

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DE DIFERENTES CULTIVOS DE SERVICIO
INVERNALES SOBRE LA CONDICIÓN NITROGENADA Y
EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE TRIGO SUCESOR**

por

María Antonella GANCIO VÉLEZ

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

**PAYSANDÚ
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:

Ing. Agr. (Mag.) Santiago Alvarez

Tribunal:

Ing. Agr. (Mag.) Santiago Alvarez

Ing. Agr. (Dr.) Agustín Núñez

Ing. Agr. (Dr.) Guillermo Siri-Prieto

Fecha:

23 de julio de 2026

Estudiante:

María Antonella Gancio Vélez

AGRADECIMIENTOS

A Dios. No alcanzarían los caracteres de un editor de texto para escribir los motivos. Así que: sencillamente, por todo.

A mis padres Solange y Fabián, a mis hermanos Eduardo y Clara. Gracias por su apoyo incondicional y su generosidad infinita.

A mi familia toda: abuelos, tíos, primas y padrinos. Gracias por acompañar cada etapa del proceso con tanta paciencia, respeto y amor.

A mis amigos y compañeros, los de toda la vida y los que conocí en el camino, sin su sostén hubiera sido imposible.

A quienes colaboraron en este trabajo final, principalmente a Santiago Alvarez por la dirección del trabajo. A Lucas y Flavio por su apoyo durante el trabajo de campo. Al personal del Laboratorio 1 y de Biblioteca de la EEMAC.

A Ariel, Maximiliano y Valeria. Su flexibilidad y apoyo en el trabajo me permitió cumplir con ambas responsabilidades y dedicarle a cada una el tiempo necesario.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 CULTIVOS DE SERVICIO	12
2.1.1 Especies de CS.	13
2.1.1.1 Avena sativa.....	13
2.1.1.2 Vicia villosa	13
2.1.1.3 Mezcla Avena sativa + Vicia villosa.....	13
2.1.2 Dinámica del nitrógeno asociada a los cultivos de servicio	14
2.1.3. Impacto de los CS en el rendimiento de los cultivos	15
2.2 CULTIVO DE TRIGO EN URUGUAY	18
2.2.1 Fertilización nitrogenada en cereales de invierno	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 SITIO EXPERIMENTAL.....	21
3.1.1 Ubicación	21
3.1.2 Suelo e historia de chacra.....	21
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS	21
3.3 MANEJO EXPERIMENTAL	22
3.3.1 Cultivos de servicio	22
3.3.2 Cultivo de maíz	22
3.3.3 Cultivo de trigo.....	22
3.4 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	23
3.5 MEDICIONES EN EL CULTIVO DE TRIGO	24
3.5.1 Determinaciones en suelo	24
3.5.2 Determinaciones en el cultivo	24
3.5.2.1 Implantación.....	24
3.5.2.2 Altura de hoja bandera	24
3.5.2.3 Espigas m ²	25
3.5.2.4 Biomasa aérea	25
3.5.2.5 N absorbido.....	25
3.5.2.6 Rendimiento de trigo	25

3.5.2.7 Productividad parcial de nitrógeno (PPN).....	25
3.5.2.8 Peso de mil granos y peso hectolítrico	25
3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	27
4.2 EFECTO DE LOS CS SOBRE VARIABLES QUE DETERMINAN EL RENDIMIENTO DE TRIGO	28
4.2.1 Efecto sobre la concentración de nitrógeno en suelo a siembra y macollaje	28
4.2.2 Efecto sobre la condición del cultivo de trigo a espigazón	29
4.3 EFECTO DE LOS CS SOBRE EL RENDIMIENTO DE TRIGO Y PARÁMETROS DE CALIDAD DE GRANO.....	31
4.4 PRODUCTIVIDAD PARCIAL DE NITRÓGENO (PPN).....	33
5. CONCLUSIONES.....	35
6. BIBLIOGRAFÍA.....	36

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No	Página
Tabla 1 Rotación de cultivos del área experimental (2020-2024)	21
Tabla 2 Esquema del diseño experimental a campo	22
Tabla 3 Producción de biomasa total, aporte de N y relación C/N de los CS	22
Tabla 4 Fertilización de las parcelas de N ajustado	23
Tabla 5 Descripción de las variables medidas, unidad y momento de muestreo	24
Tabla 6 Nitratos en los primeros 15 cm de suelo a siembra y macollaje	28
Tabla 7 Altura de hoja bandera, biomasa aérea, nitrógeno absorbido y número de espigas	30
Tabla 8 Rendimiento, peso de mil granos y peso hectolítrico de trigo	32

Figura No	Página
Figura 1 Esquema de la dinámica de nitrógeno asociado a CS	14
Figura 2 Sincronía y asincronía de absorción de N	17
Figura 3 Precipitaciones acumuladas y coeficiente fototermal (Q) 2024	27
Figura 4 Productividad Parcial de Nitrógeno según CS antecesor	33

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes cultivos de servicio (CS) invernales sobre la condición nitrogenada y el rendimiento del cultivo de trigo sucesor, después de maíz. En un contexto actual de agricultura poco diversificada, con deterioro de la capacidad productiva y la sostenibilidad de los sistemas, así como una alta dependencia de insumos externos, principalmente fertilizantes nitrogenados, este trabajo busca evaluar como alternativa la incorporación de CS: *Avena byzantina*, *Vicia villosa* y su mezcla con el fin de capitalizar sus distintos servicios ecosistémicos en beneficio del cultivo de trigo sucesor.

El experimento se realizó en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni ubicada en Paysandú, siguiendo un diseño en bloques completos al azar con cuatro tratamientos en tres repeticiones, y una división de subtratamientos para evaluar la posible interacción del efecto del CS con distintas estrategias de fertilización (sin N, N ajustado y N no limitante). Se midieron parámetros como concentración de nitratos en el suelo, producción de biomasa, absorción de nitrógeno, rendimiento de trigo, entre otros.

Los resultados muestran que existe un efecto residual de la incorporación de CS leguminosas sobre la dinámica de N que se mantiene hasta el segundo cultivo de la secuencia. *Vicia villosa* como CS antecesor aumentó la disponibilidad de N para el cultivo de trigo, disminuyendo la dosis de N total aplicada sin afectar su rendimiento. En condiciones de N limitantes, *Vicia villosa* como antecesor aumentó el rendimiento de trigo, en cambio, cuando el ambiente no fue limitante en N, los efectos de la incorporación de leguminosas como CS desaparecen ya que el fertilizante sustituye el aporte de N y el cultivo de trigo demuestra un mejor desempeño con CS gramíneas como antecesor, probablemente al eliminar la deficiencia nutricional se manifiesten otros beneficios de la inclusión de gramíneas para el sistema como el aporte de materia orgánica, la mayor cobertura y la mejora de las condiciones fisicoquímicas del suelo que sería interesante evaluar en el mediano-largo plazo.

Palabras clave: cultivos de servicio, nitrógeno, trigo

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of different winter cover crops on the nitrogen status and grain yield of a subsequent wheat crop following maize. In the current context of low crop diversification, declining productive capacity and system sustainability, and a high dependence on external inputs, particularly nitrogen fertilizers, the inclusion of cover crops was assessed as an alternative management strategy. Oat (*Avena byzantina*), hairy vetch (*Vicia villosa*), and their mixture were evaluated for their potential to provide complementary ecosystem services and improve the performance of the subsequent wheat crop.

The experiment was conducted at the Mario A. Cassinoni Experimental Station, located in Paysandú, Uruguay. A randomized complete block design with four treatments and three replications was established, including a split-plot arrangement to evaluate the interaction between cover crop effects and different nitrogen fertilization strategies (no N, adjusted N, and non-limiting N). Soil nitrate concentration, cover crop biomass production, nitrogen uptake, wheat grain yield, and other agronomic variables were measured.

Results showed that the residual effect of legume cover crops on nitrogen dynamics persisted until the second crop in the sequence. Hairy vetch as a preceding cover crop increased nitrogen availability for wheat, allowing a reduction in the total amount of fertilizer N applied without affecting grain yield. Under nitrogen-limiting conditions, hairy vetch increased wheat yield compared with the other cover crop treatments. In contrast, under non-limiting nitrogen conditions, the benefits associated with legume cover crops disappeared, as fertilizer N replaced the nitrogen contribution provided by the cover crop. Under these conditions, wheat performed better following grass cover crops, suggesting that once nitrogen limitations are removed, other benefits associated with grasses, such as increased organic matter inputs, greater soil cover, and improved soil physicochemical properties, may become more relevant. These effects warrant further evaluation in the medium and long term.

