresora en el monte de eucalipto fue dependiente de la especie utilizada y de su desarrollo, ya que la eficiencia del control comenzó a ser significativa una vez superada la fase de establecimiento de los cultivos de cobertura y que la capacidad supresora aumentó a lo largo del ciclo de estas.

El análisis del indicador eficiencia de supresión reveló que las mezclas de gramíneas con leguminosas fueron las mejores opciones para reducir el crecimiento de las malezas, siendo la avena la especie con mayor contribución individual al efecto supresor. No obstante, las mezclas son la opción más robusta debido a la sinergia entre el rápido crecimiento de las gramíneas y la persistencia de las leguminosas, que aseguraron una cobertura más densa y duradera, manteniendo el control más tiempo.

El uso de coberturas vegetales durante la etapa de establecimiento limitó el crecimiento inicial de los árboles, probablemente como consecuencia de la competencia por recursos entre las especies sembradas y el eucalipto. El testigo operativo (control químico) permitió que el eucalipto expresara su máximo potencial al desarrollarse libre de competencia, superando significativamente a los demás tratamientos en todos los parámetros dendrométricos.

En las parcelas con coberturas se habría generado un escenario de competencia por parte de las especies sembradas; si bien se controló el enmalezamiento, la capacidad competitiva de estos cultivos (especialmente gramíneas) seguramente demandó agua y nutrientes que limitaron el crecimiento de los árboles. A diferencia de los sistemas agrícolas, donde los cultivos de servicio se utilizan durante el barbecho, en este ensayo estos conviven al mismo tiempo con los árboles. En consecuencia, aunque el control cultural fue efectivo, conllevó un alto costo biológico para el crecimiento inicial del eucalipto en este sitio y bajo estas condiciones.

A pesar de la reducción observada en el vigor de los árboles, es fundamental considerar que los beneficios de las coberturas vegetales suelen manifestarse en el mediano y largo plazo. En síntesis, si bien el uso de coberturas vegetales representa una alternativa alineada con los estándares actuales de sostenibilidad para reducir la

carga química, en las condiciones de este ensayo conllevó un costo significativo en el crecimiento inicial del árbol en comparación con el control químico tradicional (T1).

6 BIBLIOGRAFÍA

- Adams, P. R. (2004). *Competition for soil water and nitrogen between *Holcus lanatus* L. and young *Eucalyptus globulus* Labill.* [Disertación doctoral, University of Tasmania]. UTAH Research Repository. <https://eprints.utas.edu.au/19174/>
- Adams, P. R., Beadle, C. L., Mendham, N. J., & Smethurst, P. J. (2003). The impact of timing and duration of grass control on growth of a young *Eucalyptus globulus* Labill. plantation. *New Forests*, 26(2), 147-165.
- Albano Ordeix, J. P., & Dávila Bottero, A. D. (2012). *Interacción entre control de malezas en la fila y diferentes momentos de control en la entrefila de *Eucalyptus dunnii** [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/1686>
- Aparicio, J. L., Maggio, A., & Fragueiro, L. (2018, 4-5 de octubre). *Control de malezas de *Eucalyptus grandis*: Respuesta a diferentes anchos y períodos de control* [Contribución]. XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia. [https://www.researchgate.net/publication/328942097 CONTROL DE MALEZA S DE Eucalyptus grandis RESPUESTA A DIFERENTES ANCHOS Y PERIODOS DE CONTROL](https://www.researchgate.net/publication/328942097_CONTROL_DE_MALEZA_S_DE_Eucalyptus_grandis_RESPUESTA_A_DIFERENTES_ANCHOS_Y_PERIODOS_DE_CONTROL)
- Assanelli, J. A., & Godiño, M. P. (2010). *Alternativas de control de malezas en *Eucalyptus dunnii* en plantación de otoño* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/23464>
- Brust, J., Claupein, W., & Gerhards, R. (2014). Growth and weed suppression ability of common and new cover crops in Germany. *Crop Protection*, 63, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.04.022>
- Chorbadjian, R., & Kogan, M. (2001). Pérdida de actividad del glifosato debido a la presencia de suelo en el agua de aspersión. *Ciencia e Investigación Agraria*, 28(2), 83-87. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/8620>
- Da Ponte Canova, E., & Salas, P. (2009). Control de malezas en plantaciones forestales con el uso de glyphosato y sulfato de amonio. *Investigación Agraria*, 11(1), 54-59. <https://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/41>

- da Silva, J. R. V., Alves, P. L. C. A., & Toledo, R. E. B. (2012). Weed control strip influences the initial growth of *Eucalyptus grandis*. *Acta Scientiarum Agronomy*, 34(1), 29-35. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v34i1.12252>
- Dirección General Forestal. (2024). *Resultados de la Cartografía Forestal Nacional 2024*. MGAP. [https://descargas.mgap.gub.uy/Documentos%20compartidos/CA RTOGRAFIA%202024/Informe%20de%20resultados%202025.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/Documentos%20compartidos/CA%20RTOGRAFIA%202024/Informe%20de%20resultados%202025.pdf)
- Eyles, E., Worledge, D., Sands, P., Ottenschlaeger, M. L., Paterson, S. C., Mendham, D., & O'Grady, A. P. (2012). Ecophysiological responses of a young blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation to weed control. *Tree Physiology*, 32(8), 1008-1020. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps058>
- Forest Stewardship Council. (2021). *El Estándar Nacional de Manejo Forestal Responsable FSC de Uruguay*. <https://connect.fsc.org/es/document-centre/documents/resource/485>
- García, R. E., Sotomayor, A., Silva, P. S., & Valdebenito, R. G. (2000). *Establecimiento de plantaciones forestales: Eucalyptus sp.* INFOR. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/6453>
- Guevara Bonilla, M. (Coord.), Arguedas Gamboa, M., Arias Aguilar, D., Briceño Elizondo, E., & Esquivel Segura, E. (2018). *Utilización de cultivos de cobertura como alternativa para el control de malezas, aumento de la fertilidad y maximización del crecimiento en plantaciones forestales comerciales recién establecidas*. TEC. <https://hdl.handle.net/2238/11074>
- Kaspary, T., García, A., Jorajuría, P., & Cabrera, M. (2020). Uso de avena negra y rolado en el manejo de malezas. *Revista INIA*, (61), 47-51. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14494/1/Rev-INIA-61-Junio-2020-p-47-51.pdf>
- Larocca, F., Dalla Tea, F., & Aparicio, J. L. (2004, 28-29 de octubre). *Técnicas de implantación y manejo de Eucalyptus grandis para pequeños y medianos forestadores en Entre Ríos y Corrientes* [Contribución]. XIX Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/79970/mod_resource/content/1/Implantaci%C3%B3n%20y%20manejo%20E.%20grandis.pdf

