

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA, RADICULAR Y APORTES DE
NITRÓGENO DE DISTINTOS CULTIVOS DE SERVICIO INVERNALES**

por

**Bruno Sebastián PISTÓN AGUILAR
Camila Sandra PISTÓN AGUILAR**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2025**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (PhD) Guillermo Siri-Prieto

Tribunal:

Ing. Agr. (MSc) Santiago Álvarez

Ing. Agr. (PhD) Guillermo Siri-Prieto

Ing. Agr. (MSc) Mauricio Bustamante

Fecha: 10 de abril de 2025

Estudiante:

Bruno Sebastián Pistón Aguilar

Camila Sandra Pistón Aguilar

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestros padres y hermano, Sandra Aguilar, Rodolfo Pistón y Rodrigo Pistón por su constante apoyo y motivación en nuestro desarrollo tanto personal como profesional. A toda nuestra familia y amigos, quienes han sido testigos de nuestro proceso de formación y crecimiento.

A la Facultad de Agronomía y al grupo disciplinario, cuyo apoyo técnico y científico nos brindó las herramientas y conocimientos esenciales para llevar a cabo este estudio.

Agradecemos profundamente a Santiago Álvarez por su compromiso, dedicación y apoyo en cada etapa del trabajo, factores que fueron cruciales para el avance de esta tesis. Finalmente, a Guillermo Siri-Prieto, nuestro profesor y director.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN	2
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN	8
SUMMARY	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 OBJETIVOS	11
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 TRAYECTORIA RECIENTE DE LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS	12
2.2 LOS CULTIVOS DE SERVICIO EN EL CONTEXTO ACTUAL DE PRODUCCIÓN	12
2.3 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS	13
2.3.1 Aporte y reciclaje de nitrógeno.....	14
2.3.2 Aumento de materia orgánica.....	16
2.3.2.1 Producción aérea y radicular de los cultivos de servicio	17
2.4 ESPECIES DE CULTIVOS DE SERVICIO	18
2.4.1 Grupos funcionales.....	18
2.4.2 Gramíneas.....	19
2.4.2.1 Avena strigosa	19
2.4.2.2 Avena byzantina	20
2.4.3 Leguminosas	20
2.4.3.1 Lupinus angustifolius.....	21
2.4.3.2 Trifolium resupintum	21
2.4.3.3 Vicia villosa.....	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1 SITIO DE ESTUDIO	23
3.2 CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS EDÁFICOS	23
3.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	23
3.3.1 Uso del suelo.....	23
3.3.2 Diseño experimental.....	23
3.3.3 Manejo del cultivo de servicio.....	24
3.3.4 Estimación de biomasa	26
3.3.5 Estimación de nitrógeno	27

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	27
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	29
4.2 PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y RADICULAR DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO	30
4.3 APORTE DE NITRÓGENO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIOS	34
4.4 VARIACIÓN EN LA RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO	37
5. CONCLUSIONES.....	39
6. BIBLIOGRAFÍA.....	41

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No.	Página
Tabla No. 1. Relación C/N y tasa de descomposición característica de cada material...	15
Tabla No. 2. Densidad de siembra según tratamiento y especie	25
Tabla No. 3. Manejo fitosanitario de los cultivos de servicios	25
Tabla No. 4. Producción de biomasa y parte aérea/raíz de los diferentes tratamientos..	31
Tabla No. 5. Aporte de nitrógeno y relación C/N de cada grupo funcional.....	35

Figura No.	Página
Figura No. 1. Evolución del área de siembra de cultivos de invierno	13
Figura No. 2. Uso del suelo previo al experimento	23
Figura No. 3. Tratamientos totales del experimento.....	24
Figura No. 4. Régimen de precipitaciones y temperatura 2023	29
Figura No. 5. Producción de biomasa radicular en función de la biomasa aérea producida por los diferentes tratamientos	34
Figura No. 6. Relación C/N en función de la proporción de leguminosas.....	37

RESUMEN

Uruguay ha mantenido, a lo largo de los años, un sistema de agricultura continua que ha contribuido a la degradación de sus suelos, resultando en una disminución progresiva de su productividad, bajo aporte de nitrógeno por los cultivos, disminución de la biodiversidad, aumento en el uso de herbicidas y erosión causada por períodos de suelo desnudo. En respuesta a estos desafíos, los cultivos de servicio se presentan como una solución parcial para mitigar estos problemas, mejorando la fertilidad del suelo, controlando la erosión, y aumentando la biodiversidad. El presente estudio tiene como objetivos principales evaluar la producción en cultivos de servicio de biomasa aérea y radicular en los primeros 20 cm de suelo. Por otra parte, estimar el aporte de nitrógeno de distintos cultivos de servicios invernales. Para esto fueron utilizadas las siguientes variedades: *Avena strigosa*, *Avena byzantina*, *Vicia villosa*, *Lupinus angustifolius*, *Trifolium resupinatum*. Además, se utilizaron mezclas conformadas de la siguiente forma, *Avena byzantina* + *Vicia villosa*, *Avena strigosa* + *Vicia villosa*, dispuestos en un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en la producción de biomasa aérea. *Avena strigosa* obtuvo la mayor producción promedio, con 10.398 kg MS ha⁻¹. En el análisis de grupos funcionales, las gramíneas alcanzaron una producción de biomasa aérea promedio de 9126 kg MS ha⁻¹. Para la biomasa radicular, *Avena strigosa* también lideró con 1921 kg MS ha⁻¹, y el grupo de gramíneas tuvo la mayor producción de biomasa radicular promedio, registrando 1705 kg MS ha⁻¹. Además, se evidenció una relación directa y positiva entre la producción de biomasa aérea y radicular. El análisis del aporte de nitrógeno y la relación C/N mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los grupos funcionales. La mezcla de *Avena byzantina* (alta densidad) con *Vicia villosa* presentó el mayor aporte de nitrógeno, con 151 kg/ha y una relación C/N de 25/1, indicando buena eficiencia en la fijación de nitrógeno. En general, las mezclas tuvieron el mayor aporte de nitrógeno (139 kg/ha), similar al de las leguminosas (119 kg/ha), pero significativamente superior al de las gramíneas. En cuanto a la relación C/N, las leguminosas mostraron el valor más bajo (13/1), en contraste con las gramíneas (40/1).

Palabras clave: biomasa aérea, biomasa radicular, aporte de nitrógeno, relación C/N, cultivos de servicio

SUMMARY

Uruguay has maintained, over the years, a continuous agricultural system that has contributed to the degradation of its soils, resulting in a progressive decrease in productivity, low nitrogen input by crops, decrease in biodiversity, increased use of herbicides, and erosion caused by periods of bare soil. In response to these challenges, cover crops have emerged as a partial solution to mitigate these issues, improving soil fertility, controlling erosion, and increasing biodiversity. The main objectives of this study are to evaluate the production of aerial and root biomass in cover crops in the top 20 cm of soil. Additionally, to estimate the nitrogen contribution of different winter cover crops. The following varieties were used for this purpose: *Avena strigosa*, *Avena byzantina*, *Vicia villosa*, *Lupinus angustifolius*, *Trifolium resupinatum*. Furthermore, mixtures formed as follows were used: *Avena byzantina* + *Vicia villosa*, *Avena strigosa* + *Vicia villosa*, arranged in a randomized complete block design with three replications. The results showed significant differences ($p \leq 0.05$) in aerial biomass production. *Avena strigosa* achieved the highest average production, with 10,398 kg DM ha⁻¹. In the analysis of functional groups, grasses reached an average aerial biomass production of 9,126 kg DM ha⁻¹. For root biomass, *Avena strigosa* also led with 1,921 kg DM ha⁻¹, and the group of grasses had the highest average root biomass production, recording 1,705 kg DM ha⁻¹. Furthermore, a direct and positive relationship between aerial and root biomass production was evidenced. The analysis of nitrogen contribution and the C/N ratio showed significant differences ($p \leq 0.05$) between functional groups. The mixture of *Avena byzantina* (high density) with *Vicia villosa* presented the highest nitrogen contribution, with 151 kg/ha and a C/N ratio of 25/1, indicating good efficiency in nitrogen fixation. Overall, the mixtures had the highest nitrogen contribution (139 kg/ha), similar to that of legumes (119 kg/ha), but significantly higher than that of grasses. Regarding the C/N ratio, legumes showed the lowest value (13/1), in contrast to grasses (40/1).

Keywords: aerial biomass, root biomass, nitrogen contribution, C/N ratio, cover crops

1. INTRODUCCIÓN

El aumento en la presión global por la producción de commodities, ha provocado en las últimas décadas, importantes cambios en el uso del suelo a nivel local. Este proceso consistió en la sustitución del tradicional sistema de agricultura-pastura que consiste en una fase de tres o cuatro años de cultivos comerciales anuales, alternados con tres o cuatro años de pasturas mixtas de leguminosas y gramíneas perennes, por un sistema de agricultura continua con una alta frecuencia de soja y la presencia de largos períodos de barbecho invernal (Franzluebbers et al., 2014). Siempre en siembra directa. Al mantenerse estos sistemas de cultivo en el tiempo, disminuyó el aporte promedio anual de residuos aéreos y radiculares, generando una trayectoria negativa en la calidad del suelo, que afectó a servicios ecosistémicos de regulación y soporte, como el ciclado y aporte de nutrientes y/o la formación de materia orgánica (MO).

En este contexto, en Uruguay se implementaron en 2013 los Planes de Uso y Manejo Responsable de Suelos que tuvieron como objetivo, reducir el riesgo de erosión del suelo. Lo cual implicó planificar e implementar rotaciones de cultivos que puedan cumplir con el límite de tolerancia de pérdida de suelo, establecido por la ley N° 15239 (Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y variabilidad [SNRCC], 2019). En la práctica se tradujo a nivel comercial en la incorporación de los cultivos de servicio (CS) en las rotaciones agrícolas.

Los CS son cultivos sembrados con el propósito de mantener o restaurar los servicios ecosistémicos ofrecidos por el medio ambiente en los sistemas agrícolas. Si bien, se introducen por su aporte al control de la erosión, este es solo uno de los varios servicios ecosistémicos que pueden ofrecer (SNRCC, 2022). Entre los cuales se encuentran control de malezas, fomentar la biodiversidad, el aporte y reciclaje de nitrógeno (N), el aumento de la MO y/o mejora de la estructura del suelo, entre otros. Sin embargo, no todas las especies brindan los mismos servicios ecosistémicos (Álvarez et al., 2023). Por lo que es relevante identificar que servicios ecosistémicos va a demandar el sistema, pero sobre todo que especies o mezclas de especies de CS ofrecen los servicios ecosistémicos buscados.

Por lo mencionado anteriormente en este trabajo, se estimará la producción de biomasa total (aérea y radicular) y el aporte de N de diversas especies de gramíneas y

leguminosas, tanto en cultivos puros como en mezclas, considerando la importancia de estos parámetros sobre la salud del suelo.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo 1: Evaluar la producción de biomasa aérea y radicular en CS.

Objetivo 2: Estimar el aporte de N de distintos CS invernales.

Hipótesis 1: Existe una correlación positiva entre la producción de biomasa aérea y biomasa radicular.

Hipótesis 2: Los cultivos de servicio mezcla de gramíneas y leguminosas pueden aportar la misma cantidad de N que un cultivo de servicio puro de leguminosa sin condicionar la calidad del material producido.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRAYECTORIA RECIENTE DE LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

A partir del comienzo del siglo XXI, la agricultura en Uruguay ha experimentado un proceso de intensificación y expansión significativa, lo que repercutió en un aumento significativo del área destinada a cultivos anuales (García Préchac et al., 2010), pasando de 400.000 ha a más de 1.200.000 en menos de una década (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2014, 2023). Este fenómeno estuvo explicado por dos procesos: i) intensificación de la producción agrícola en el litoral oeste del país, abandonando el sistema tradicional de rotación de cultivos y pasturas por un sistema de agricultura continua bajo siembra directa; y ii) expansión del área agrícola hacia zonas con menor potencial, históricamente dedicadas a la ganadería (Baeza & Paruelo, 2020; García Préchac et al., 2010).