Keywords: cover crops, nitrogen, wheat

1. INTRODUCCIÓN

Los cultivos de servicio (CS) se siembran con el fin de mantener el suelo produciendo durante el período que transcurre entre la cosecha de un cultivo y la siembra del cultivo siguiente, evitando así los numerosos perjuicios que el barbecho a suelo descubierto provoca sobre los sistemas de producción. El uso de CS invernales en Uruguay se ha incrementado a partir de la implementación de la Ley n° 15.239 (1982) que declara de interés nacional el uso y la conservación de suelos y aguas superficiales destinados a fines agropecuarios, pero su implementación aún no es una práctica muy difundida debido a que este tipo de cultivos no genera una renta directa, es decir, no se pastorean ni se cosechan y muchos de los beneficios que generan pueden apreciarse en el mediano-largo plazo.

El cultivo de trigo es el cereal de invierno más importante en la agricultura del Uruguay, en lo que a superficie de siembra (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2025) y valor de exportación se refiere (Uruguay XXI, 2025). Desde el año 2014 el rendimiento del cultivo se ha incrementado, registrando el máximo histórico de 5037 kg ha⁻¹ promedio en la zafra 2023 (DIEA, 2024b). Estos aumentos de rendimiento han sido acompañados por cambios en las tecnologías de procesos, aunque principalmente, son consecuencia del aumento en el uso de insumos externos, entre los que se destacan los fertilizantes nitrogenados.

Considerando que uno de los principales costos asociados a la producción de trigo es el uso de fertilizantes nitrogenados (García Lamothe, 2010) y que su precio ha presentado una gran volatilidad en los últimos años debido a factores macroeconómicos y conflictos internacionales; disminuir los requerimientos de estos insumos por parte de los cultivos supone, además de un menor riesgo de contaminación ambiental, un descenso importante de los costos de producción. Desde este punto de vista sería interesante conocer si es posible capitalizar el servicio ecosistémico de reciclaje y aporte de nitrógeno (N) dentro del sistema que generan los CS.

Son numerosos los estudios que comprueban el efecto de CS sobre el cultivo inmediatamente sucesor (Giacomini et al., 2004; Jorajuría Noya, 2019; Pott et al., 2021; Restovich & Andriulo, 2012; Ruffo & Parsons, 2004), mientras que son escasos aquellos que contemplan su efecto residual en la secuencia de la rotación de cultivos, principalmente en el litoral agrícola del Uruguay (López Selios, 2025; Lupwayi & Soon, 2016). En este marco se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Evaluar el efecto residual de distintos CS invernales sobre la condición nitrogenada y el rendimiento del cultivo de trigo sucesor

Objetivos específicos:

- Evaluar el efecto de distintos CS sobre la disponibilidad de N en el suelo el invierno siguiente.
- Analizar el impacto de la inclusión de CS sobre el crecimiento, absorción de N, rendimiento y calidad de grano del cultivo de trigo sucesor.
- Evaluar el efecto de distintas estrategias de fertilización y su interacción con los CS.

Hipótesis:

1. Existe un efecto residual de la inclusión de CS sobre la dinámica de N, que se evidencia en el segundo cultivo sucesor.
2. Los CS que presentan leguminosas aumentan la disponibilidad de N para el cultivo de invierno siguiente, respecto al barbecho químico o las gramíneas puras.
3. La incorporación de leguminosas como *Vicia villosa* reduce la necesidad de fertilizante nitrogenado del cultivo de invierno sucesor sin afectar su rendimiento.
4. Los efectos de los CS sobre la dinámica de N dependen de la estrategia de fertilización utilizada.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CULTIVOS DE SERVICIO

Los CS, también llamados coberturas, son aquellos que se siembran con un fin distinto a la producción de alimentos, durante el período que transcurre entre la cosecha de un cultivo y la siembra del cultivo siguiente, a diferencia de los llamados “abonos verdes” sus residuos no se incorporan al suelo y, a diferencia de los verdeos, no son cosechados ni pastoreados (Ruffo & Parsons, 2004).

La intensificación de la agricultura en Uruguay ha generado un progresivo deterioro de algunas propiedades del suelo impactando de forma negativa en la productividad de los sistemas (Alvarez & Ernst, 2025). Una de las causas principales es la sustitución de las rotaciones de cultivos con praderas de larga duración por sistemas de agricultura continua donde el foco de la producción se concentra en el verano dejando, en gran parte de las chacras, el suelo descubierto durante el invierno, causando pérdidas de suelo por erosión (Ernst & Siri-Prieto, 2011a).

En los últimos años se ha puesto foco en la producción sostenible como forma de detener estas pérdidas en la calidad de los recursos y mantener el potencial de producción de los sistemas agrícolas en el largo plazo (Ignaciuk et al., 2021). En este sentido varios autores indican los numerosos beneficios de incorporar CS durante el invierno, por ejemplo, Balbinot et al. (2011) registraron aumentos en la acumulación de carbono superficial, materia orgánica total y particulada del suelo debido al uso de CS en invierno. Restovich et al. (2011) también evaluaron el efecto de la inclusión de CS invernales sobre propiedades edáficas en una rotación soja-maíz, concluyendo que el aumento de macroporosidad, estabilidad y carbono orgánico del suelo fue significativo respecto al testigo sin CS. El efecto de incluir leguminosas fue estudiado por Ruffo y Parsons (2004), quienes aseguran que especies como *Vicia villosa*, *Vicia sativa* o trébol encarnado aportan carbono, generan cobertura, reducen el requerimiento de fertilizante nitrogenado e incrementan el rendimiento potencial del maíz siguiente. El efecto positivo de la inclusión de gramíneas invernales como centeno o avena fue reportado por Jorajuría Noya (2019) y Kaspary et al. (2020) y está asociado a la absorción de nitratos residuales, el aporte de carbono y el incremento de la cobertura del suelo, lo que les permite ejercer un importante efecto supresor sobre las malezas. Otro servicio ecosistémico, asociado a la diversidad vegetal de cultivos, es el incremento en las poblaciones de artrópodos benéficos, estos insectos cumplen un rol clave dentro de los sistemas agrícolas, actuando como controladores de plagas y reguladores de polinización (Kremen & Miles, 2012; Zufiaurre et al., 2025).

2.1.1 Especies de CS.

2.1.1.1 Avena sativa

Los CS de tipo gramíneo son los más utilizados entre los productores agrícolas del litoral y, dentro de las gramíneas, se destaca el género *Avena* en sus especies *sativa* o *strigosa* seguido por el *Lolium multiflorum* (raigrás) (González Álvarez, 2023). Las gramíneas tienen algunas ventajas respecto a las leguminosas cuando se utilizan como CS, producen una mayor cantidad de biomasa, aérea y radicular, por lo que contribuyen en mayor medida a la incorporación de carbono (C) al suelo, lo que se traduce en un aumento de la cantidad y calidad de la materia orgánica y una mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo (Ruffo & Parsons, 2004). En cuanto al N, las gramíneas invernales capitalizan los nitratos residuales posteriores al cultivo de verano acumulándolos en su biomasa, evitando así sus pérdidas por lixiviación o desnitrificación, sin embargo, debido a la relación C/N alta que poseen, se favorece el proceso de inmovilización por los microorganismos y la disponibilidad de N para el cultivo siguiente puede estar comprometida (Alvarez et al., 2023).

2.1.1.2 Vicia villosa

Según la caracterización sobre la adopción de CS por parte de los productores del litoral realizada por González Álvarez (2023), dentro de las especies leguminosas, la *Vicia villosa* es la más utilizada. El uso de leguminosas como CS tiene como objetivo principal incorporar el nitrógeno atmosférico al sistema, a través del proceso de fijación biológica que ocurre gracias a la asociación de estas especies con bacterias del género *Rhizobium* o *Bradyrhizobium* (Rillo et al., 2012). Estos autores mencionan otros beneficios de incorporar leguminosas en invierno asociados al sistema radical y su contribución a mantener la estructura del suelo y su porosidad. Además de los servicios ecosistémicos aportados, el uso de CS invernales mejora los rendimientos del cultivo de verano sucesor cuando se compara con barbechos químicos invernales. En este sentido Pott et al. (2021) mencionan que la inclusión de *Vicia villosa* como cultivo antecesor incrementa el rendimiento de maíz, particularmente en condiciones de baja disponibilidad de nitrógeno, con respuestas variables (6-14%) según el ambiente y el nivel de fertilización.

2.1.1.3 Mezcla Avena sativa + Vicia villosa

Capurro et al. (2010) y Giacomini et al. (2004) han evaluado el desempeño de ambas especies cuando son sembradas en mezcla, buscando maximizar las bondades que cada una ofrece por separado. Como se mencionó anteriormente, las gramíneas capitalizan el N residual posterior a un cultivo de verano, en este sentido Giacomini et al. (2004) determinaron que la asociación de *Avena* + *Vicia* como CS antecesor de maíz produjo una disminución en la cantidad de N mineral del suelo en relación con la *Vicia* pura, siendo este efecto directamente proporcional a la cantidad de *Avena* de la mezcla. El potencial de pérdida de N por lixiviación fue mayor después de *Vicia* pura como antecesora de maíz que cuando se comparó con avena pura o la asociación de *Avena* + *Vicia*.