- Little, K. M., & Van Staden, J. (2005). Effects of vegetation control on *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* volume and economics. *South African Journal of Botany*, 71(3-4), 418-425. [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)30114-9](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)30114-9)
- Montouto Villareal, J. C., & Cazaban Regusci, J. (2009). *Efecto del laboreo en la eficiencia de herbicidas preemergentes y en el crecimiento del clon Eucalyptus grandis x Eucalyptus globulus* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/20670>
- Morales, M. E., Iocoli, G. A., Villamil, M. B., & Zabaloy, M. C. (2022). Efecto de los cultivos de cobertura invernales sobre el microbioma del suelo: Revisión sistemática de la literatura. *Revista Argentina de Microbiología*, 54(1), 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2021.02.008>
- Nair, P. K. R. (1993). *An introduction to agroforestry*. KAP; ICRAF. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/32_An_introduction_to_agroforestry.pdf
- Pereira, F. C. M., Alves, P. L. C. A., & Martins, J. V. F. (2013). Interference of grasses on the growth of eucalyptus clones. *Journal of Agricultural Science*, 5(11), 173-180. <https://doi.org/10.5539/jas.v5n11p173>
- Pereira, F. C. M., Yamauti, M. S., & Alves, P. L. C. A. (2012). Interação entre manejo de plantas daninhas e adubação de cobertura no crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. *Revista Árvore*, 36(5), 941-949. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000500016>
- Pezzutti, R. V., & Caldato, S. L. (2004). Efecto del control de malezas en el crecimiento de plantaciones de *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* var. *elliottii* y *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Bosque*, 25(2), 77-87. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002004000200008>
- Pinto, P., Fernández Long, M. E., & Piñeiro, G. (2017). Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.028>
- Porta, B. M. (2021). *Cultivos de cobertura para el control de malezas* [Trabajo final de grado, Universidad Nacional de Córdoba]. Repositorio Digital de la Universidad Nacional de Córdoba. <http://hdl.handle.net/11086/20871>

- Pound, B. (1999). Cultivos de cobertura para la agricultura sostenible en América Latina. En M. D. Sánchez & M. M. Rosales (Eds.), *Agroforestería para la producción animal en América Latina* (pp. 143-170). FAO.
<http://www.fao.org/3/x1213s/x1213s.pdf>
- Prado, J. A., & Barros, S. (Eds.). (1989). *Eucalyptus: Principios de silvicultura y manejo*. Infor. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/946>
- Shaner, D. L. (2014). Lessons learned from the history of herbicide resistance. *Weed Science*, 62(2), 427-431. <https://doi.org/10.1614/WS-D-13-00109.1>
- Tamayo Ortiz, C. V., & Alegre Orihuela, J. C. (2022). Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*, 9(1), Artículo e3287. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3287>
- Tarouco, C. P., Agostinetto, D., Panozzo, L. E., dos Santos, L. S., Vignolo, G. K., & Ramos, L. O. O. (2009). Períodos de interferência de plantas daninhas na fase inicial de crescimento do eucalipto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(9), 1131-1137. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000900010>
- Toledo, R. E. B., Victória Filho, R., Bezutte, A. J., Pitelli, R. A., Alves, P. L. C. A., do Valle, C. F., & Alvarenga, S. F. (2003). Períodes de controle de *Brachiaria* sp e seus reflexos na produtividade de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, (63), 221-232. <http://hdl.handle.net/11449/67312>
- Toledo, R. E. B., Victória Filho, R., Pitelli, R. A., Alves, P. L. C. A., & Lopes, M. A. F. (2000). Efeito de períodos de controle de plantas daninhas sobre o desenvolvimento inicial de plantas de eucalipto. *Planta Daninha*, 18(3), 395-404. <https://www.scielo.br/j/pd/a/xZHrSHbhnRqLxJCKdQpNmM/?lang=pt>
- UPM Forestal Oriental. (2023). *Gestión de agroquímicos*.
<https://www.upm.uy/siteassets/documents/forestal/gestionagroquimicos-web.pdf>
- Uruguay XXI. (2015, 30 de noviembre). *Informe: El sector forestal en Uruguay*.
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/noticias/articulo/informe-el-sector-forestal-en-uruguay/>

Uruguay XXI. (2025). *Sector Forestal en Uruguay*.

<https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/360c13a465dd9ee9bdc985fef09c5d1eff4c7bce.pdf>

Villalba, J. (2010). Control de malezas en Eucalyptus spp. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada Técnica de Protección Forestal* (pp. 1-8). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12553/1/SAD629p1-8.pdf>