Esta intensificación de la agricultura sumada al advenimiento de la soja al Uruguay, provocaron un incremento muy importante de la erosión hídrica del suelo. Este tipo de erosión es el más importante en nuestras condiciones y está correlacionado con la degradación física, química y biológica del suelo (Dell'Acqua & Beretta, 2020). Afectando la productividad agrícola a largo plazo (Firoozi & Firoozi, 2024). A su vez, la sustitución de las pasturas por sistemas de agricultura continua ha llevado a balances negativos de carbono (Mazzilli et al., 2018), mientras que el mayor número de cultivos por año y el aumento de rendimiento de estos ha llevado a una mayor extracción de nutrientes. Lo cual ha tenido como consecuencia un balance negativo de cationes, medido a partir de una disminución de pH del suelo y del potasio (Lagos, 2019), y una disminución del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) (Álvarez & Ernst, 2024). Incluso cuando la mayor parte de la actividad agrícola en ese periodo fue realizada en siembra directa

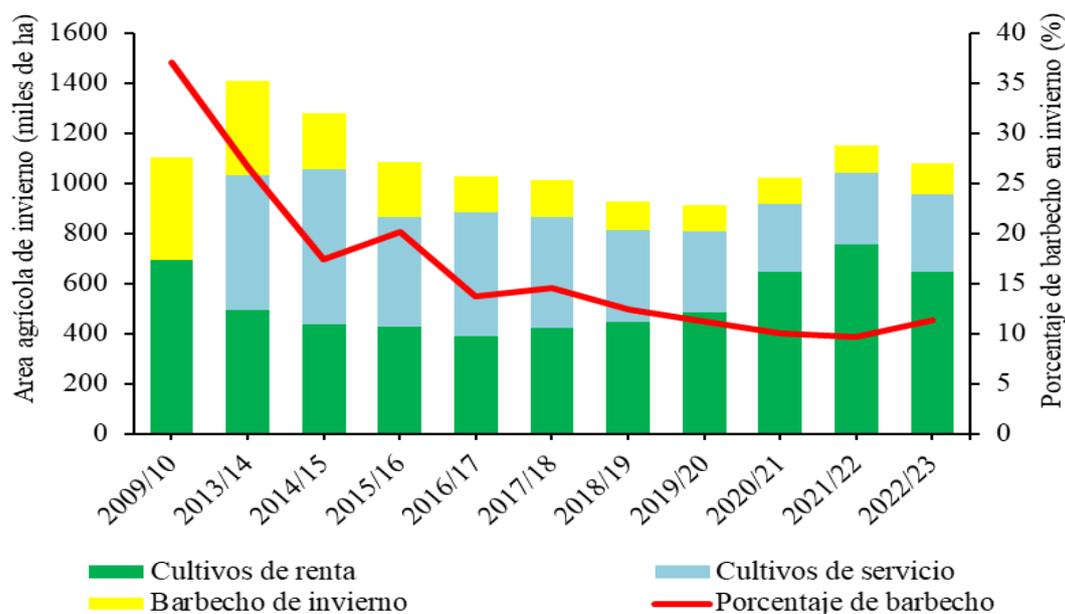
2.2 LOS CULTIVOS DE SERVICIO EN EL CONTEXTO ACTUAL DE PRODUCCIÓN

Para evitar este proceso de degradación de los sistemas agrícolas, en Uruguay, se modifica la Ley de Conservación de Suelos en 2009. Esta ley tuvo como objetivo reducir las pérdidas por erosión del suelo en los sistemas agrícolas del litoral, generadas a partir de la expansión del monocultivo de soja normalmente acompañado de largos periodos de

barbecho invernal (Pinto et al., 2023). Su aplicación trajo en la práctica un aumento sostenido del área de CS en las rotaciones comerciales a partir del año 2013, que en función del precio de los commodities ha rondado entre 270 y 370 mil ha aproximadamente, logrando reducir de manera sostenida el área de barbecho hasta mantenerse en un 10% del área agrícola de invierno (DIEA, 2014, 2023).

Figura 1

Evolución del área de siembra de cultivos de invierno



Nota. Elaborado en base a datos de DIEA (2014, 2023).

Los CS son cultivos que se siembran entre dos cultivos de renta con el objetivo de mantener o restaurar servicios ecosistémicos en los sistemas agrícolas (SNRCC, 2022; Sullivan, 2003). Si bien en Uruguay, se introducen por los Planes de Uso y Manejo Responsable de Suelos, su inclusión en las rotaciones se justifica a través de diferentes beneficios que serán presentados en este trabajo. Promover la diversificación de cultivos y la eliminación de barbechos prolongados aumenta la posibilidad de promover otros servicios ecosistémicos, fomentando la conservación de los ecosistemas (Pinto et al., 2023). Efectos que son percibidos por los productores al incluirlos en sus sistemas de producción a pesar de no existir una renta directa (Mas & Sanchis, 2023).

2.3 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Las características de las especies de los CS permiten que estos provean de diferentes servicios ecosistémicos al sistema de producción. Así es que, parte aérea y

subterránea proveen de diversos beneficios al ambiente como pueden ser: control de erosión (Langdale et al., 1991), aporte de N por FBN (Pinto et al., 2021), absorción y retención de nutrientes (Fernández et al., 2012), mejora en la conservación y dinámica del agua (Blanco-Canqui et al., 2013), refugio para polinizadores y control de plagas (Lee-Mader et al., 2015), supresión de malezas (Scholberg et al., 2010), entre otros. En sistemas de agricultura continua son clave para aumentar los periodos de crecimiento activo de las plantas y diversificar la producción. Factores necesarios para mantener servicios ecosistémicos como aquellos asociados a la fertilidad del suelo (Álvarez & Ernst, 2024). En los próximos apartados se tratarán servicios ecosistémicos que pueden ser provistos por los CS y son de interés para este estudio.

2.3.1 Aporte y reciclaje de nitrógeno

La disponibilidad de N para las plantas está determinada por los procesos de inmovilización y mineralización (Baethgen, 1992). Procesos que son dependientes de las fuentes de N y su manejo. Las principales fuentes de N para cultivos y pasturas son: el contenido natural de N en suelos no cultivados, los residuos de cultivos, el aporte de leguminosas por FBN, deposiciones animales y fertilizantes químicos. Los procesos de pérdida del N más importantes en los sistemas agrícolas son: lixiviación o lavado de nitratos, desnitrificación, volatilización de amoníaco, erosión y remoción de N por los cultivos cosechados. Esta última es la vía por la cual en general se pierde mayor cantidad de N, estimándose pérdidas de $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de N para una rotación típica de agricultura continua en nuestro país (Díaz Rossello, 1992). La relevancia de cada proceso variará según el sistema de producción y de laboreo, la calidad de los residuos, el uso de leguminosas en las rotaciones, el pastoreo animal y la aplicación de estiércol entre otros (Baethgen, 1992).

La mayor parte de estos procesos es dependiente de la actividad microbiana (Hayatsu et al., 2008). Un factor determinante de su actividad es la calidad de los rastrojos generados, la cual en parte puede ser estimada por la relación carbono/nitrógeno (C/N). La relación C/N de los residuos es fundamental para el equilibrio del suelo, al tener un efecto significativo en la descomposición de los residuos y la dinámica de N del suelo (United States Department of Agriculture [USDA], 2011).

Residuos con una C/N cercana o inferior a la dieta microbiana ideal (C/N= 24) como los de leguminosas, aportan suficiente cantidad de N a los microorganismos para la descomposición de los residuos, favoreciendo su mineralización y aumentando los niveles de nitratos en el suelo (USDA, 2011). En cambio, los materiales residuales provenientes de cultivos con una relación alta de C/N (mayoritariamente gramíneas) tendrán asociada una descomposición lenta (Centurión et al., 2018). Esto se debe a la necesidad de los microorganismos del suelo de obtener N adicional para descomponer el carbono proveniente del rastrojo, lo que resulta en un déficit de N disponible en el suelo (USDA, 2011). Esto último fue reportado en CS no-leguminosas cuando se utilizan como abono verde, donde la alta C/N puede disminuir disponibilidad de este nutriente durante el ciclo del cultivo de renta siguiente (Pound, 2006). La relación C/N y la tasa de descomposición de distintos materiales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Relación C/N y tasa de descomposición característica de cada material.

Material	Relación carbono/nitrógeno	Tasa de descomposición
Rastrojo de trigo	80/1	----
Gramíneas en anthesis	35-40/1	---
Gramíneas en vegetativo	25-35/1	--
Mezcla con leguminosas	15-30/1	-
Dieta microbiana ideal	24/1	-
Vicia en vegetativo	11-15/1	+
Biomasa microbiana	8/1	+

Nota. Tomado de Álvarez et al. (2023).

Como fue mencionado previamente, el tipo de aporte de N es dependiente de las especies utilizadas: en no leguminosas (ej.: gramíneas), el aporte de N resulta de reducir pérdidas que ocurren durante el barbecho (Ernst, 2004). Con estas especies, las recomendaciones típicas de fertilización son mantener los mismos niveles de fertilización que en barbechos invernales, por lo que no hay un crédito de mitigación directo por el uso reducido de fertilizantes en estos casos (Kaye & Quemada, 2017). En CS de leguminosas, estas pueden fijar aproximadamente 30 kg N Mg⁻¹ de materia seca mediante FBN (García et al., 1994). Así como la especie define la calidad del material, también lo hace el estado fisiológico del cultivo en el momento de supresión, cultivos en estado

reproductivo a supresión tendrán una relación C/N mayor que aquellos que no han alcanzado este estado de desarrollo, aumentando la posibilidad de favorecer el proceso de inmovilización (Álvarez et al., 2023).

La interpretación de la producción de biomasa aérea de los CS debe considerar el impacto que esta producción tiene sobre otras variables. Según Pinto et al. (2021), en CS de leguminosas que registran una producción de biomasa aérea alta, los aportes de FBN aumentan con la producción de biomasa de los cultivos.

2.3.2 Aumento de materia orgánica

La materia orgánica es el pilar de la productividad terrestre global y del suministro de alimentos y fibras. Se define MO a toda sustancia orgánica que contiene carbono (Corbella & Fernández de Ullivarri, 2008). En cuanto a sus efectos en el suelo, lo hace más friable, facilita la captación de agua en el perfil, retiene los nutrientes y ayuda a minimizar la compactación. A medida que la MO se descompone, es capaz de liberar N y otros nutrientes para los cultivos. Su contenido en el suelo y el potencial de mineralización del N en el suelo son la clave para determinar la cantidad necesaria de fertilizante nitrogenado que se debe agregar al sistema (Cordone & Hansen, 1986, como se cita en De Sá Pereira et al., 2012; Docampo, 2012; Jackson et al., 2017). Además del aporte que le hace a la fertilidad, el aumento de la materia orgánica repercute en una mejora la calidad física del suelo que ha sido medida a través de la mejora de estabilidad de los agregados (Docampo, 2012). Por lo tanto, desempeña un papel importante en la salud general de los suelos (Walia, 2022).

El contenido de materia orgánica en el suelo está influenciado por factores como la vegetación, el clima, la textura del suelo, el drenaje y las prácticas de laboreo (Docampo, 2012). Respecto al uso del suelo, determinadas medidas de manejo pueden modificar también contenido de MO en el suelo, la intensidad de uso del suelo, el tipo de cultivos incorporados en la secuencia (Álvarez & Ernst, 2024), el manejo nutricional del cultivo (Bolinder et al., 2020) y el manejo de los residuos son algunos de los más importantes (Ernst & Siri-Prieto, 2009).

Aumentar la intensidad de cultivos, permite aumentar la productividad anual de la secuencia de cultivos, determinando un aumento en el ingreso de carbono al suelo. Sin embargo, este proceso es dependiente de las especies que son introducidas en la rotación,

por afectar la calidad de los residuos incorporados (Mazzilli et al., 2018). La inclusión de CS incrementa la MO del suelo a través de su producción de biomasa aérea y radicular. Diferenciar en parte aérea o radicular es importante debido a que, el 50 % de la biomasa radicular se transforma en MO del suelo, y tan solo el 5% la parte aérea. Especies que generen una alta cantidad de raíces finas y exudados radicales normalmente logran mayores aportes de raíces (Jackson et al., 2017). Según Salvagiotti et al. (2013) esto también beneficia a las fracciones más livianas o lábiles, las cuales son clave para la estabilidad de los macroporos del suelo. Por lo tanto, la inclusión de CS permite mantener una buena estructura del suelo (Scianca et al., 2013; Vanzolini et al., 2013).