Una conclusión importante de Giacomini et al. (2004) es que la *Vicia* pura o en mezcla con *Avena* afectó positivamente el rendimiento del maíz y en una proporción de hasta 70% *Avena* y 30% *Vicia* no se diferenció del rendimiento cuando la cobertura fue *Vicia*

pura, por lo que se podría aprovechar el beneficio de incorporar gramíneas sin afectar la performance del cultivo de verano siguiente.

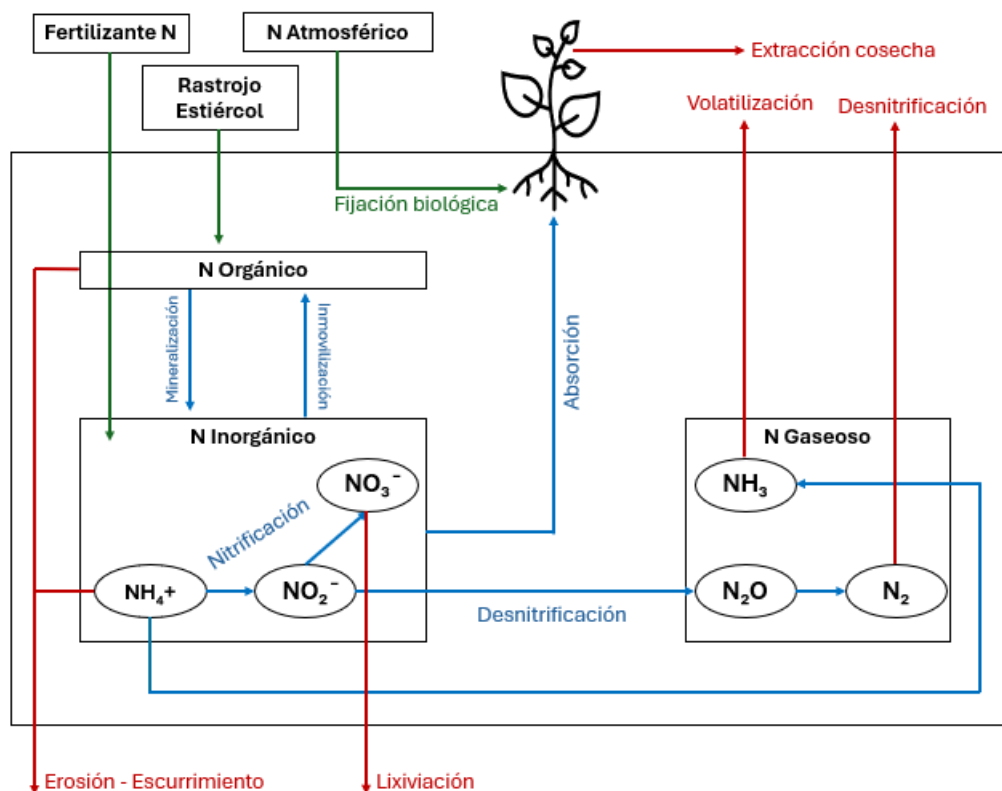
Capurro et al. (2010) y Giacomini et al. (2004) coinciden en que la proporción utilizada de cada especie en la mezcla determinará la dinámica de la descomposición y la liberación de N de los rastrojos dada la diferente relación C/N de cada especie, por esto la decisión dependerá de qué servicio ecosistémico es prioridad aportar a cada sitio de producción. Si el mayor problema es la erosión hídrica y hace falta aumentar la protección y la cobertura del suelo, será conveniente aumentar la proporción de *Avena* y si se presenta una situación problemática en cuanto a balance de nitrógeno se puede aumentar la densidad de *Vicia*.

2.1.2 Dinámica del nitrógeno asociada a los cultivos de servicio

El N es un nutriente móvil en el suelo, para entender su dinámica es necesario contemplar sus principales entradas, salidas y transformaciones intermedias (Figura 1).

Figura 1

Esquema de la dinámica de nitrógeno asociado a CS



Las principales entradas de N al sistema ocurren por aplicaciones de fertilizantes químicos, fijación biológica de N atmosférico (simbiosis entre leguminosas y bacterias), descomposición de rastrojos y deyecciones animales (Baethgen, 1992)

Respecto a las entradas, la incorporación de CS invernales impacta directamente en la dinámica del nitrógeno, especialmente si se utilizan leguminosas, las cuales tienen la capacidad de fijar biológicamente el nitrógeno (FBN) del aire cuando se asocian con microorganismos (Paredes, 2013). Este es uno de los beneficios que se puede capitalizar

cuando se incluyen especies leguminosas como CS, sea pura o en mezcla con gramíneas (Pinto et al., 2023).

El N orgánico que proviene principalmente de la descomposición de los residuos de plantas y de las deyecciones animales debe sufrir un proceso de mineralización previo para que las plantas lo puedan absorber, este proceso es llevado a cabo por los microorganismos del suelo (Baethgen, 1992) y depende en gran medida de la cantidad y calidad de los rastrojos (Morón, 1994) además de condiciones ambientales como humedad y temperatura del suelo (Celaya-Michel & Castellanos-Villegas, 2011). El proceso contrario es la inmovilización de N desde sus formas minerales a formas orgánicas, este proceso es también mediado por los microorganismos y su ocurrencia depende de sus requerimientos energéticos (Morón, 1994). En ambos procesos influye el tipo de CS que se implante, las gramíneas tienen una relación C/N más alta que las leguminosas por lo que su descomposición favorece el proceso de inmovilización, una relación C/N más baja significa una mineralización más rápida, lo que podría traducirse en una mayor disponibilidad de nutriente para el cultivo siguiente (Boccolini et al., 2012; Scavo et al., 2022).

La inclusión de CS también impacta en las salidas de N del sistema. Las principales pérdidas están dadas por el proceso de lixiviación y la extracción por cosecha de los cultivos, junto a pérdidas de suelo por erosión y el proceso de desnitrificación (Baethgen, 1992). Cuando el proceso de mineralización de N ocurre antes del establecimiento del cultivo de renta sucesor, el N no será aprovechado en su totalidad porque estará susceptible a pérdidas por lixiviación o desnitrificación. Se debe buscar, entonces, la proporción gramínea/leguminosa en la mezcla de CS que mantenga una relación C/N favorable, sin perjudicar la disponibilidad de N de los cultivos siguientes o el ambiente. Restovich y Andriulo (2012) encuentran favorable incluir CS en invierno porque el N residual queda inmovilizado en los residuos del CS y su posterior mineralización significa un aporte en el mediano plazo para el cultivo sucesor evitando las pérdidas de nutriente por lixiviación, su resultado coincide con el de Rinski-Korsakov et al. (2016) que estimaron la retención de N por una cobertura de raigrás posterior al cultivo de maíz, donde la acumulación de N en el raigrás redujo el riesgo de lixiviación de nitratos cuando el antecesor fue maíz, este efecto se acentuó cuando las condiciones hídricas en el cultivo de verano fueron limitantes y la disponibilidad de nitratos en el suelo fue elevada.

2.1.3. Impacto de los CS en el rendimiento de los cultivos

La estrategia de manejo de los CS puede afectar positiva o negativamente el rendimiento de los cultivos de renta sucesores. La especie de CS, su fecha de supresión y la fertilización nitrogenada del cultivo de renta son factores determinantes en la magnitud de este efecto. Vanzolini et al. (2013) evaluaron, durante dos años, en forma conjunta el efecto de estos factores utilizando el cultivo de *Vicia villosa* como antecesor de maíz, los tratamientos fueron *Vicia* desecada 1 semana, 2 semanas y 3 semanas antes de sembrar el maíz, el barbecho químico fue el testigo, estos tratamientos se combinaron con 0, 69, 138 y 207 kgN ha⁻¹ y según los resultados obtenidos no hubo diferencias significativas entre tratamientos para el rendimiento de maíz, aunque observaron una tendencia a mayor rendimiento cuando el antecesor fue *Vicia*, respecto al barbecho. Cuando no hubo agregado de N, el rendimiento de maíz fue superior si el antecesor fue *Vicia*, esta

diferencia la atribuyen al aporte de N de la leguminosa. Al segundo año del experimento aparece lo que, en concordancia con Ruffo y Parsons (2004), denominan “efecto rotación”, esto quiere decir que las diferencias entre tratamientos se mantuvieron o incrementaron por una mejora en la conservación de agua del suelo, menor competencia del cultivo con malezas y mejor condición de las propiedades físicas del suelo, cuando el antecesor fue *Vicia*.

Este efecto diferencial del CS y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de maíz fue estudiado por Larramendy Trujillo e Iglesias de Soto (2025) en una serie histórica (2007–2019), destacando la importancia del antecesor invernal en la productividad del cultivo en el largo plazo. Cuando el CS fue una gramínea, se observaron efectos negativos sobre el rendimiento, atribuibles a la alta relación C/N de sus residuos, lo que favorece la inmovilización microbiana del N y reduce su disponibilidad para el cultivo siguiente. En contraste, las especies leguminosas demostraron ser más sostenibles en términos de rendimiento en el largo plazo. Estos resultados son consistentes con estudios que evidencian que los cultivos de cobertura gramíneos pueden disminuir la disponibilidad de nitrógeno debido a procesos de inmovilización microbiana (Rimski-Korsakov et al., 2016).

En este sentido, Carciochi et al. (2023) analizaron los factores que controlan la respuesta del rendimiento de maíz a la siembra de *Vicia* como CS previo (respecto al barbecho a suelo descubierto) y a la fertilización nitrogenada del maíz después de la *Vicia* (en comparación con no fertilizar). A partir de la combinación de estos factores, evaluaron cuatro tratamientos en 25 estudios de campo. Los resultados mostraron que, en el 52% de los casos, el rendimiento de maíz aumentó significativamente luego de *Vicia villosa* cuando no se aplicó fertilización nitrogenada, acentuándose la respuesta en ambientes de bajo rendimiento. La principal fuente de variación de la respuesta en rendimiento de maíz fue el suministro de N de la *Vicia*, aunque otros factores como la disponibilidad de agua, propiedades físicas y biológicas del suelo resultaron significativos en menor medida. Cuando el maíz se fertilizó después de la *Vicia* hubo respuesta en 36% de los casos, a diferencia del maíz que se fertilizó luego del barbecho donde respondieron significativamente el 68% de los sitios. Los resultados indican que incluir *Vicia villosa* como CS previo a maíz reduce los requerimientos de fertilización nitrogenada del cultivo sin afectar su rendimiento y reduciendo los potenciales desenlaces ambientales negativos.

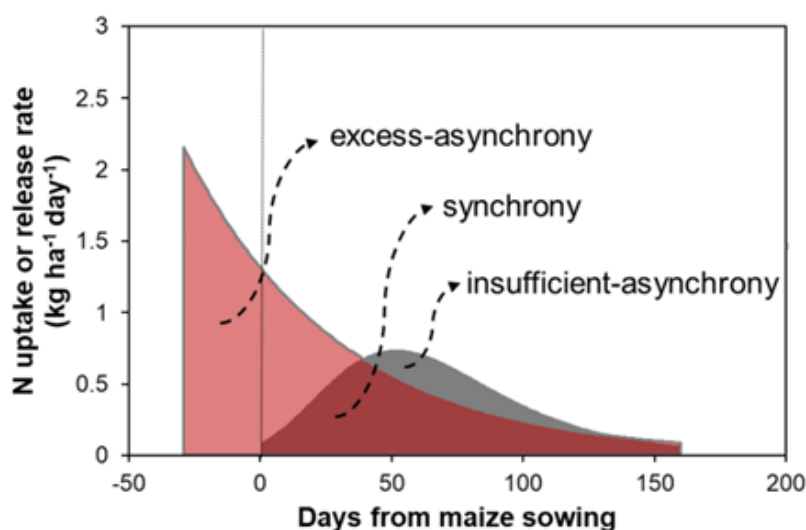
Gran parte del impacto de la inclusión de CS sobre el rendimiento de los cultivos sucesores depende de su fecha de supresión, se debe procurar que sea la adecuada para generar una recarga de agua en perfil de suelo sin afectar el cultivo de renta (Pinto et al., 2023). Ernst y Siri-Prieto (2011b) evaluaron el efecto de la fecha de supresión (60, 40, 20, 0 días antes de la siembra) de una cobertura invernal de raigrás sobre la disponibilidad de agua en el suelo para el cultivo de soja siguiente, en 3 años consecutivos de precipitaciones contrastantes. En el año en que las lluvias fueron abundantes respecto al promedio, no hubo diferencias entre los tratamientos, ya que en todas las fechas se alcanzó a recargar el perfil y se compensó el consumo de agua del raigrás. Sin embargo, cuando el año fue “seco” no se pudo mantener el suelo con su máxima capacidad agua disponible durante el periodo evaluado y la alta demanda atmosférica afectó incluso al tratamiento sin vegetación, en este caso la supresión temprana de la cobertura resultó en una menor cobertura de suelo por parte de los residuos, favoreciendo las pérdidas de agua

por evaporación. La importancia de planificar el fin de ciclo de los CS se acentúa en años particularmente secos. Retrasar la fecha de terminación de los CS es una medida favorable y no limitante en ambientes húmedos, suelos poco profundos o sistemas con riego, aunque estos últimos deberían evaluar la viabilidad económica (Carciochi et al., 2025).

La fecha de supresión de los CS no solo impacta en el rendimiento de los cultivos por su efecto en la disponibilidad de agua, sino que también se asocia a la dinámica de nutrientes, modificando la liberación de N del CS y la absorción de N del cultivo siguiente. En esta línea Carciochi et al. (2025) realizaron un estudio sobre el efecto de diferentes especies de CS (*Avena sativa*, *Vicia villosa* y su mezcla) sobre la sincronía y asincronía entre la liberación de N del CS y la absorción de N del maíz siguiente, con dos momentos de supresión (temprana y tardía). Definieron la sincronía como el porcentaje de coincidencia entre la liberación diaria de N del CS y la porción de N del maíz que no es satisfecha por el suministro del suelo, la asincronía la clasificaron según dos situaciones: excesiva cuando el N de los CS se libera antes de que el cultivo de maíz lo demande e insuficiente cuando la liberación de N del CS no alcanza a cubrir la tasa de absorción de N del maíz (Figura 2).

Figura 2

Sincronía y asincronía de absorción de N



Nota. Tomado de Carciochi et al. (2025).

Carciochi et al. (2025) determinaron que la mayor sincronía ocurre cuando los CS incluyen leguminosas y son suprimidos tardíamente. También incluyeron el efecto de la fertilización nitrogenada y concluyeron que, con una sincronía mayor al 50%, no existe respuesta al agregado de N y con sincronías entre 54 y 58% se maximizan la eficiencia de uso y la recuperación de N, es decir que promover la sincronía permitiría reemplazar parte del agregado de N como fertilizante y capitalizar mejor el N proveniente de CS, optimizando su ciclado y favoreciendo la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Lupwayi y Soon (2016) evaluaron el efecto en la rotación de especies leguminosas sobre tres cultivos consecutivos (trigo, colza y cebada). Las leguminosas tuvieron manejo diferencial: cosecha de grano, incorporación de residuos al suelo y remoción total de residuos del sistema. En los cultivos sucesores se midió el rendimiento en grano,

absorción de N y acumulación de C en la biomasa aérea. En el primer año todos los tratamientos con leguminosas incrementaron el rendimiento del cultivo de trigo sucesor sin diferencias entre manejo de residuos. En el segundo año el comportamiento fue similar al anterior, aunque el cultivo sembrado fue canola y al tercer año los residuos de leguminosas cuyo grano se cosechó provocaron un incremento de rendimiento en cebada mayor que los tratamientos donde se el residuo se retiró o se incorporó. Esta misma tendencia en los tres años la mostraron otras variables como absorción de N y acumulación de C, por lo que los autores plantean que se subestima el valor rotacional de las leguminosas cuando se las evalúa solamente en el primer cultivo subsiguiente y que su efecto en la rotación perdura en asociación con una liberación progresiva del N presente en raíces y nódulos.

López Selios (2025) realizó un ensayo donde evaluó el efecto residual de CS sobre el suministro de N y el rendimiento de cebada, sus resultados indican que el efecto residual en cuanto al suministro de N se extiende, al menos, hasta el segundo cultivo de la secuencia, principalmente cuando los CS fueron leguminosa (*Vicia villosa*) o mezcla (*Avena* + *Vicia*) y el antecesor de cebada fue maíz. El rendimiento de grano no se diferenció entre tratamientos, aunque sí hubo diferencias en algunos parámetros de calidad de grano.

2.2 CULTIVO DE TRIGO EN URUGUAY

El trigo ha sido históricamente el cultivo de invierno más importante del país en cuanto a área sembrada y producción, tendencia que se mantiene en la actualidad con 355.734 hectáreas sembradas y un rendimiento promedio de 4.116 kg ha⁻¹ en la zafra 2024 (DIEA, 2025).

El manejo recomendado del cultivo en condiciones de secano propone la siembra entre el 15 y 30 de mayo para cultivares de ciclo intermedio, ajustando la densidad de siembra según el cultivar con el objetivo de lograr entre 240-280 plantas viables m² (Berger, 2022). La siembra temprana de estos cultivares constituye una estrategia clave para maximizar el rendimiento, ya que favorece la acumulación de biomasa y la generación de área foliar durante la fase vegetativa. Asimismo, permite ubicar el período de concreción de rendimiento en condiciones ambientales favorables, reduciendo la probabilidad de estrés térmico durante el llenado de grano (Hoffman & Ernst, 2017). No obstante, fechas de siembra excesivamente tempranas pueden incrementar el riesgo de ocurrencia de heladas tardías durante el período crítico, afectando la generación de rendimiento (Hoffman & Castro, 2012).