2.3.2.1 Producción aérea y radicular de los cultivos de servicio

Diferentes CS generan rendimientos variables de biomasa aérea, los cuales dependen de factores como clima, el tipo de suelo y las condiciones de manejo. Se han reportado producciones de biomasa para cultivos como *Avena strigosa*, *Avena byzantina*, *Vicia villosa*, *Lupinus angustifolius*. En este sentido, en un estudio realizado por Bondaruk et al. (2024), en el que se evaluó la producción de biomasa aérea para distintas especies utilizadas en CS, reporta que *Vicia villosa* produjo promedialmente en el rango de 4600 y 5300 kg MS ha⁻¹ de biomasa aérea, mientras que *Avena strigosa* alcanzó una producción promedio de 6100 a 6800 kg MS ha⁻¹. Resultados similares fueron reportados por Pereyra Grecco y Morán Valleo (2024), con producciones de biomasa aérea de 5933 kg MS ha⁻¹ para *Vicia villosa* y 7364 kg MS ha⁻¹ para *Avena strigosa*. Además, en este trabajo también se incluyeron otros CS, como *Lupinus angustifolius* y *Avena byzantina* con producciones de biomasa aérea de 3757 kg MS ha⁻¹ y 6621 kg MS ha⁻¹ respectivamente. Tanto en Bondaruk et al. (2024) como en el trabajo de Pereyra Grecco y Morán Valleo (2024), se observa que *Avena strigosa* es la especie que presenta la mayor producción de biomasa aérea.

Es importante tener en cuenta la producción de biomasa radicular a la hora de seleccionar un CS, debido a que una producción alta puede incrementar las reservas de materia orgánica del suelo y mejorar las propiedades físicas del mismo (Pinto et al., 2021). Es así, que la inclusión de CS en la rotación permite reducir la compactación del suelo, aumentar la porosidad y, en consecuencia, la tasa de infiltración de agua del suelo (Chen et al., 2014).

Según Pinto et al. (2021) la producción de biomasa radicular es una característica mayormente dependiente de la especie utilizada y en menor medida, del ambiente. En su trabajo, evaluó la producción de biomasa radicular y aérea para diferentes especies de leguminosas de invierno, también concluye que, para aumentar las entradas de N y la formación de materia orgánica del suelo la selección del CS no debe basarse únicamente en la producción de biomasa aérea. Dado que la producción de biomasa radicular es una característica de importancia para incrementar las reservas de carbono orgánico del suelo.

Según Pereyra Grecco y Morán Valleo (2024) es importante obtener una producción de biomasa aérea alta para lograr una alta producción de biomasa radicular. En su trabajo se evaluó la producción de biomasa radicular de *Avena strigosa*, *Avena byzantina*, *Vicia villosa*, *Lupinus angustifolius* y mezclas de estas especies, registrando una producción promedio de biomasa radicular de 721 kg MS ha⁻¹, 950 kg MS ha⁻¹, 468 kg MS ha⁻¹ y 531 kg MS ha⁻¹ respectivamente. De todos los tratamientos analizados en el experimento, la mezcla de *Avena strigosa* + *Vicia villosa* alcanzó la mayor producción promedio de biomasa radicular, registrando 1105 kg MS ha⁻¹. De acuerdo con la información presentada anteriormente, esta mezcla registró el mayor aporte de N en el experimento, resaltando un beneficio por la utilización de mezclas en la realización de CS.

2.4 ESPECIES DE CULTIVOS DE SERVICIO

Existen numerosas especies de CS que pueden integrarse en la rotación agrícola para proveer alguno de los servicios ecosistémicos detallados. Estas se pueden clasificar en dos grupos: aquellas capaces de fijar N (leguminosas) y aquellas que no (no leguminosas). Pudiendo agregar un grupo que consista en la mezcla de dos o más especies de CS, para lograr obtener los beneficios de distintas categorías de especies (Walia, 2022).

2.4.1 Grupos funcionales

Agrupar especies dentro de grupos funcionales ofrece la posibilidad de obtener un análisis de la biodiversidad con el estudio de las comunidades bióticas y los ecosistemas, investigando cómo diversos grupos de organismos influyen en la estructura y dinámica de estas comunidades, así como la relevancia de estos grupos en relación con distintas funciones del ecosistema (Loreau et al., 2002, como se cita en Martínez Ramos, 2008).

En cuanto al manejo de las especies que componen a los grupos funcionales que se presentarán a continuación, los factores claves que determinan el éxito de este tipo de cultivo son la fecha de siembra, elección del cultivo, fertilización, mezcla de especies a utilizar. En cuanto a la fecha de siembra según Sullivan (2003), un CS de invierno se siembra a finales de verano o mediados del otoño con el objetivo de brindar cobertura durante la estación invernal al suelo. Según Ernst (2004) la fecha de siembra y la supresión de este CS se definen por las del cultivo antecesor y el sucesor, respectivamente.

2.4.2 Gramíneas

En cuanto a los aportes que este grupo funcional realiza en el suelo, se destaca su rol para prevenir la pérdida de suelo por erosión, reducir la pérdida de nutrientes por lixiviación (Kruger & Quiroga, 2013), controlar malezas (Hernández Santiesteban et al., 2009; Soumoulou, 2021) y aumentar los niveles de C del suelo (Blanco-Canqui et al., 2015). Los cuales se encuentran asociados a características de esta familia como su alta tasa de crecimiento inicial, alto nivel de productividad y su rastrojo de lenta descomposición (Pinto et al., 2023).

2.4.2.1 Avena strigosa

La *Avena strigosa* o “Avena negra” es de las especies más utilizadas como CS a nivel nacional. En cuanto a su ciclo es anual y corto. Tiene porte erecto y sus hojas son finas de color verde intenso (Carriquiry et al., 1993).

Posee una buena adaptación tanto a siembras en línea como al voleo con una densidad de 35-45 kg ha⁻¹ (Kaspary et al., 2022). Puede ser sembrada desde finales de febrero hasta inicios de invierno (de febrero a junio) (Gilsanz, 2012). Sin embargo, según Rebuffo (2000) las siembras realizadas en enero y febrero tienden a tener una densidad más baja y una distribución irregular. Aunque la avena puede ser sembrada en períodos muy tempranos, germinando y creciendo con menos humedad que otros CS invernales, existe un alto riesgo de pérdida total del cultivo durante este período, por lo que no se recomienda esta práctica de manera recurrente o generalizada. Se debe tener en cuenta evitar las elevadas temperaturas de verano y disponer de humedad en el suelo (Pereira & Gandara, 2013). Tiene alta producción temprana de forraje, normalmente entre 2000-

7000 kg MS ha⁻¹ (Zanoniani & Ducamp, 2000). Es resistente al ataque de roya y pulgones, y se adapta bien a suelos con baja fertilidad y bajo pH (Gilsanz, 2012).

2.4.2.2 Avena byzantina

La *Avena byzantina* o “Avena amarilla”, presenta ciclo intermedio a largo, de porte semi postrado a semi erecto, con hojas finas color verde claro y cañas finas (Carriquiry et al., 1993). Presenta un desarrollo más lento que *Avena strigosa* (Gilsanz, 2012).

Según Perrachon (2011) se puede sembrar a partir de mediados de febrero. Su producción se enfoca principalmente en la temporada de invierno y puede ser sembrada sola o en asociación con leguminosas. Se utiliza ampliamente como una regeneradora del suelo eficiente en el reciclaje de nutrientes. Presenta una rusticidad mayor que el trigo y tolera suelos más ácidos. No se recomienda sembrarla en suelos propensos a encharcamientos. En cuanto a su densidad de siembra, con 60 kg ha⁻¹, se han reportados rendimientos de 6600 kg MS/ha⁻¹ (Pereyra Grecco & Morán Vallejo, 2024). Según Zanoniani y Ducamp (2000) su aporte primaveral puede alcanzar los 7000 kg MS ha⁻¹. Sanitariamente, tiene una resistencia a enfermedades menor a la *Avena strigosa* (Gilsanz, 2012). Según Carámbula (1977, como se cita en Achard Muñoz & Reilly Arrarte, 2001), puede presentar problemas de *Puccinia coronata avenae* y *Schizophis graminum*.

2.4.3 Leguminosas

Los monocultivos de leguminosas aportan la mayor proporción del N a través de la fijación biológica y contribuyen rápidamente a aumentar los niveles de nitrógeno disponible en suelo debido a la baja relación C/N de sus residuos (Leveron Rosa, 2020). Esto puede tener un efecto de mejora sobre el rendimiento del cultivo posterior al CS. En maíz se ha comprobado la existencia de una interacción significativa para el rendimiento en grano con la utilización de CS con leguminosas cuando se comparó contra una situación sin CS de leguminosa antecesor (Ernst, 2004).

A partir de su producción de biomasa subterránea los CS de leguminosas pueden aumentar el C de la MOS (Frasier et al., 2016). En cuanto a otros efectos en el suelo derivados de la utilización de este grupo funcional, se ha comprobado algunas especies

de leguminosas (ejemplo: *Lupinus angustifolius*) contribuyen a descompactar el suelo y liberar fósforo, el cual estará disponible para el cultivo siguiente (Pauletti Dubosc, 2018).

2.4.3.1 *Lupinus angustifolius*

El *Lupinus angustifolius* o “Lupino azul” (nombre vulgar), es una leguminosa de ciclo anual, su altura es de 30-80 cm aproximadamente, posee hojas digitadas con 5-9 folíolos, su tallo es erguido, ramificado y con presencia de pelos (Dietl et al., 2009). Además, posee un sistema radicular pivotante y profundo que mejora las propiedades físicas del suelo al promover la descomposición y reciclar una cantidad significativa de nutrientes (Gilsanz, 2012). Según Maltese y Mazzilli (2024) es altamente efectiva en la FBN a través de bacterias que forman nódulos en sus raíces. Es posible lograr una correcta implantación de esta especie a mediados de abril. La densidad de siembra utilizada en experimentos en Uruguay ronda los 120 kg ha⁻¹. Su productividad es aproximadamente de 8400 kg MS ha⁻¹ y su aporte por FBN es de alrededor de 90 kg de N ha⁻¹. Prospera en suelos arcillosos y de fertilidad media (Gilsanz, 2012).

2.4.3.2 *Trifolium resupinatum*

El *Trifolium resupinatum* o “Trébol Persa” (nombre vulgar) es una leguminosa anual invernal que puede medir hasta 90 cm de altura, tiene hojas grandes y raíces robustas con ramificaciones, tallos huecos y gruesos. Se adapta especialmente bien a suelos bajos, pesados y húmedos, y tolera heladas intensas manteniéndose verde, aunque su desarrollo es más lento en temperaturas bajas. Se puede sembrar desde marzo hasta agosto durante el otoño-invierno. Para lograr una buena producción de forraje, es aconsejable sembrar temprano en el otoño, preferiblemente entre marzo y principios de abril, para aprovechar el crecimiento invernal y el inicio de la primavera. Si se siembra más tarde, la producción de forraje puede disminuir. La densidad de siembra recomendada (cultivar LE 90-93) es de 6-8 kg ha⁻¹ mientras que en mezcla se recomienda de 4-6 kg ha⁻¹ (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.a).

Según INIA (s.f.b) es una leguminosa anual que responde mejor al frío en comparación con otras especies, su crecimiento, incluida su capacidad para competir con malezas y proporcionar cobertura, está fuertemente influenciado por la temperatura. Su productividad puede alcanzar niveles de 7000-8000 kg MS ha⁻¹ (INIA, s.f.a). Según De Sá Pereira et al. (2017) su relación C/N se encuentra en rangos de 12-17:1.