Godiño Silva (2020) caracterizó el rendimiento experimental y comercial de trigo en Uruguay para el período 1997-2018 y los factores que lo determinan. Para el rendimiento experimental diferenció dos períodos, uno hasta 2003 donde el promedio no superaba los 5000 kg ha⁻¹ y otro posterior donde la mayoría de los años se supera este rendimiento, con un estancamiento alrededor de los 6000 kg ha⁻¹. El principal motivo de este salto en rendimiento posterior a 2003 es el recambio varietal que se produjo luego de la incidencia de *Fusarium spp* en 2001 y 2002. Cuando se estudia el rendimiento experimental de los 5 cultivares superiores, el promedio se incrementa aproximadamente a 8000 kg ha⁻¹ asociado al ingreso de nuevos cultivares con mayor potencial, principalmente europeos,

y a la incorporación de características de alto potencial en líneas locales al final del período. El rendimiento comercial, aunque tuvo un incremento sostenido, no expresa este progreso genético que muestran los cultivares mejor posicionados, el promedio para el período 1997-2018 ronda los 3000 kg ha⁻¹ y tiene una alta relación con la variabilidad climática entre años y factores de manejo como la fecha de siembra, el uso de fungicidas y la fertilización nitrogenada. En los últimos años el rendimiento comercial promedió 4300 kg ha⁻¹ (DIEA, 2021, 2022, 2023, 2024a, 2025).

La brecha de rendimiento se define como la diferencia entre el rendimiento potencial de un cultivo y el rendimiento promedio alcanzado por los productores (van Ittersum et al., 2013). Determinar el rendimiento potencial en un ambiente particular es complejo, ya que el cultivo debe crecer en condiciones óptimas, sin limitantes hídricas o nutricionales, y libre de plagas, malezas y enfermedades (Evans & Fischer, 1999). Por esto, es comúnmente reemplazado por el concepto de rendimiento alcanzable para la estimación de la brecha de rendimiento (Berger, 2023). El rendimiento alcanzable representa un 80% del rendimiento potencial y, en Uruguay, se toma como referencia el rendimiento obtenido en ensayos controlados de alto potencial, como los de la Evaluación Nacional de Cultivares (Berger, 2023). En este contexto, la brecha de rendimiento de trigo es amplia, por lo que existe un gran margen para incrementar la productividad y mejorar la eficiencia de los sistemas agrícolas.

2.2.1 Fertilización nitrogenada en cereales de invierno

Los sistemas de producción agrícolas en Uruguay han experimentado cambios significativos en las últimas décadas que han impactado en el cultivo de trigo (Ernst et al., 2018). A principios de siglo el esquema se basó en la rotación de cultivos con pasturas perennes, en primer lugar, con laboreo convencional y posteriormente con siembra directa (Ernst & Siri-Prieto, 2011a). A partir del año 2002 la agricultura pasó por un período de expansión e intensificación que se caracterizó por la reducción del área de pasturas y la adopción de sistemas agricultura continua (Ernst & Siri-Prieto, 2011a). Este cambio hacia sistemas más intensivos ha tenido efectos negativos sobre el rendimiento del trigo y la calidad del suelo, evidenciándose un deterioro progresivo que no puede ser compensado por el uso de fertilizantes nitrogenados luego del quinto año de agricultura continua (Ernst et al., 2018).

El modelo actual de ajuste de la fertilización nitrogenada para cereales de invierno en Uruguay propone el fraccionamiento del N en cuatro momentos “clave” en el ciclo, para sincronizar la oferta de nutrientes y la demanda del cultivo (Fassana et al., 2022). Al momento de la siembra, la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada está condicionada por la concentración de N-NO₃⁻ en el suelo (0-20cm), por encima de 18ppm se espera una respuesta muy baja, por lo que no es recomendado el ajuste; por debajo de este valor la respuesta varía en función de los antecedentes del cultivo como historia de chacra (años de agricultura continua luego de pasturas), cultivo antecesor (sorgo/maíz o pradera/soja/girasol) y manejo del barbecho (correcto o incorrecto) (Hoffman et al., 2001, 2010). El siguiente momento de ajuste de la fertilización es el inicio de macollaje del cultivo, en este momento el indicador que mejor se correlaciona con la respuesta al agregado de N también es la concentración de N-NO₃⁻ en el suelo (0-20cm) (Hoffman et al., 2001; Hoffman et al., 2010). Cuando el cultivo se encuentra en etapas más avanzadas,

el N-NO_3^- en el suelo pierde capacidad predictiva, por lo que el ajuste se basa en el diagnóstico de la condición nitrogenada de la planta. Al término del macollaje, cuando inicia la encañazón, el indicador que se utiliza es la concentración de N total en planta (%) y el nivel crítico, aunque suele ser 4,2% como referencia, varía según el potencial del rendimiento en ese momento (Hoffman et al., 2001, 2010, 2011). En Z3.3 ocurre la máxima tasa de crecimiento y absorción de N (Angus, 2001) y se define el número máximo de primordios florales (Fischer, 1985), es el último momento en que se espera una respuesta en rendimiento al suministro de N. En este momento el indicador utilizado es el Índice de Nutrición Nitrogenada (INN) que relaciona la concentración de N en planta con un valor de N crítico según su producción de biomasa (Fassana Pereira, 2019).

En consecuencia de los cambios en los sistemas de producción mencionados, se ha registrado una creciente dependencia de insumos externos, particularmente de fertilizantes nitrogenados (Hoffman et al., 2013, 2016). Se ha documentado un incremento en las dosis aplicadas, pasando de aproximadamente 40 kg N ha^{-1} en la década de 1980 a cerca de 100 kg N ha^{-1} a comienzos de los años 2000 (Ernst & Siri-Prieto, 2011a). En la actualidad, se reportan dosis óptimas superiores a 200 kg N ha^{-1} para alcanzar altos rendimientos, valores que no pueden ser suministrados por el suelo bajo condiciones naturales de producción, debido a la disminución de su capacidad de aporte como a causa de la intensificación agrícola y la simplificación de las rotaciones (Hoffman et al., 2017). Además de la reducción en la capacidad del suelo para cubrir la demanda de nitrógeno de los cultivos, los avances en mejoramiento genético han dado lugar a cultivares con mayor potencial de rendimiento (Godiño Silva, 2020) y, por lo tanto, con mayores requerimientos nutricionales.

En este sentido, la incorporación de CS, particularmente leguminosas, en las rotaciones agrícolas constituye una estrategia de manejo que, bajo condiciones adecuadas, puede incrementar el aporte de nitrógeno al sistema y contribuir a reducir sus pérdidas. Los CS contribuyen a la reducción del uso de insumos sintéticos, especialmente fertilizantes y herbicidas, al tiempo que promueven la actividad biológica del suelo. Como resultado, mejoran la calidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas productivos (Pinto et al., 2023).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 SITIO EXPERIMENTAL

3.1.1 Ubicación

El experimento se instaló en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) perteneciente a la Facultad de Agronomía (Udelar), situada sobre la ruta nacional N° 3, a la altura del kilómetro 363 en el departamento de Paysandú.

3.1.2 Suelo e historia de chacra

El potrero donde se llevó a cabo el ensayo se encuentra sobre la unidad San Manuel según la cartografía de suelos a escala 1:40.000 (Dirección General de Recursos Naturales [DGRN], s.f.) (Seleccionar “Carta de suelos”). Los suelos dominantes son brunosoles éutricos típicos, de textura franca, profundos y de alta fertilidad natural (DGRN, s.f.) (Seleccionar “Carta de suelos”).

Los CS se sembraron en el invierno de 2023, que corresponde al tercer año consecutivo de agricultura en la rotación, después de pasturas. El trigo se sembró en el invierno siguiente, luego de un cultivo de maíz que tuvo como destino el ensilaje de planta entera (Tabla 1).

Tabla 1

Rotación de cultivos del área experimental (2020-2024)

2020		2021		2022		2023		2024
Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
Pastura	Soja	Colza	Soja	Cebada	Soja	CS	Maíz	Trigo

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

Para estudiar el efecto de diferentes CS invernales sobre el rendimiento y la condición nitrogenada del cultivo de trigo sucesor, se propuso un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA) con parcelas divididas. Se seleccionó una sola especie de CS de los grupos funcionales más utilizados, *Avena byzantina* como gramínea, *Vicia villosa* como leguminosa, la mezcla de ambas especies y un testigo que fue el barbecho químico, completando así los cuatro tratamientos que se repitieron en tres bloques. Cada tratamiento corresponde a una unidad experimental con un área de 12,6 m²⁻¹ que se dividió en tres partes iguales para evaluar el efecto de distinta estrategia de fertilización nitrogenada como un subtratamiento. Las estrategias de fertilización probadas fueron el modelo de recomendación actual descrito anteriormente (N ajustado) y un criterio de fertilización que pretende mantener el cultivo en niveles de N no limitantes durante todo el ciclo (N no limitante), en comparación con el testigo sin fertilizar (Sin N).