2.4.3.3 *Vicia villosa*

La *Vicia villosa* o “Vicia” (nombre vulgar) es una leguminosa anual, tiene un crecimiento inicial lento, posee un hábito de crecimiento postrado que le permite proporcionar una buena cobertura del suelo (Gilsanz, 2012). Sus hojas son paripinnadas y con pelos. Los tallos sostienen inflorescencias pedunculadas, con 7-22 flores de color azuladas o violáceas a púrpuras (Zarco, 1999). Se puede sembrar a la salida del verano e inicios de otoño y puede mezclarse con avena negra. Su densidad de siembra recomendada en la línea es de 15 a 30 kg ha⁻¹, siendo el número de plantas objetivos de entre 40 y 50 plantas por m⁻² (Gilsanz, 2012). Puede desarrollarse en suelos ácidos con presencia de aluminio, pero prefiere suelos con un pH entre 6 y 7. Su relación C/N es baja siendo de entre 8-15:1 (Gilsanz, 2012). Otros autores reportan relaciones C/N mayores, de entre 10-23:1 para esta misma especie (Carciochi et al., 2023). Su productividad puede alcanzar niveles de 7300 kg MS ha⁻¹ (Gilsanz, 2012). Dentro de las leguminosas, se caracteriza por lograr un buen control de malezas, explicado por poseer un efecto alelopático leve y lograr una rápida cobertura (Gilsanz, 2012).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 SITIO DE ESTUDIO

El experimento fue llevado a cabo en el departamento de Paysandú en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Facultad de Agronomía, institución perteneciente a la Universidad De La República Oriental del Uruguay. El ingreso al predio se encuentra ubicado en el km 363 sobre la ruta nacional n°3. (latitud: -32.3776, longitud -58.0444)

3.2 CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS EDÁFICOS

El suelo donde se realizó el experimento pertenece a la unidad San Manuel de la carta de reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 (D.S.F.) con un índice de Productividad de 149 (Altamirano et al., 1976). Los suelos dominantes son Brunosoles Eutricos Lúvicos, de color pardo muy oscuro, textura franco arcillo limosa, fertilidad alta y moderada a imperfectamente bien drenados, y Solonetz.

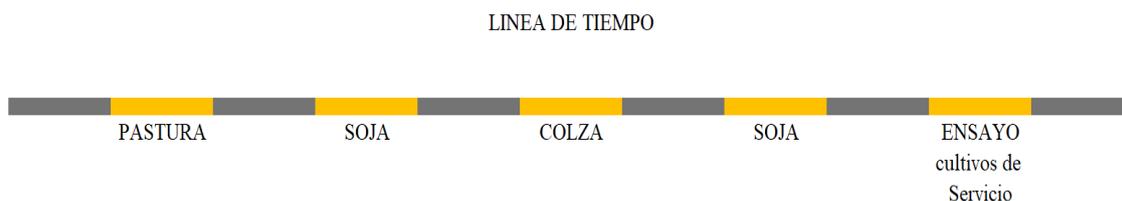
3.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

3.3.1 Uso del suelo

El experimento se instaló sobre un cultivo de soja y dentro de un sistema de rotación con pasturas (Figura 2).

Figura 2

Uso del suelo previo al experimento



3.3.2 Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue en bloques completamente al azar. Las especies utilizadas fueron: *Avena strigosa*, *Avena byzantina*, *Vicia villosa*, *Trébol resupinatum*, *Lupinus angustifolius*. Las cuales fueron sembradas en tres bloques (repeticiones), conteniendo cada bloque 11 tratamientos, con 6 especies puras, 4 en mezcla y un barbecho invernal. El tamaño de unidad experimental fue de 170m² (4.18

metros de ancho y 40 metros de largo) y, el área total del experimento fue de 0.56 hectáreas.

Figura 3

Tratamientos totales del experimento

BLOQUE 1										
Avena strigosa baja + Vicia villosa Tratamiento 7	Avena strigosa alta + Vicia villosa Tratamiento 8	Avena strigosa sin fertilizar Tratamiento 1	Lupinus angustifolius Tratamiento 5	Avena byzantina alta + Vicia villosa Tratamiento 9	Avena byzantina baja + Vicia villosa Tratamiento 10	Barbecho Tratamiento 2	Vicia villosa Tratamiento 3	Trébol resupinatum Tratamiento 6	Avena strigosa Tratamiento 4	Avena byzantina Tratamiento 11

BLOQUE 2										
Avena strigosa sin fertilizar Tratamiento 1	Trébol resupinatum Tratamiento 6	Avena byzantina Tratamiento 11	Barbecho Tratamiento 2	Avena strigosa Tratamiento 4	Avena strigosa baja + Vicia villosa Tratamiento 7	Avena strigosa alta + Vicia villosa Tratamiento 8	Lupinus angustifolius Tratamiento 5	Avena byzantina alta + Vicia villosa Tratamiento 9	Vicia villosa Tratamiento 3	Avena byzantina baja + Vicia villosa Tratamiento 10

BLOQUE 3										
Avena strigosa baja + Vicia villosa Tratamiento 7	Lupinus angustifolius Tratamiento 5	Avena strigosa alta + Vicia villosa Tratamiento 8	Vicia villosa Tratamiento 3	Trébol resupinatum Tratamiento 6	Avena byzantina alta + Vicia villosa Tratamiento 9	Avena strigosa sin fertilizar Tratamiento 1	Barbecho Tratamiento 2	Avena byzantina baja + Vicia villosa Tratamiento 10	Avena byzantina Tratamiento 11	Avena strigosa Tratamiento 4

3.3.3 Manejo del cultivo de servicio

La siembra de los CS se realizó el 6 de junio de 2023. El ancho de entre fila fue de 19 cm. Las densidades de siembra utilizadas se muestran en la tabla N°2.

Tabla 2*Densidad de siembra según tratamiento y especie.*

Tratamiento	Especie 1	Especie 2	Densidad E1	Densidad E2
			(kg/ha)	(kg/ha)
1	<i>Avena strigosa</i>		15	0
2	<i>Barbecho</i>		0	0
3	<i>Vicia villosa</i>		30	0
4	<i>Avena strigosa</i>		40	0
5	<i>Lupinus angustifolius</i>		120	0
6	<i>Trifolium resupinatum</i>		8	0
7	<i>Avena strigosa</i>	<i>Vicia villosa</i>	15	30
8	<i>Avena strigosa</i>	<i>Vicia villosa</i>	30	30
9	<i>Avena byzantina</i>	<i>Vicia villosa</i>	45	30
10	<i>Avena byzantina</i>	<i>Vicia villosa</i>	22.5	30
11	<i>Avena byzantina</i>		60	0

En cuanto al manejo nutricional de los tratamientos, fueron fertilizadas con 50 kg de 46-0-0 (UREA) las gramíneas puras, y por otra parte, los tratamientos mezclas y leguminosas puras se fertilizaron con una dosis de 100 kg ha⁻¹ de 7-40-0 a la siembra.

Tabla 3*Manejo fitosanitario de los cultivos de servicios*

Actividad	Fecha	Herbicida	Dosis (l/ha)
Aplicación herbicida pre-siembra	01/06/2023	Glifosato	3
Aplicación herbicida pre-siembra	01/06/2023	Paraquat	2
Desecación de los cultivos de servicio	12/10/2023	Glifosato	3
Desecación de los cultivos de servicio	12/10/2023	Banvel	0.4
Desecación de los cultivos de servicio	12/10/2023	Clethodim	2

3.3.4 Estimación de biomasa

El 9 de octubre de 2023 se llevó a cabo el procedimiento de estimación de biomasa de los diferentes tratamientos, el mismo consistió en realizar cuatro cortes de biomasa aérea, utilizando un cuadro de 0.25 m², el cual se colocó aleatoriamente cuatro veces dentro de cada parcela. Se separó biomasa de los CS de la biomasa de malezas y se pesó en el campo la muestra total de los CS. Para el caso de las mezclas se pesó cada componente por separado. Posteriormente se tomó una muestra representativa y se volvió a pesar la submuestra en fresco, se realizó el etiquetado y las mismas fueron colocadas en bolsas. Se dejaron en estufa por 48 horas a 60°C y se pesó la submuestra en seco para obtener el porcentaje de materia seca (MS). Con este valor se calculó la materia seca total del peso fresco total y se estimó la productividad por hectárea de biomasa seca aérea (kg MS ha⁻¹).

El 10 de octubre de 2023, se tomaron muestras mediante la realización de dos cortes en el suelo en los tratamientos N°3, N°4, N°5, N°6, N°7, N°10, N°11. Con una pala de 20 cm de profundidad se realizó un corte de 20 cm de ancho y 60 cm de largo, donde se extrajeron por corte dos plantas enteras (raíz y parte aérea). Luego de la obtención de las muestras se procedió a embolsar y rotular las mismas, para una fácil identificación con sus respectivos datos como especie, variedad, número de tratamiento y bloque. Retiradas las muestras del potrero se comenzó con el proceso de limpieza y secado. Para la limpieza se realizaron agujeros a las bolsas de las muestras y se sumergió solo la parte radicular de cada una de ellas, en agua con Cloruro de sodio (NaCl), en recipientes de 80 litros durante 14 horas (con el fin de facilitar el lavado de raíces). Posteriormente, cada muestra fue lavada con agua para la eliminación de terrones de tierra.

El 11 de octubre culminada la etapa de limpieza, las plantas fueron trasladadas al invernáculo, donde permanecieron durante nueve días. Luego en el laboratorio, se procedió a realizar una limpieza más detallada utilizando un cepillo para evitar daños a las estructuras radiculares. Luego de separar, limpiar e identificar las muestras, se llevaron aquellas que contenían exceso de humedad a la estufa de secado (60°C), donde permanecieron por 48 horas.

Finalmente, se separó parte aérea de raíz y se pesaron para obtener datos de biomasa en base seca de ambas partes, para posteriormente realizar el cálculo de la relación parte aérea/raíz. Con la determinación de la relación parte aérea/raíz y la biomasa seca por hectárea de casa CS se determinó la producción de raíces en los primeros 20 cm de profundidad.

3.3.5 Estimación de nitrógeno

Luego de pesar las muestras para medir biomasa fueron molidas para estimar la concentración de N de cada tratamiento. Para ello se agruparon los mismos tratamientos de los diferentes bloques en bolsas y se identificaron por especie, tratamiento y bloque. Cabe destacar que en el caso de los tratamientos mezcla (Especie 1 + Especie 2) fueron separadas las dos especies en bolsas diferentes. Luego se enviaron las muestras para su análisis en laboratorio, el método Kjeldahl fue el utilizado para medir N, de donde resulta el aporte de N contenido en la biomasa (aérea + raíz) en cada tratamiento.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En cuanto al procesamiento de los datos obtenidos a campo y en laboratorio, el mismo fue realizado con el software estadístico Infostat. Para el análisis del efecto de los tratamientos de CS sobre las variables estudiadas, se ajustó el modelo de Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA), su ecuación es la siguiente:

$$ij = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad \text{con } \varepsilon_{ij} \text{ iid } \sim N(0; \sigma^2)$$

Siendo:

Y_{ij} = Variable de respuesta estudiada.

μ = Media poblacional.

τ_i = Efecto relativo del i-ésimo tratamiento.

β_j : Efecto de los bloques.

ε_{ij} = Error experimental.

$i = 1, 2, \dots, 11$ tratamientos.

$j = 1, 2, 3$ repeticiones.

Se realizó un análisis de varianza (ANAVA). Se observaron las medias para cada tratamiento y sus comparaciones mediante la prueba de Tukey, evaluando la existencia o no de diferencias significativas entre tratamientos para las diversas variables estudiadas.

El nivel de significancia utilizado fue de (p-valor) 0,05. Por otra parte, se realizaron análisis de regresión lineal para obtener comparaciones de las características entre los diversos tratamientos, así también, identificar y cuantificar la relación entre las variables en estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

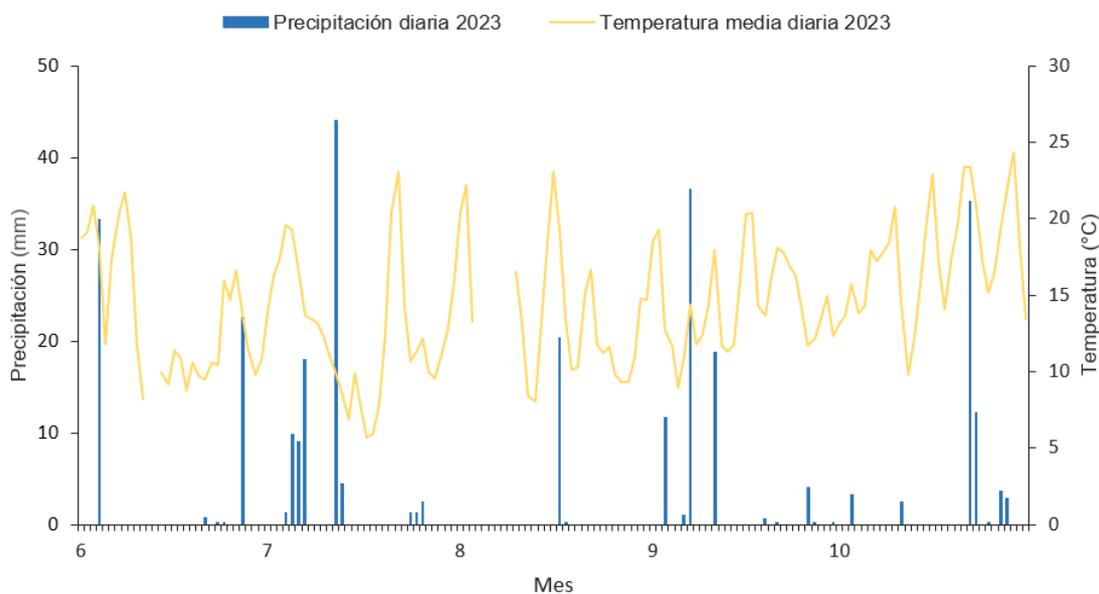
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Se presentan las precipitaciones y temperaturas mensuales registradas durante el experimento (junio 2023- octubre 2023) (Figura 4). En el periodo de evaluación, las precipitaciones fueron menores a la media histórica (1991-2020). Esta diferencia es de 15 mm, 54 mm y 61.4 mm para los meses 6, 8 y 10 del año 2023 respectivamente (Instituto Uruguayo de Meteorología [INUMET], s.f.). La precipitación total fue de 301.6 mm, mientras que la media histórica para ese mismo periodo según INUMET (s.f.) es de 402 mm.

Se registraron temperaturas medias para el mes de junio de 13.6°C y julio de 12.7 °C, superando a la media mensual histórica por +1°C y +0.8°C respectivamente. Para los meses de agosto, septiembre y octubre, en el primero de ellos la temperatura llega a una igualdad en promedio según datos extraídos de INUMET (s.f.), registrando 13.8°C, y para los dos últimos meses fueron menores a las registradas en el histórico mensual.

Figura 4

Régimen de precipitaciones y temperatura 2023



Nota. Elaborado a partir de datos de S. Álvarez (comunicación personal, 8 de octubre, 2024).

El ambiente durante los meses evaluados registró menor disponibilidad hídrica que el promedio histórico para dicho periodo (-100.4 mm). El experimento comenzó con un periodo de crecimiento en el que se registraron temperaturas mayores a las medias históricas mensuales, y finaliza con un periodo de crecimiento más frío al esperado.

4.2 PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y RADICULAR DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO

Existieron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) en la producción de biomasa aérea, biomasa radicular, relación aérea/parte raíz y biomasa total al analizarlo según tratamiento y grupo funcional (Tabla 4).

Los tratamientos con *Avena strigosa* (pura y en mezcla) y *Avena byzantina* pura alcanzaron los mayores niveles de producción de biomasa aérea y total, diferenciándose de los demás tratamientos mezclas y leguminosas puras ($p \leq 0,05$). Esta diferencia se mantuvo para la producción de raíces, con la excepción de *Vicia villosa* y su mezcla con *Avena byzantina* y *Avena strigosa*, las cuales alcanzaron niveles de productividad similares a las avenas puras ($p \leq 0,05$). Los tratamientos con *Lupinus angustifolius* y *Trébol resupinatum* puros son los que registran los mayores valores de relación parte aérea/raíz, evidenciando una menor producción de raíces por kg de biomasa aérea producida.

Por grupo funcional, las gramíneas y las mezclas se diferenciaron de las leguminosas ($p \leq 0,05$) para las variables biomasa aérea, biomasa radicular y biomasa total. Las leguminosas registran la mayor relación parte aérea/raíz, esto implica una menor producción de biomasa radicular en función de cada kg de biomasa aérea producida, también registrando una menor producción de biomasa aérea. Para la variable parte aérea/raíz, las leguminosas se diferencian de las gramíneas, pero no de las mezclas ($p \leq 0,05$).

Tabla 4*Producción de biomasa y relación parte aérea/raíz de los diferentes tratamientos*

Tratamientos	Biomasa aérea (kg MS ha ⁻¹)	Biomasa radicular (kg MS ha ⁻¹)	Biomasa total (kg MS ha ⁻¹)	PA/R ^b
Av.Negra	10398 ± 1358 a	1921 ± 504 a	12319 ± 868 a	5,75 b
Av.N+Vicia	8838 ± 993 ab	1539 ± 594 ab	10377 ± 1536 ab	6,13 b
Av.Amarilla	7854 ± 1158 abc	1490 ± 590 ab	9344 ± 1676 abc	5,61 b
Av.A+Vicia	7376 ± 616 bc	1361 ± 88 ab	8738 ± 686 bc	5,42 b
Lupino	5789 ± 2080 cd	477 ± 175 b	6266 ± 2255 cd	12,18 a
Vicia	3461 ± 575 de	919 ± 355 ab	4380 ± 750 d	4,19 b
Trébol	2919 ± 389 e	366 ± 389 b	3286 ± 520 d	8,56 ab
Gramíneas ^a	9126 ± 1793 a	1705 ± 544 a	10831 ± 2020 a	5,68 b
Mezcla ^a	8107 ± 1090 a	1450 ± 392 a	9557 ± 1392 a	5,78 ab
Leguminosas ^a	4056 ± 1494 b	587 ± 342 b	4644 ± 1568 b	8,31 a

Nota. ^a Grupos funcionales. ^b Relación parte aérea/raíz. Letras iguales en una misma columna no difieren estadísticamente ($p > 0,05$).

Los resultados coinciden con Castro et al. (2017), donde se muestran producciones de biomasa aérea para *Avena strigosa* del orden de los 10.000 kg MS ha⁻¹, similares a las obtenidas en este experimento. Asimismo, para el tratamiento que incluye *Avena strigosa* + *Vicia villosa*, las producciones son consistentes con las reportadas por Pereyra Grecco y Morán Valleo (2024) y Bondaruk et al. (2024). Estos autores sostienen que la combinación de estas especies, respetando las densidades de siembra recomendadas, puede lograr rendimientos comparables a los obtenidos en los tratamientos puros más productivos. En contraste, las producciones más bajas se observan en *Trifolium resupinatum*, sin alcanzar los rendimientos reportados por García (1995), que oscilan entre 4400 y 10600 kg MS ha⁻¹. Esta producción baja puede deberse a la susceptibilidad de esta especie a siembras tardías, en comparación con el resto de las especies (INIA, s.f.a).

El grupo funcional de las gramíneas es el que registra las mayores producciones de biomasa aérea, seguido por las mezclas, aunque no se observan diferencias estadísticas entre sí ($p \leq 0,05$). Sin embargo, cuando estos grupos son comparados contra leguminosas, se detectan diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Esto coincide con los

resultados obtenidos por Liu et al. (2023), en su trabajo afirma que, al comparar la producción de biomasa total de gramíneas y leguminosas en condiciones de monocultivo con mezclas de estas especies, estas últimas presentan una mayor productividad en comparación con el monocultivo de leguminosas.

Las producciones de biomasa radicular difieren con estudios previos realizados por Pereyra Grecco y Morán Vallejo (2024), donde se registraron valores de biomasa radicular de entre 720-950 kg MS ha⁻¹ para las avenas puras, pero son coincidentes con las reportadas por Bondaruk et al. (2024). La especie *Vicia villosa* registra una producción de biomasa radicular similar a las reportadas por Pinto et al. (2021). Asimismo, las producciones de biomasa radicular para *Trifolium resupinatum* son considerablemente inferiores a las reportadas por Pinto et al. (2021), quienes estimaron valores cercanos a 1000 kg MS ha⁻¹, incluso en diferentes años. Sin embargo, los restantes tratamientos registraron valores superiores a los hallados en los experimentos de Pinto et al. (2021) y Pereyra Grecco y Morán Vallejo (2024), pudiendo deberse a las bajas precipitaciones para el periodo en estudio. En un trabajo realizado por Liu y Li (2005), cultivos en déficit hídrico presentaron un mayor crecimiento radicular en etapas iniciales del cultivo, a causa de una exploración radicular más profunda para abastecer sus necesidades hídricas. Según Benjamin et al. (2014), evaluado en un cultivo de renta, ante una situación de deficiencia hídrica, tiene una mayor afectación el crecimiento de biomasa aérea por déficit hídrico en comparación con el crecimiento de biomasa radicular. Aquellas especies que logran producciones de biomasa radicular bajas aumentan su relación entre parte aérea/raíz, tal es el caso de *Lupinus angustifolius*, que a su vez registra una producción de biomasa aérea alta, lo que lo hace ser el tratamiento con mayor relación parte aérea/raíz (Tabla 4).

En cuanto a la producción de biomasa radicular obtenida por los grupos funcionales, se observa la mayor producción promedio en el grupo de las gramíneas, hecho reportado por Podzikowski et al. (2023). Sin embargo, esta producción no difiere estadísticamente cuando es comparada con las mezclas. Según Fornara et al. (2008), la presencia de grupos funcionales altamente complementarios mejora la producción de biomasa radicular. Se observan diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en cuanto a la producción de biomasa radicular entre los grupos gramíneas y leguminosas. Este hecho fue reportado por Pinto (2018), en su trabajo se observan diferencias significativas entre gramíneas y leguminosas en cuanto a producción de biomasa radicular. Esto puede

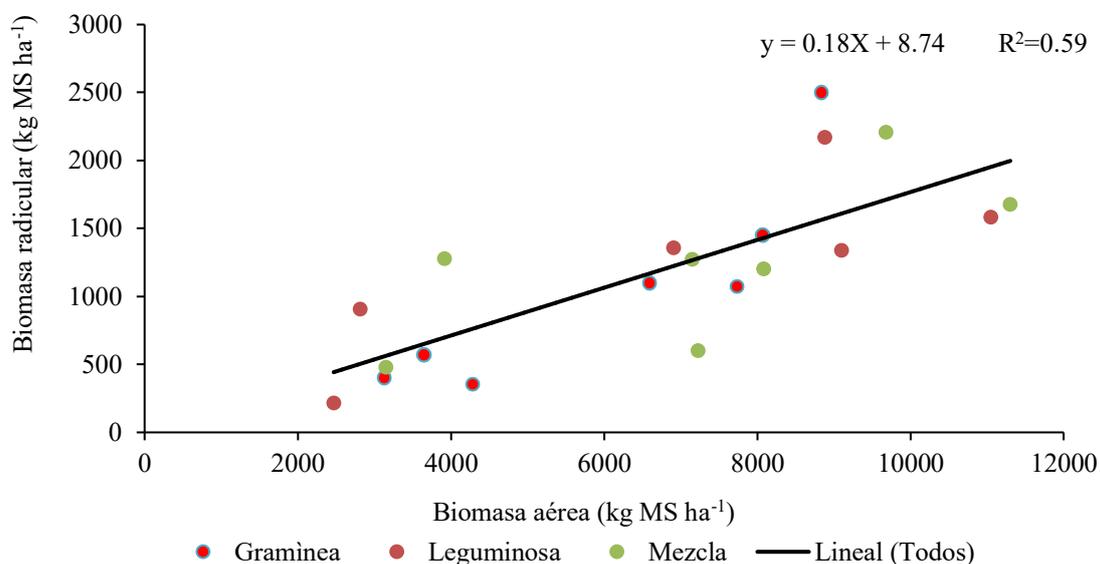
implicar la existencia de características intrínsecas en los valores de relación parte aérea/raíz de estos grupos funcionales.