Tabla 2*Esquema del diseño experimental a campo*

Bloque	1				2				3			
Tratamiento	M	V	B	A	A	B	V	M	V	B	M	A
Subtratamientos	2	1	3	2	1	2	2	1	1	3	2	2
	1	3	2	3	2	1	1	3	3	1	3	1
	3	2	1	1	3	3	3	2	2	2	1	3

Nota. M= Mezcla Avena + Vicia, V= Vicia villosa, B= Barbecho químico, A= Avena byzantina, 1= Sin N, 2= N ajustado, 3= N no limitante.

3.3 MANEJO EXPERIMENTAL

3.3.1 Cultivos de servicio

Los CS se sembraron el 6 de junio de 2023 sobre un rastrojo de soja y se suprimieron el 12 de octubre de 2023, su manejo nutricional y sanitario se detalla en el trabajo final de grado de Pistón Aguilar y Pistón Aguilar (2025) quienes realizaron un estudio sobre la producción de biomasa aérea y radicular, además del aporte de N de los CS. A continuación, se presentan algunos resultados de importancia para el análisis de este experimento:

Tabla 3*Producción de biomasa total, aporte de N y relación C/N de los CS*

Tratamiento	Biomasa total (kg de MS ha ⁻¹)	Aporte de N (kg ha ⁻¹)	Relación C/N
<i>B</i>	1045 ± 402	21,00 ± 8,00	20,00
<i>A</i>	9344 ± 1676	101,30 ± 14,93	37,21
<i>V</i>	4380 ± 750	136,70 ± 22,72	12,15
<i>M</i>	8738 ± 686	144,03 ± 9,86	24,57

Nota. M= Mezcla Avena + Vicia, V= Vicia villosa, B= Barbecho químico, A= Avena byzantina. Elaborado con base en Pistón Aguilar y Pistón Aguilar (2025).

3.3.2 Cultivo de maíz

El 23 de noviembre de 2023 se sembró el cultivo de maíz, que fue cosechado el 15 de abril de 2024 para ensilaje de planta entera, es oportuno destacar para el análisis de este trabajo que, durante todo el ciclo, no se fertilizó con N, solo se hizo un ajuste de fósforo (P) y potasio (K) a la siembra, según análisis de suelo. El manejo del cultivo se detalla en el trabajo final de grado de Cerruti y López (2025).

3.3.3 Cultivo de trigo

Se sembró el cultivar de trigo Aromo a una densidad de 110 kg ha⁻¹ y una distancia entre hileras de 0,17m, el 4 de julio de 2024, como segundo sucesor de los CS (luego de maíz). La población lograda en el cultivo de trigo osciló entre 213 y 230 plantas m² para todos los tratamientos, estos valores se consideran adecuados según las recomendaciones de García Lamothe (2017) y Berger (2022), para ciclos intermedios, y se asemejan a los valores típicos descritos en la caracterización de cultivares que se realiza en EEMAC

(Fassana et al., 2025), por lo que se asume que este factor no fue una limitante para el cultivo. La cosecha se realizó el 10 de diciembre sobre toda el área.

El cultivo de trigo se fertilizó de manera diferencial para cada parcela de subtratamiento según la estrategia de fertilización en estudio. Para el tratamiento N ajustado, la dosis se definió según las recomendaciones agronómicas de Hoffman et al. (2001, 2010) para cereales de invierno. El esquema de aplicaciones fue el siguiente:

Tabla 4

Fertilización de las parcelas de N ajustado

	Dosis (kg de N ha ⁻¹)			
	Siembra	Macollaje	Encañazón	Total
Barbecho químico	30	34	37	101
<i>Avena byzantina</i>	30	34	37	101
<i>Vicia villosa</i>	30	0	37	67
<i>A. byzantina</i> + <i>V. Villosa</i>	30	17	37	84

En los subtratamientos de fertilización con N no limitante se suministró 150 kg de N ha⁻¹ divididos en partes iguales en tres momentos diferentes: siembra, macollaje y encañazón.

3.4 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Se realizó la comparación entre las precipitaciones mensuales acumuladas en el período 2024 y las de una serie histórica de años (1980-2009) elaborada por Castaño et al. (2011). Para calcular el coeficiente fototermal (Q) se utilizó el dato de radiación incidente de National Aeronautics and Space Administration (NASA, s.f.; Data Access Viewer → Single Point → Standard Resolution → Agroclimatology → Daily → ingresar latitud y longitud del punto de ubicación → seleccionar período de consulta → elegir parámetros a consultar → seleccionar el formato de descarga → Submit) y de temperatura media mensual según la estación meteorológica automatizada de la EEMAC (Biblioteca EEMAC, comunicación personal, s.f.), la temperatura base se consideró 4,5°C (Figura 3).

3.5 MEDICIONES EN EL CULTIVO DE TRIGO

Las variables en estudio se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5

Descripción de las variables medidas, unidad y momento de muestreo

Variable	Descripción	Unidad	Momento
N en suelo	N-NO ₃ ⁻ (0 - 7,5 cm)	ppm	Siembra
N en suelo	N-NO ₃ ⁻ (7,5 - 15 cm)	ppm	Siembra
N en suelo	N-NO ₃ ⁻ (0 - 7,5 cm)	ppm	Macollaje
N en suelo	N-NO ₃ ⁻ (7,5 - 15 cm)	ppm	Macollaje
Población	Número de plantas m ²	pl m ²	Implantación
Altura de hoja bandera	Altura HB	cm	Espigazón
Espigas	Número de espigas m ²	esp m ²	Espigazón
Biomasa aérea	Biomasa aérea	kg de MS ha ⁻¹	Espigazón
Nitrógeno absorbido	N en planta	kg de N ha ⁻¹	Espigazón
Rendimiento	Rendimiento de grano	kg ha ⁻¹	Cosecha
Productividad parcial de N	PPN	kg grano kg ⁻¹ N	Cosecha
Peso de mil granos	PMG	g	Cosecha
Peso hectolítrico	PH	kg hl ⁻¹	Cosecha

3.5.1 Determinaciones en suelo

Se tomaron muestras de suelo con un calador a dos profundidades: 0-7,5 cm y 7,5-15 cm, en dos momentos: a la siembra del cultivo y al inicio del macollaje. Se tomaron 12 muestras compuestas, una para cada unidad experimental, una vez etiquetadas se secaron en estufa a 60°C durante 48 horas, luego se molieron y tamizaron para la determinación de la concentración de N-NO₃⁻ en suelo.

3.5.2 Determinaciones en el cultivo

3.5.2.1 Implantación

El 14 de agosto se evaluó la implantación del cultivo de trigo para cada unidad experimental, es decir, sin diferenciar entre estrategias de fertilización. Se tomó una regla de un metro y colocándose entre dos surcos se contó el número de plantas por metro lineal a cada lado. Esto se repite tres veces, por lo que se tiene un promedio de número de plantas de 6 surcos por unidad experimental.

3.5.2.2 Altura de hoja bandera

Para medir la altura de hoja bandera se utilizó una regla de un metro y se realizó el promedio de altura en 10 plantas de puntos diferentes en cada parcela de subtratamiento.

3.5.2.3 Espigas m²

Para cuantificar el número de espigas se utiliza una regla de un metro y se cuenta el número de espigas en dos metros lineales, en dos surcos consecutivos, para cada parcela de subtratamiento. Luego se extrapola el valor promedio de espigas por metro lineal a una superficie, tomando como referencia la distancia entre hileras.

3.5.2.4 Biomasa aérea

La biomasa aérea se calcula a partir del número de espigas m² y el peso de la muestra de 10 tallos cortados para la determinación de N en planta.

$$\text{Biomasa aérea} = \text{Peso seco de 10 tallos} \times \text{Número de espigas m}^2$$

3.5.2.5 N absorbido

Se corta una muestra de 10 tallos en cada parcela de subtratamiento. Las muestras se pesan en fresco y se secan en estufa a 60°C durante 48 horas, luego se pesan en seco y se procesan utilizando un molino de forraje con tamiz de 2mm y, por último, se envían al laboratorio para la determinación de la concentración de N en planta.

$$\text{N absorbido} = \text{Biomasa aérea} \times \%N \text{ en planta}$$

3.5.2.6 Rendimiento de trigo

La cosecha del cultivo se realizó con una cosechadora experimental para cada parcela de subtratamiento, con un ancho operativo fijo de 1,5 m y el largo de cosecha medido en cada caso se determinó el rendimiento por superficie.

Se pesó el grano fresco, se midió humedad y se estimó el rendimiento de peso seco de grano.