La mayor producción promedio de biomasa total es obtenida por la especie *Avena strigosa* (pura), con una producción de 12319 kg MS ha⁻¹, la cual es superior a la reportada por Bondaruk et al. (2024). En contraste, *Trébol resupinatum* obtuvo el menor registro de producción de biomasa total, con 3286 kg MS ha⁻¹, menor a valores reportados por Pinto et al. (2021). Los demás tratamientos superaron ampliamente los rendimientos reportados por Pereyra Grecco y Morán Valleo (2024) en cuanto a producción de biomasa total, a excepción de *Vicia villosa*, la cual obtuvo un rendimiento menor al registrado por estos autores, pero similar al reportado por Pinto et al. (2021). Por grupos funcionales, lo reportado por Liu et al. (2023) en producción de biomasa aérea se mantiene también para la variable producción biomasa total.

La producción de biomasa radicular es dependiente tanto de la producción de biomasa aérea (Figura 5) como de la especie (Tabla 4), por lo que se acepta la hipótesis 1 (Figura 5). Se encontró una relación lineal y positiva ($y = 0,18x + 8,74$) entre la producción de biomasa aérea de todos los CS y la producción de biomasa radicular. Esta relación indica una producción aproximada de 18 kg MS ha⁻¹ de biomasa radicular cada 100 kg MS ha⁻¹ de biomasa aérea.

Figura 5

Producción de biomasa radicular en función de la biomasa aérea producida por los diferentes tratamientos



Esto es coincidente con lo reportado por Pereyra Grecco y Morán Valleo (2024), a mayor producción de biomasa aérea existe mayor producción de biomasa radicular. Lo cual difiere en este sentido de lo reportado por Pinto et al. (2021), quienes concluyen en su trabajo no haber encontrado relación entre estas variables. Sin embargo, en su trabajo afirman la existencia de una dependencia entre la producción de biomasa radicular y la especie, este hecho también fue reportado previamente por diversos autores (Fornara et al., 2008; Liu et al., 2023; Podzikowski et al., 2023). En este estudio el grupo funcional de las mezclas y gramíneas lograron una mayor producción de biomasa aérea y radicular cuando son comparados contra las leguminosas en promedio, lo cual afirma el beneficio en la producción de biomasa al hacer uso de mezclas.

4.3 APORTE DE NITRÓGENO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIOS

Existieron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) en el aporte de N y relación C/N, al analizarlo según tratamiento y grupo funcional (Tabla 5). *Avena byzantina* + *Vicia villosa* alcanzaron el mayor aporte de N. Se presentan diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) en las especies *Trifolium resupinatum* y *Avena byzantina* cuando son comparadas contra las restantes. *Avena strigosa* registró el mayor valor de relación C/N de todo el experimento. En contraste, el menor valor de relación C/N es representado por *Vicia villosa*.

De los grupos funcionales, leguminosas y mezclas fueron los que mayor aporte de N realizaron, diferenciándose de gramíneas ($p \leq 0,05$). Sin embargo, para la relación C/N se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) para los tres grupos funcionales, donde las leguminosas presentan la relación C/N más baja, siendo de forma contraria las gramíneas.

Tabla 5

Aporte de N y relación C/N de cada grupo funcional

Tratamiento	Aporte de Nitrógeno (kg/ha)		Relación C/N	
Av.N+Vicia	150,8 ± 13	a	28,09	d
Av.A +Vicia	144 ± 10	ab	24,57	e
Vicia	136,7 ± 23	ab	12,15	f
Av.Negra S/f	130,8 ± 14,3	ab	34,53	c
Av.Negra	106 ± 13	ab	47,06	a
Trébol	102,2 ± 14	b	13,52	f
Av.Amarilla	101,3 ± 15	b	37,21	b
Gramíneas ^a	112,7 ± 18,5	b	39,60	a
Leguminosas ^a	119,4 ± 25,3	ab	12,83	c
Mezcla ^a	138,6 ± 23,3	a	28,29	b

Nota. ^a Grupos funcionales. Letras iguales en una misma columna no difieren estadísticamente ($p > 0,05$).

De los tratamientos puros, *Vicia villosa* alcanzó el mayor aporte de N aportando 136.7 kg/ha, este es similar a los datos presentados por Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID, 2019) y Pinto et al. (2021), donde se indican aportes de N de hasta 151 y 143 kg/ha respectivamente. La relación C/N de esta especie fue la más baja del experimento, lo que sugiere alta disponibilidad de N, de acuerdo con los datos presentados por Carciochi et al. (2023), donde se registran relaciones C/N de entre 10-23 para esta especie. Según Sawchik et al. (2015), es importante considerar la rápida descomposición del rastrojo debido a esta baja relación C/N. Esto puede significar un aumento de rendimiento por mayor N disponible en el siguiente cultivo (Carciochi et al., 2023).

En cuanto a aportes de N en kg/ha los resultados coinciden con lo obtenido por Pereyra Grecco y Morán Valleo (2024), donde se afirma que las especies de leguminosas a pesar de haber registrado una producción de biomasa aérea sustancialmente menor al de *Avena strigosa* y *Avena byzantina*, presentan aportes de N similares y superiores en el caso de la *Vicia villosa*. Sin embargo, *Trébol resupinatum* registró aportes de nitrógeno menores a los reportados por Pinto et al. (2021), los cuales fueron del orden de 171 kg de N por hectárea.

En cuanto a los tratamientos mezcla, *Avena byzantina* + *vicia villosa* y *Avena strigosa* + *Vicia villosa*, mostraron una alta eficiencia en la fijación de N con un buen aporte del mismo y una relación C/N moderada, lo que sugiere una buena disponibilidad de N para las plantas. *Avena strigosa* + *Vicia villosa* presentó un aporte de N menor y una relación C/N más alta, indicando una menor disponibilidad de N en comparación con las otras mezclas. Duval et al. (2017) registró relaciones C/N similares a las presentadas (Tabla 5) para los tratamientos que incluyen la combinación *Avena Strigosa* + *Vicia villosa*, también en dicho experimento el aporte de N fue sensiblemente menor, siendo de 124 kg N/ha para la combinación anteriormente mencionada.

Los grupos funcionales de leguminosas y mezclas no difieren estadísticamente ($p \leq 0,05$) en su aporte de N, pero si se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) del primero si es comparado con gramíneas puras. Este hecho fue reportado por Restovich et al. (2019), en su estudio fueron comparadas las especies *Avena Strigosa L.*, *Vicia Villosa L.* y su mezcla, encontrando resultados concordantes a los presentados en la Tabla 5. Esto hace atractiva la implementación de CS mezcla en lugar de cultivos puros de gramíneas debido a su mayor aporte de N, el cual podría quedar disponible para el próximo cultivo. En cuanto a la relación C/N de los grupos funcionales, relaciones C/N de 12 como las registradas por las leguminosas permitirán altos aportes de N al sistema y una rápida descomposición del residuo, cuando son comparadas con las gramíneas. Sin embargo, las mezclas registran una relación C/N de 28, este valor se encuentra dentro de un rango óptimo para la realización del proceso de mineralización neta y a su vez, logra un aporte alto de N al sistema. También, se presume que el grupo funcional de las mezclas podría aportar una mayor cantidad de carbono al sistema por su mayor relación C/N, a diferencia de las leguminosas. Esto podría implicar una retención de nutrientes y la mantención en superficie del residuo sin descomponer por más tiempo, disminuyendo la erosión. Cabe

aclarar que, si bien el proceso de mineralización neta se encuentra en un rango óptimo en las mezclas, a mayor porcentaje de leguminosas en la mezcla, disminuye la relación C/N en mayor medida, lo que permite aumentar la velocidad de este proceso.

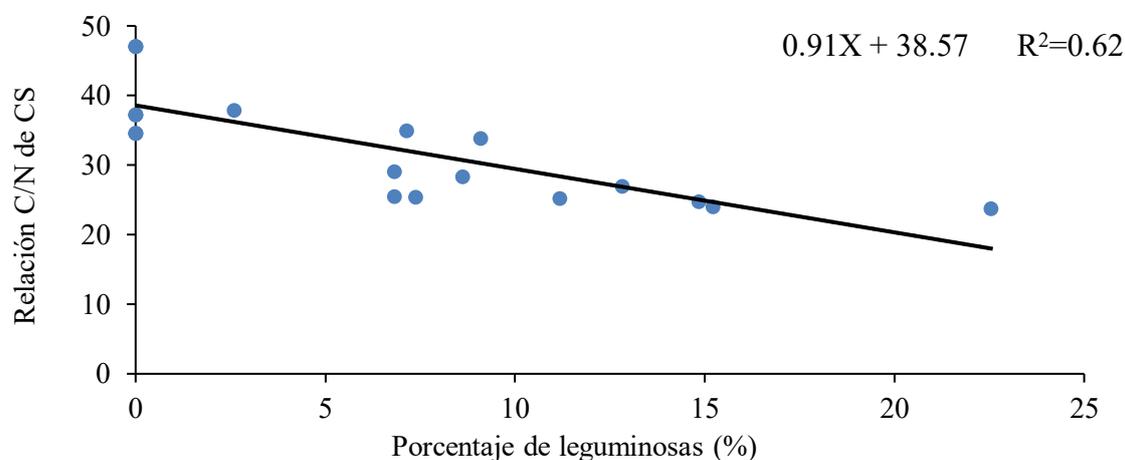
Para realizar una valoración económica del tratamiento que alcanzó el mayor aporte de N de las leguminosas (*Vicia villosa*), si se toma en cuenta que de los 136,7 kg N/ha el 51% son provenientes de la FBN para esta especie (Pinto, 2018), en su conversión a fertilizante nitrogenado estos equivalen 151,6 kg de urea. Considerando que el precio actual de la urea oscila los 320-350 U\$S por tonelada (“La urea”, 2024), el aporte de esta mezcla equivale a 50,8 U\$S/ha.

4.4 VARIACIÓN EN LA RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO

Existió una correlación negativa entre el aumento de porcentaje de leguminosas presente en la mezcla y la relación C/N de la biomasa producida. La relación C/N más baja de los tratamientos mezcla es cercana a la relación óptima según USDA (2011).

Figura 6

Relación C/N en función de la proporción de leguminosas



Los valores más bajos en la relación C/N se obtienen con mayor presencia de leguminosas en la mezcla. Esto no sucede cuando se incorporan más gramíneas a la mezcla, a medida que se alcanza la madurez de la planta la relación C/N aumenta considerablemente, obteniendo un residuo más difícil de mineralizar y menor disponibilidad de nutrientes para el cultivo siguiente (Gilsanz, 2008). Según Morón (1996), el N puede limitar el rendimiento en pasturas mezcla, una de las alternativas presentadas es el incremento de la FBN, a través de la mejora en productividad y

persistencia de las leguminosas. Esto destaca la importancia de su presencia en la mezcla. Por lo tanto, incorporar leguminosas en los CS puede ser una estrategia eficaz para mejorar la fertilidad del suelo y promover una mayor disponibilidad de N en menor tiempo. En este trabajo, donde los porcentajes de leguminosas establecidos para las mezclas fueron bajos (menores al 25%) en relación con las gramíneas, no se cumple la hipótesis 2, debido a que, si bien CS mezclas pueden igualar aportes de N realizados por CS de leguminosas, la calidad del material se ve condicionada por la composición del CS.

5. CONCLUSIONES

Del presente trabajo se concluye que, existe una correlación lineal positiva entre producción de biomasa aérea y biomasa radicular para los tratamientos evaluados, cumpliéndose la primera hipótesis planteada. Estas diferencias también se encuentran asociadas a las especies utilizadas, los CS que incluyeron gramíneas lograron la mayor producción de biomasa radicular en función de cada kg de biomasa aérea producida. La mayor producción de biomasa aérea y radicular lo obtuvieron los grupos funcionales de las gramíneas y mezclas, destacándose la *Avena strigosa*, la *Avena strigosa* + *Vicia villosa* y la *Avena byzantina pura*. En contraste, los tratamientos que obtuvieron los menores valores de producción de biomasa total pertenecen al grupo de las leguminosas, siendo *Trébol resupinatum* y *Vicia villosa* las especies que obtuvieron los menores registros.