3.5.2.7 Productividad parcial de nitrógeno (PPN)

Representa la producción en rendimiento de trigo por cada unidad de nutriente aplicada. Se calculó de la siguiente forma:

$$\text{PPN} = \text{Rendimiento de trigo con N ajustado} / \text{N total agregado}.$$

3.5.2.8 Peso de mil granos y peso hectolítrico

Se tomaron tres muestras de 100 granos de cada subtratamiento y se promedió el peso. En cada caso se midió el peso hectolítrico del grano de trigo.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los datos obtenidos se realizó mediante análisis de varianza (ANAVA) considerando un nivel de significancia del 5%. Las variables que se abordaron a nivel de CS antecesor sin diferenciar la estrategia de fertilización corresponden a un diseño en bloques completos al azar (DBCA). Se utilizó un modelo lineal que incluye el efecto de CS como factor fijo y el efecto de los bloques como aleatorio:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + T_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde: Y_{ij} es la variable respuesta observada en el bloque i y tratamiento j , μ es la media general, B_i es el efecto del bloque i , T_j es el efecto de la especie de cultivo de servicio j y ε_{ij} es el error experimental.

Para las variables que se evaluaron en parcelas divididas se utilizó el modelo considerando el CS como factor de parcela principal y la estrategia de fertilización como factor de subparcela, incluyendo su interacción:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + \varepsilon_{ij} + F_k + (T \times F)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} es la observación correspondiente al bloque i , especie de cultivo de servicio j y estrategia de fertilización k ; μ es la media general; B_i es el efecto del bloque; T_j es el efecto de la especie de cultivo de servicio; ε_{ij} es el error asociado a la parcela principal; F_k es el efecto de la estrategia de fertilización; $(T \times F)_{jk}$ es la interacción entre especie de cultivo de servicio y estrategia de fertilización; y ε_{ijk} es el error asociado a la subparcela.

Cuando el ANAVA detectó efectos significativos ($p < 0,05$), las medias fueron comparadas mediante el test de Tukey.

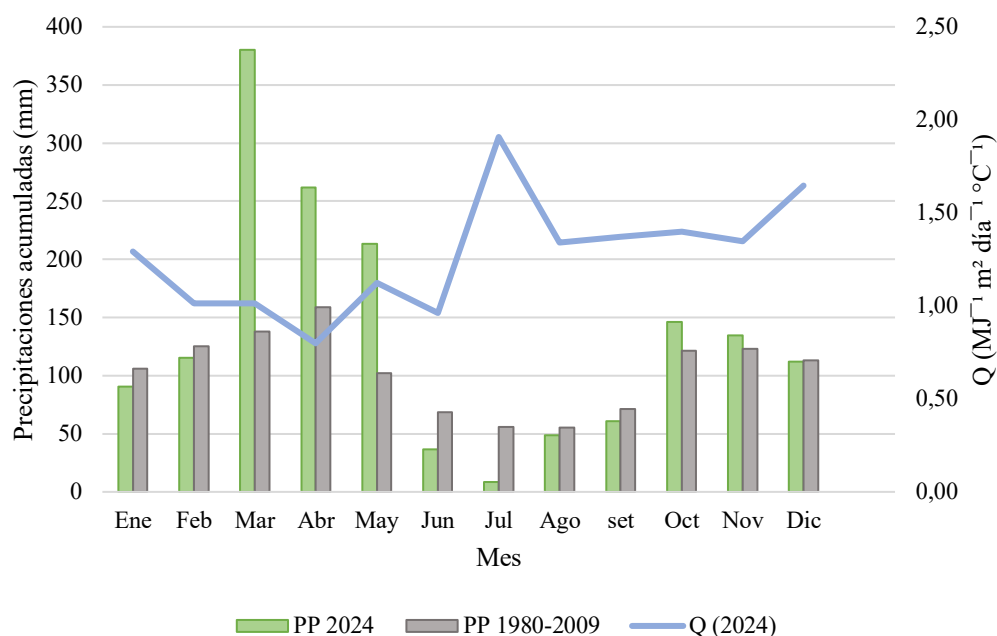
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Las precipitaciones en los meses de marzo, abril y mayo de 2024 superaron ampliamente el promedio histórico, en 2024 se acumularon 242, 103 y 111 mm más, respectivamente. Junio y julio presentaron el comportamiento contrario, con 32 y 48 mm menos que el promedio, respectivamente. La temperatura media durante el 2024 fue muy similar al promedio histórico, exceptuando los meses de mayo, julio y diciembre donde hubo una diferencia de, aproximadamente, 2°C.

Figura 3

Precipitaciones acumuladas y coeficiente fototermal (Q) 2024



Nota. Elaborado con base en Castaño et al. (2011), NASA (s.f.) y estación meteorológica automatizada de la EEMAC (Biblioteca EEMAC, comunicación personal, s.f.).

Las lluvias abundantes durante el otoño impidieron la siembra del cultivo de trigo en la ventana de fecha óptima, por lo que se retrasó hasta el 4 de julio. Las condiciones de alta nubosidad asociadas a las precipitaciones de primavera afectaron el desarrollo de un coeficiente fototermal óptimo durante el período crítico del cultivo, lo que pudo haber limitado su rendimiento.

4.2 EFECTO DE LOS CS SOBRE VARIABLES QUE DETERMINAN EL RENDIMIENTO DE TRIGO

4.2.1 Efecto sobre la concentración de nitrógeno en suelo a siembra y macollaje

Los valores de N-NO_3^- a la siembra en los primeros 7,5 cm de suelo y en la totalidad de la profundidad analizada (0-15cm) presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) para el tratamiento 4 (mezcla *Avena* + *Vicia*) respecto al barbecho, los CS sembrados puros presentaron valores intermedios. En el estrato entre 7,5-15 cm no se registraron diferencias estadísticamente significativas.

Al inicio del macollaje, en los primeros 7,5cm de suelo y en la totalidad de la profundidad analizada (0-15cm) la concentración de N-NO_3^- en el suelo tuvo un comportamiento diferencial según el CS antecesor. El tratamiento con CS gramínea registró los valores más bajos, la leguminosa los más elevados y el resto de los tratamientos mantuvo valores intermedios. En el segundo estrato (7,5-15cm) no hubo diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 6

Nitratos en los primeros 15 cm de suelo a siembra y macollaje

Estrato	Tratamiento (CS)	N-NO_3^- (ppm) siembra	N-NO_3^- (ppm) macollaje
0-7,5 cm	Barbecho	4,6 a	17,0 ab
	<i>Vicia villosa</i>	5,0 ab	23,0 b
	<i>Avena byzantina</i>	5,0 ab	14,3 a
	<i>A. byzantina</i> + <i>V. villosa</i>	6,5 b	17,7 ab
7,5-15 cm	<i>Vicia villosa</i>	2,7 a	4,0 a
	<i>A. byzantina</i> + <i>V. villosa</i>	3,0 a	3,3 a
	<i>Avena byzantina</i>	3,0 a	4,0 a
	Barbecho	3,0 a	4,0 a
0-15 cm	Barbecho	3,6 a	10,3 ab
	<i>Vicia villosa</i>	4,0 ab	13,3 b
	<i>Avena byzantina</i>	4,5 ab	9,3 a
	<i>A. byzantina</i> + <i>V. villosa</i>	5,0 b	10,3 ab

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

El resultado al momento de la siembra coincide con lo expresado por diversos autores respecto a que, CS con presencia de leguminosas aumentan la disponibilidad de nitrógeno a la siembra del cultivo siguiente (Cerruti & López, 2025; Lupwayi & Soon, 2016), aunque los valores son relativamente bajos si se considera que el nivel crítico a la siembra para un cultivo de trigo es de 16-18 ppm (Hoffman et al., 2001). En cualquiera de los casos fue necesario recurrir a la fertilización nitrogenada para la siembra del cultivo de trigo, sin diferencias en la dosis de N (Tabla 2). Estos valores relativamente bajos de N-NO_3^- al momento de la siembra son consecuencia de las precipitaciones acumuladas durante el barbecho que duplicaron lo esperado en un año promedio (Figura 5), favoreciendo procesos de pérdida de nitratos por lixiviación, además de una alta

extracción por parte del cultivo antecesor, ya que el maíz tuvo como destino el ensilaje de planta entera y no se realizó ajuste de N en todo el ciclo.

Al inicio del macollaje los resultados coinciden con la hipótesis de que CS de tipo leguminosas o su mezcla con gramíneas favorece la disponibilidad de nitrógeno en el suelo para el cultivo siguiente, respecto al uso de gramíneas puras. Cerrutti Rodríguez y López Martinelli (2025) determinaron, para estos mismos CS, que el N-NO_3^- disponible en el suelo al momento de la siembra de maíz y en V6 fue mayor cuando el antecesor fue *Vicia villosa* o su mezcla con Avena. Dichos autores encontraron que la relación entre el nivel de N-NO_3^- en el suelo y la proporción de leguminosa en el CS tuvo una relación cuadrática donde la concentración de nutriente en suelo se maximiza en torno al 40% de inclusión de la leguminosa.