Por otra parte, no se cumple la segunda hipótesis planteada. Si bien las mezclas lograron aportar cantidades de nitrógeno iguales a las leguminosas puras, lo hicieron con una relación C/N mayor. Explicado por un alto porcentaje de gramínea en la mezcla. Las mezclas *Avena strigosa* + *Vicia villosa* o *Avena byzantina* + *Vicia villosa*, son aquellas que registraron los mayores aportes de N, marcado en gran medida por la capacidad de esta última especie de fijar N atmosférico, resultando en una relación C/N intermedia. En contraste, los menores aportes de nitrógeno fueron realizados por las gramíneas, que no difieren estadísticamente de las leguminosas. Sin embargo, estas últimas obtienen la menor relación C/N, resultado esperable en CS de *Vicia Villosa* o *Trébol resupinatum* si se tiene en cuenta la fisiología de estas especies que componen este grupo. Lo contrario sucede con las gramíneas, las cuales presentan las relaciones C/N más elevadas de este experimento, tal es el caso de *Avena Strigosa*.

Creemos en la importancia de la realización de este tipo de experimentos en otros años y localidades, para disminuir desvíos no deseados en los resultados obtenidos, obteniendo una mayor fiabilidad por parte de quienes implementen CS en sus rotaciones. Para una implementación por parte de productores, es indispensable una evaluación en temas económicos/sustentables a un largo plazo que refleje los beneficios implícitos de la utilización de CS en las rotaciones agrícolas de Uruguay. A futuro, el estudio en líneas de investigación podría implicar la evaluación de una posible estratificación en el aporte de N especie-dependiente, debido a las diferencias claras que existen entre los tipos de

raíces entre las especies evaluadas. Replicando esto, no solo para nitrógeno, sino para otros nutrientes que presentan menor movilidad en el perfil del suelo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Achard Muñoz, S., & Reilly Arrarte, R. (2001). *Productividad de diferentes cultivares de avena* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/25685>
- Altamirano, A., Da Silva, H., Duran, A., Echevarría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol. 1. Clasificación de suelos*. MAP.
- Álvarez, S., & Ernst, O. (2024). Impact of cropping systems on soil quality. *European Journal of Agronomy*, 158, Artículo e127197.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127197>
- Álvarez, S., Núñez, A., & Baráibar, N. (2023). El rol de los cultivos de servicio en la mejora de la economía del nitrógeno. *Revista INIA*, (74), 98-102.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17385/1/Revista-INIA-74-set-2023-22.pdf>
- Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. (2019, 18 de octubre). *Cuantificando el aporte de nitrógeno de Vicia en la rotación*.
<https://www.aapresid.org.ar/blog/cuantificando-el-aporte-de-n-de-vicia-en-la-rotacion#>
- Baethgen, W. E. (1992). Dinámica del nitrógeno en sistemas de rotación cultivos-pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas*, (1), 3-25.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8834/1/15630031207133952.pdf>
- Baeza, S., & Paruelo, J. M. (2020). Land use/land cover change (2000–2014) in the Rio de la Plata grasslands: An analysis based on MODIS NDVI time series. *Remote Sensing*, 12(3), Artículo e381. <https://doi.org/10.3390/rs12030381>
- Benjamin, J. G., Nielsen, D. C., Vigil, M. F., Mikha, M. M., & Calderon, F. (2014). Water deficit stress effects on corn (*Zea mays*, L.) root: Shoot ratio. *Open Journal of Soil Science*, 4(4), 151-160. <https://doi.org/10.4236/ojss.2014.44018>

- Blanco-Canqui, H., Holman, J. D., Schlegel, A. J., Tatarko, J., & Shaver, T. (2013). Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: Effects on soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 77(3), 1026-1034. https://www.researchgate.net/publication/236964889_Replacing_Fallow_with_Cover_Crops_in_a_Semiarid_Soil_Effects_on_Soil_Properties
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., Shapiro, C. A., Elmore, R. W., Francis, C. A., & Hergert, G. W. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107(6), 2449-2474. <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2134/agronj15.0086>
- Bolinder, M. A., Crotty, F., Elsen, A., Frac, M., Kismányoky, T., Lipiec, J., Tits, M., Tóth, Z., & Kätterer, T. (2020). The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes in agroecosystems: A synthesis of reviews. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25, 929-952. <https://doi.org/10.1007/s11027-020-09916-3>
- Bondaruk, V., Piñeiro, G., Berensecher, P., Bardeggia, F., Robledo, G., Scalora, F., Zenklusen, C., González, A., Peralta, J., Penco, R., Torressi, M., & Bosaz, L. (2024). *Red de Cultivos de Servicios Aapresid-BASF: Informe final de resultados 2024*. Aapresid. <https://www.aapresid.org.ar/blog/red-cultivos-servicios-aapresid-basf-informe-final-resultados-2024>
- Carciochi, W. D., Cafaro La Menza, F., Crespo, C., Dominguez, G., Rodriguez, M. P., Reussi Calvo, N. I., Wyngaard, N., Sainz Rozas, H. R., Studdert, G., & Barbieri, P. (2023). Analysis of factors controlling maize yield response to hairy vetch and to nitrogen fertilization after hairy vetch. *Field Crops Research*, 303, Artículo e109138. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429023003313?via%3Dihub>
- Carriquiry, E., Ayala, W., Bermúdez, R., & Carámbula, M. (1993). Variedad de avena: Una condicionante del comportamiento de los verdes asociados. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Cultivos y verdes asociados de invierno* (pp. 20-29). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4150/1/Variedad-de-avena.pdf>

- Castro, M., Pereyra, S., Morales, X., & Cardozo, V. (2017). Cereales para la producción de forraje: cultivares de avena forrajera (*Avena byzantina* L., *Avena sativa* L. y *Avena strigosa* Schreb.), cebada (*Hordeum vulgare* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.). En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria & Instituto Nacional de Semillas (Eds.), *Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de especies forrajeras* (pp. 13-16).
<https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/PubForrajerasPeriodo2017.p3-16-Castro-et-al.pdf>
- Centurión, G., Brown, G. J., Domínguez, G. F., Tourn, S. N., Diez, S. N., & Studdert, G. A. (2018). Descomposición de residuos de cultivos puente verde: Dinámica y efecto sobre algunas propiedades del suelo. *Ciencia del Suelo*, 36(2), 129-141.
<https://www.suelos.org.ar/publicaciones/v36n2-html/vol36-n2-html/v36n2a12.htm>
- Chen, G., Weil, R. R., & Hill, R. L. (2014). Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, 136, 61-69. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198713001621?via%3Dihub>
- Corbella, R., & Fernández de Ullivarri, J. (2008). *Materia orgánica del suelo*. Universidad Nacional de Tucumán. <https://c24128d1f9.clvaw-cdnwnd.com/cc9e2589f17c4f55d2ad4fdf7a4703d4/200000213-e1634e1636/MATERIA%20ORG%20C3%81NICA%20DEL%20SUELO-6.pdf?ph=c24128d1f9>
- Dell'Acqua, M., & Beretta, A. (2020). Estimación del impacto de la implementación de la política de Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo en la reducción de las pérdidas de los suelos por erosión hídrica. En *Anuario OPYPA 2020* (pp. 475-483). MGAP.
<https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/anuario2020/anuario2020.pdf>

- De Sá Pereira, E., Galantini, J., & Quiroga, A. (2012). Sistemas de cultivos de cobertura de suelo de otoño-invierno: Sus efectos sobre la disponibilidad de agua. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 76-82). INTA. https://www.researchgate.net/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion
- De Sá Pereira, E., Galantini, J., & Quiroga, A. (2017). Calidad de cultivos de cobertura en sistemas de siembra directa del sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 35(2), 337-350. <https://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v35n2/v35n2a13.pdf>
- Díaz Rossello, R. (1992). Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas*, (1), 27-35. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8835/1/15630031207141001.pdf>
- Dietl, W., Fernandez, F., & Finot, V. L., & Jorquera, M. (2009). Descripción de las especies más importantes. En W. Dietl, F. Fernández, C. Venegas, & M. Jorquera (Eds.), *Manejo sostenible de praderas: Su flora y vegetación* (pp. 55-158). INIA. https://www.researchgate.net/publication/215449958_Descripcion_de_las_especies_mas_importantes
- Docampo, R. (2012). La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. En Instituto Nacional de Investigación agropecuaria (Ed.), *Seminario de actualización técnica: Frutales de pepita* (pp. 81-88). <http://www.ainfo.inia.uy/consulta/busca?b=ad&id=12528&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22Docampo,%20R.%22&qFacets=autoria:%22Docampo,%20R.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>
- Duval, M. E., Galantini, J. A., Capurro, J. E., & Beltran, M. J. (2017). Producción y calidad de diferentes cultivos de cobertura en monocultivo de soja. *Ciencias Agronómicas*, (29), 7-13. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/30471/CONICET_Digital_Nro.1609770a-efe4-474f-8433-bf0a54a66fa4_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- Ernst, O. (2004). Leguminosas como cultivo de cobertura. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (21), 1-9. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2004/03/Leguminosa-Cultivo-Cobertura-Ernst.pdf>
- Ernst, O., & Siri-Prieto, G. (2009). Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil Tillage Research*, 105(2), 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.08.001>
- Fernández, R., Quiroga, A., & Noellemeyer, E. (2012). Cultivos de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semiárida pampeana? *Ciencia del Suelo*, 30(2), 137-150. https://www.suelos.org.ar/publicaciones/pdfs/vol_30n2/Vol_30_2_art_5.pdf
- Firoozi, A. A., & Firoozi A. A. (2024). Water erosion processes: Mechanisms, impact, and management strategies. *Results in Engineering*, 24, Artículo e103237. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103237>
- Fornara, D., Tilman, D., & Hobbie, S. (2008). Linkages between plant functional composition, fine root processes and potential soil N mineralization rates. *Journal of Ecology*, 97(1), 48-56. <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2745.2008.01453.x>
- Franzluebbers, A. J., Sawchik, J., & Taboada, M. A. (2014). Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190(1), 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.017>
- Frasier, I., Quiroga, A., & Noellemeyer, E. (2016). Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems. *Science of the Total Environment*, 562, 628-639. https://www.researchgate.net/publication/301624290_Effect_of_different_cover_crops_on_C_and_N_cycling_in_sorghum_NT_systems

- García, J. (1995). Leguminosas anuales. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Día de campo: Pasturas y ovinos* (pp. 5-6).
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4529/1/UY.INIA.1995.SAD.no.7.8.p.5-6-leguminosas-anuales-GARCIA.pdf>
- García, J. A., Labandera, C., Pastorini, D., & Curbelo, S. (1994). Fijación de nitrógeno por leguminosas en La Estanzuela. En A. Morón, & D. F. Risso (Coords.), *Nitrógeno en pasturas* (pp. 13-18). INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2957/1/111219220807121938.pdf>
- García Préchac, F., Ernst, O., Arbeletche, P., Pérez Bidegain, M., Pritsch, C., Ferenczi, A., & Rivas, M. (2010). *Intensificación agrícola: Oportunidades y amenazas para un país productivo y natural*. Universidad de la República; CSIC.
https://www.researchgate.net/publication/303750742_Intensificacion_Agricola_oportunidades_y_amenazas_para_un_pais_productivo_y_natural
- Gilsanz, J. C. (2008). *Jornada abonos verdes: Jardín de abonos verdes de invierno: Día de campo*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/537/1/18429261108095122.pdf>
- Gilsanz, J. C. (2012). *Abonos verdes en la producción hortícola: Usos y manejo*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2548/1/18429180912091518.pdf>
- Hayatsu, M., Tago, K., & Saito, M. (2008). Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54(1), 33-45.
<https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00195.x>
- Hernández Santiesteban, Y., Alfaro Alfaro, E., Mederos Medros, D., & Rivas Figueredo, E. (2009). Las coberturas vivas en sistemas de cultivos agrícolas. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 13(38), 7-16.
https://www.utm.mx/edi_anteriores/Temas38/1ENSAYO%2038-2.pdf

- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.a). *Bases del llamado a interesados para la producción y comercialización de semilla del cultivar de Trifolium Resupinatum LE 90-93*.
http://www.inia.org.uy/estaciones/las_brujas/actividades/documentos/resupinatum.pdf
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.b). *Trifolium resupinatum*.
<https://catalogoforrajeras.inia.uy/leguminosas/leguminosas-anuales/trifolium-resupinatum/inia-sirius/>
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (s.f.). *Tablas estadísticas*.
<https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>
- Jackson, R. B., Lajtha, K., Crow, S. E., Hugelius, G., Kramer, M. G., & Pineiro, G. (2017). The ecology of soil carbon: Pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 419-445.
<https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234>
- Kaspary, T., García, M., & Cabrera, M. (2022). *Criterios para implantación de cultivos de servicio gramíneos con foco en el manejo de malezas*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/16372/1/Cartilla-INIA-98-2022.pdf>
- Kaye, J. P., & Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, Artículo e4.
<https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
- Kruger, H., & Quiroga, A. (2013). La “interfase suelo-atmósfera” y su valor estratégico en regiones semiáridas. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 5-6). INTA.
https://www.researchgate.net/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion

Lagos, L (2019). Suelos empobrecidos. *La Diaria*, 10-11.

<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12682/1/20190507-dairia-suelos-empobrecidos-Beretta.pdf>

Langdale, G. W., Blevins, R. L., Karlen, D. L., McCool, D. K., Nearing, M. A., Skidmore, E. L., Thomas, A. W., Tyler, D. D., & Williams, J. R. (1991). Cover crop effects on soil erosion by wind and water. En W. L. Hargrove (Ed.), *Cover crops for clean water* (pp. 15-40). Soil and Water Conservation Society.

https://www.swcs.org/static/media/cms/CCCW2erosion_1B3D26BCBAAE1.pdf

La urea en la región varía entre US\$ 320 y US\$ 350 por tonelada. (2024, 30 de abril).

Revista verde. <https://revistaverde.com.uy/agricultura/precio-de-la-urea-varia-entre-us-320-y-us-350-en-la-region-se-preve-estabilidad-dijo-ruiz-moreno-de-nexus-agri/>

Lee-Mader, E., Stine, A., Fowler, J., Hopwood, J., & Vaughan, M. (2015). *Cover cropping for pollinators and beneficial insects*. Sustainable Agriculture Research & Education. <https://www.sare.org/wp-content/uploads/Cover-Cropping-for-Pollinators-and-Beneficial-Insects.pdf>

Leveron Rosa, E. R. (2020). *Análisis de los beneficios de la utilización de cultivos de cobertura: Revisión de literatura* [Trabajo final de grado, Escuela Agrícola Panamericana]. Zamorano.

<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/5315550f-d20b-4110-b6f6-036b776b3a50/content>

Liu, H. S., & Li, F. M. (2005). Photosynthesis, root respiration, and grain yield of spring wheat in response to surface soil drying. *Plant Growth Regulation*, 45, 149-154.

<https://doi.org/10.1007/s10725-004-7864-6>

Liu, Y., Yan, W., Yang, T., An, Y., Li, X., Gao, H., Peng, Z., Wei, G., & Jiao, S. (2023). Grass-legume mixtures maintain forage biomass under microbial diversity loss via gathering *Pseudomonas* in root zone soil. *Environmental Microbiology*, 8(6), 1-17.

<https://journals.asm.org/doi/10.1128/msystems.00755-23>

- Maltese, N., & Mazzilli, S. R. (2024). Cultivo de lupino: Una alternativa promisoriosa para agroecosistemas de Uruguay. *Revista INIA*, (77), 37-41.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17723/1/Revista-INIA-77-Junio-2024-9.pdf>
- Martínez Ramos, M. (2008). Grupos funcionales. En J. Sarukhán, G. García Méndez, P. Koleff, A. Lira Noriega, M. Tambutti, & T. Urquiza Haas (Coords.), *Capital natural de México* (pp. 365-412). Conabio.
https://ceiba.org.mx/publicaciones/Centro_Documentacion/Capital_Natural_Mx/2008_CapNatMx_I_Conocimiento.pdf
- Mas, L., & Sanchis, J. M. (2023). *Identificación de limitantes y problemas asociados a la adaptación de cultivos de servicio en la agricultura* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/44034/1/MasLeandro.pdf>
- Mazzilli, S., Echeverría, J., Armen, K., Buffa, I., Bugarín, G., & Ernst, O. (2018). *Sustentabilidad ambiental y económica en predios agrícola-ganaderos: Un sistema de indicadores objetivos aplicable en el campo*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11069/1/fpta-65-proyecto-327-2018.pdf>
- Morón, A. (1996). El ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-planta-animal. En D. F. Risso, E. J. Berretta, & A. Morón (Eds.), *Producción y manejo de pasturas* (pp. 21-32). INIA.
<https://inia.uy/sites/default/files/publications/2025-03/st80-1996.pdf>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2014). *Anuario estadístico agropecuario 2014*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Documentos%20compartidos/Anuario2014/Diea-Anuario%202014-Digital01.pdf>

- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Anuario estadístico agropecuario 2023*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2023/ANUARIO2023WEB.pdf>
- Pauletti Dubosc, M. (2018). Coberturas verdes invernales. *Revista del Plan Agropecuario*, (165), 58-60.
https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/179_2754.pdf
- Pereira, M., & Gandara, L. (2013). *Alternativas para superar el invierno en sistemas ganaderos del noroeste de corrientes: Avena strigosa*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_verdeos_invierno/100-strigosa.pdf
- Pereyra Grecco, M., & Morán Vallejo, E. (2024). *Producción de raíces, biomasa aérea y aportes de nitrógeno de los distintos cultivos de servicio* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/47489/1/PereyraMat%c3%adas.pdf>
- Perrachon, J. (2011). *Siembra y manejo de verdeos*. Instituto Plan Agropecuario.
<https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/filemanager/source/2021/Librillos/pdf/Siembra%20y%20manejo%20de%20verdeos.pdf>
- Pinto, P. (2018). *Evaluación de la fijación biológica de nitrógeno y la producción de raíces en distintos cultivos de servicios y sus efectos sobre las reservas de C y N orgánico del suelo* [Disertación doctoral, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio Institucional del Conicet.
https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/147928/CONICET_Digital_Nro_0ffe9c68-4881-4c62-b014-b4f92f19987a_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- Pinto, P., Paruelo, J., Sawchik, J., & Piñeiro, G. (2023). Cultivos de servicios para aumentar la oferta de servicios ecosistémicos en sistemas agrícolas. En P. García-Inza, J. Paruelo, & R. Zoppolo (Eds.), *Aportes científicos y tecnológicos del INIA a las trayectorias agroecológicas* (pp. 215-234). INIA; Ediciones CICCUS. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17110/1/Pinto-P.-et.al-Capitulo-11.pdf>
- Pinto, P., Rubio, G., Gutiérrez, F., Sawichik, F., Arana, S., & Piñeiro, G. (2021). Variable root:shoot ratios and plant nitrogen concentrations discourage using just aboveground biomass to select legume service crops. *Plant and Soil*, 463, 347-358. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04916-x>
- Podzikowski, L., Heffernan, M., & Bever, J. (2023). Plant diversity and grasses increase root biomass in a rainfall and grassland diversity manipulation. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, Artículo e1259809. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1259809>
- Pound, B. (2006, 7 de agosto). *Cultivos de cobertura para la agricultura sostenible en América*. Engormix. https://www.engormix.com/agricultura/cultivos-cobertura/cultivos-cobertura-agricultura-sostenible_a26502/
- Rebuffo, M. (2000). *Avena: Manejo del cultivo para producción de forraje*. INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5595/1/HD-66-A.pdf>
- Restovich, S. B., Andriulo, A. E., Armas-Herrera, C. M., Beribe, M. J., & Portela, S. I. (2019). Combining cover crops and low nitrogen fertilization improves soil supporting functions. *Plant and Soil*, 442(1-2), 401-417. <https://www.jstor.org/stable/48704034>

- Salvagiotti, F., Vernizzi, A., Bodrero, M., & Bacigaluppo, S. (2013). Cambios en el corto plazo en distintas fracciones de la materia orgánica en respuesta a la inclusión de cultivos de cobertura en secuencias basadas en soja. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 88-91). INTA.
https://www.researchgate.net/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion
- Sawchik, J., Siri, G., Ayala, W., Barrios, E., Bustamante, M., Ceriani, M., Gutiérrez, F., Mosqueira, J., Otaño, C., Pérez, M., Piñeiro, G., Pinto, P., Terra, J., & Zarza, R. (2015). El sistema agrícola bajo amenaza: ¿Qué aportan los cultivos de cobertura y/o las pasturas cortas? En A. Ribeiro & M. Barbazán (Eds.), *IV Simposio Nacional de Agricultura: Buscando el camino de la intensificación sostenible* (pp. 149-168). Universidad de la República.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5164/1/Simposio-Nacional-Agricultura-2015-Sawchik-p.149-168.pdf>
- Scholberg, J. M. S., Dogliotti, S., Leoni, C., Cherr, C. M., Zotarelli, L., & Rossing, W. A. H. (2010). Cover crops for sustainable agrosystems in the Americas. En E. Lichtfouse (Ed.), *Genetic engineering, biofertilisation, soil quality and organic farming* (pp. 23-58). Springer.
https://www.researchgate.net/publication/225864832_Cover_Crops_for_Sustainable_Agrosystems_in_the_Americas
- Scianca, C., Varela, M. F., Barraco, M., Álvarez, C., & Quiroga A. (2013). Cultivos de cobertura en un Hapludol Thapto Árgico de La Pampa arenosa: Análisis de cinco campañas. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 105-116). INTA.
https://www.researchgate.net/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion

- Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y Variabilidad. (2019). *Planes de uso y manejo del suelo*.
https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2021-04/90-FT-Planes_de_Uso_y_Manejo_de_Suelos.pdf
- Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y Variabilidad. (2022). *Cultivos de servicio en pre cosecha de soja*. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/26-FT-Cultivos%20de%20servicios.pdf>
- Soumoulou, M. (2021). *Estudios preliminares sobre el efecto alelopático de cultivares de Avena y Centeno sobre el establecimiento inicial de malezas anuales* [Trabajo final de grado, Universidad Nacional del Sur]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional del Sur.
<https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/5574/Soumolou%2c%20Marcos%20Trabajo%20de%20Intensificaci%3b3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sullivan, P. (2003). *Overview of cover crops and green manures*. ATTRA.
<https://attra-dev.ncat.org/wp-content/uploads/2022/06/covercrop.pdf>
- United States Department of Agriculture. (2011). *Carbon to nitrogen ratios in cropping systems*. http://cultivosdeservicios.agro.uba.ar/wp-content/uploads/2019/04/stelp_rdb1166766.pdf
- Vanzolini, J. I., Galantini, J., & Agamennoni, R. (2013). *Cultivos de cobertura de Vicia villosa Roth*. en el valle bonaerense del Río Colorado. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 21-28). INTA.
https://www.researchgate.net/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion
- Walia, M. (2022). *Beneficios de los cultivos de coberturas*. University of Nevada Reno.
<https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=4830>
- Zanoniani, R. A., & Ducamp, F. (2000). Consideraciones a tener en cuenta en la elección de verdes de invierno. *Cangüé*, (18), 22-26.

Zarco, R. (1999). *Vicia* L. En S. Talavera, C. Aedo, S. Castroviejo, C. Romero, L. Sáez, F. J. Salgueiro, & M. Velayos (Eds.), *Flora ibérica: Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares: Vol.7. Leguminosae (partim)* (pp. 360-417). Real Jardín Botánico.

http://www.floraiberica.es/floraiberica/texto/pdfs/07_33%20Vicia.pdf