En este estudio se pudo comprobar que el efecto residual de los CS en la dinámica de N se mantiene, al menos, hasta el cultivo de invierno siguiente (Tabla 4). Cuando el CS fue leguminosa pura no fue necesaria la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo (Tabla 2), en concordancia con la hipótesis de que este tipo de CS disminuyen los requerimientos de insumos externos de los cultivos sucesores (Carciochi et al., 2023, 2025).

4.2.2 Efecto sobre la condición del cultivo de trigo a espigazón

En cuanto a la altura de hoja bandera, existieron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos y entre estrategias de fertilización, con interacción entre ambas. Cuando el cultivo de trigo no fue fertilizado el tratamiento con *Vicia* como CS antecesor alcanzó mayores alturas de hoja bandera. Cuando se ajustó el N, el tratamiento mezcla Avena + *Vicia* alcanzó una menor altura, diferenciándose del tratamiento Avena pura, *Vicia* mantuvo un comportamiento intermedio. La fertilización con N no limitante registró los valores de altura más altos del experimento sin diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Para la biomasa aérea a espigazón existieron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos y entre estrategias de fertilización, con interacción entre ambas. Cuando el cultivo de trigo no se fertilizó se registró la mínima producción de biomasa aérea del experimento sin diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. En el caso donde se fertilizó el cultivo (N ajustado o N no limitante), el tratamiento que registró la mayor producción de materia seca en este estadio es *Avena byzantina* como CS antecesor.

El nitrógeno absorbido presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) cuando la fertilización se realizó con N no limitante. Los tratamientos *Avena byzantina* y la mezcla *A. byzantina* + *V. villosa* alcanzaron los mayores valores. Para el resto de los casos no se registraron diferencias estadísticamente significativas.

El número de espigas estuvo afectado significativamente ($p < 0,05$) por el tratamiento de CS y la estrategia de fertilización. En los tratamientos sin N y con N no limitantes, el cultivo de *Vicia villosa* como antecesor invernal alcanzó la mayor cantidad de espigas m^2 , diferenciándose de Avena y Barbecho respectivamente. Cuando se ajustó la fertilización nitrogenada no existieron diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 7

Altura de hoja bandera, biomasa aérea, nitrógeno absorbido y número de espigas

Estrategia de fertilización (EF)	Tratamiento (CS)	Altura de HB (cm)	Biomasa (kgMS/ha)	N absorbido (kgN ha ⁻¹)	Espigas (Nro esp m ²)
Sin N	M	43 a	3239 a	54 a	272 ab
	B	44 ab	3552 a	57 a	263 ab
	A	47 bc	3786 a	49 a	255 a
	V	50 c	3590 a	62 a	298 b
N ajustado	M	52 a	5741 ab	111 a	418 a
	V	53 ab	4761 a	86 a	382 a
	B	58 b	5257 ab	100 a	400 a
	A	59 b	5886 b	109 a	400 a
N no limitante	B	57 a	4687 a	106 a	373 a
	A	59 a	7046 c	163 b	450 ab
	V	61 a	5151 ab	116 a	494 b
	M	64 a	6399 bc	159 b	456 ab
EF		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Tratamiento		0,0038	0,0003	0,0016	0,0011
EF x CS		<0,0001	0,0022	<0,0001	0,0225

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

HB=Hoja bandera, M= Mezcla Avena + Vicia, V= *Vicia villosa*, B= Barbecho químico, A= *Avena byzantina*.

El efecto de los CS sobre la condición del cultivo de trigo a espigazón dependió de la estrategia de fertilización utilizada. Sin suministro de N el cultivo mostró un mejor desempeño cuando el CS antecesor fue *Vicia villosa*, reflejado en una mayor altura de HB y un mayor número de espigas por unidad de superficie. Estos resultados resaltan la importancia de incorporar este CS, principalmente en ambientes restrictivos en cuanto a la disponibilidad de N. En este contexto se espera que la leguminosa como antecesor contribuya a mejorar la disponibilidad de N para el cultivo de trigo, no solo a través de su servicio ecosistémico de aporte de nitrógeno (por FBN), sino por el servicio de reciclaje del nutriente. Dado que los efectos observados se mantuvieron hasta el segundo cultivo, se puede afirmar que existe un efecto residual de la leguminosa, en cuanto a la dinámica de N del sistema. Lupwayi y Soon (2016) atribuyen gran parte de este efecto residual a la descomposición progresiva de estructuras vegetales ricas en N, como los nódulos radicales, cuya mineralización se podría sincronizar con la demanda de N del cultivo de invierno siguiente, esta hipótesis resulta consistente ya que a la siembra del trigo no se registraron diferencias en la disponibilidad de N (Tabla 4), sino que se manifestaron una vez que avanzó el ciclo del cultivo.

A medida en que aumentó la disponibilidad de N por fertilización, las diferencias entre CS tendieron a desaparecer o a invertirse, el efecto de la leguminosa sobre la dinámica de N fue reemplazado por el suministro de nutriente vía fertilizante. En estas condiciones de N no limitante, la mayor producción de biomasa y de N absorbido por el cultivo de trigo cuando el antecesor de invierno fue *Avena* indican que existen otros servicios para el

sistema por parte de las gramíneas que se expresan una vez sorteada la limitante nutricional y que no fueron abordados en este estudio, como son la mayor producción de residuos y cobertura del suelo, la conservación de la humedad, el aporte de C y la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo. Aunque estos beneficios no se tradujeron en una ventaja de rendimiento, podrían significar un aporte a la sustentabilidad de los sistemas productivos y sería interesante evaluarlos en el mediano-largo plazo, ya que su impacto en la productividad se podría manifestar más allá del segundo año de la secuencia de cultivos.

4.3 EFECTO DE LOS CS SOBRE EL RENDIMIENTO DE TRIGO Y PARÁMETROS DE CALIDAD DE GRANO

El PMG presentó efectos significativos ($p < 0,05$) de la EF, del CS y de la interacción $EF \times CS$. Los mayores valores se observaron en barbecho y *Avena byzantina* bajo la condición Sin N, alcanzando 34 g, mientras que los valores más bajos correspondieron principalmente a tratamientos con *Vicia villosa* o la mezcla bajo mayores disponibilidades de N, con valores cercanos a 30 g. Bajo N ajustado, el PMG fue superior en *Avena byzantina* respecto a la mezcla, mientras que en N no limitante el barbecho y *Vicia villosa* presentaron los menores valores. En conjunto, los resultados muestran una tendencia a la disminución del PMG a medida que aumentó la disponibilidad de N.

El PH fue afectado significativamente ($p < 0,05$) por la EF y por la interacción $EF \times CS$, mientras que el efecto principal del tratamiento no resultó significativo ($p = 0,7431$). Los valores variaron entre 73 y 77 kg hl⁻¹, evidenciando una baja amplitud de respuesta entre tratamientos. El mayor PH se registró en *Vicia villosa* bajo N ajustado, diferenciándose del resto de las combinaciones evaluadas. En las demás condiciones, los valores de PH se mantuvieron relativamente estables, sin mostrar una tendencia asociada al tratamiento.

El rendimiento de trigo fue afectado significativamente ($p < 0,05$) por la estrategia de fertilización, el tratamiento de CS y la interacción $EF \times CS$. Bajo la condición Sin N, el tratamiento con *Vicia villosa* alcanzó el mayor rendimiento (3018 kg MS ha⁻¹), diferenciándose estadísticamente del barbecho, *Avena byzantina* y la mezcla *A. byzantina* + *V. villosa*, cuyos valores oscilaron entre 2023 y 2147 kg MS ha⁻¹. En cambio, bajo N ajustado y N no limitante no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, registrándose rendimientos superiores a 3200 kg MS ha⁻¹ en todos los casos. En términos generales, el incremento en la disponibilidad de N tendió a aumentar el rendimiento independientemente del tratamiento previo.

Tabla 8*Rendimiento, peso de mil granos y peso hectolítrico de trigo*

Estrategia de fertilización (EF)	Tratamiento (CS)	PMG (g)	PH (kg hl ⁻¹)	Rendimiento (kgMS ha ⁻¹)
Sin N	<i>Barbecho</i>	34 b	74 a	2023 a
	<i>A. byzantina</i> + <i>V. villosa</i>	33 ab	75 a	2061 a
	<i>Avena byzantina</i>	34 b	73 a	2147 a
	<i>Vicia villosa</i>	32 a	73 a	3018 b
N ajustado	<i>Barbecho</i>	32 ab	74 a	3258 a
	<i>Avena byzantina</i>	33 b	75 a	3417 a
	<i>Vicia villosa</i>	31 ab	77 b	3582 a
	<i>A. byzantina</i> + <i>V. villosa</i>	30 a	75 a	3660 a
N no limitante	<i>A. byzantina</i> + <i>V. villosa</i>	31 b	74 a	3644 a
	<i>Vicia villosa</i>	30 a	74 a	3745 a
	<i>Barbecho</i>	29 a	75 a	3879 a
	<i>Avena byzantina</i>	32 b	75 a	4140 a
EF		<0,0001	0,0067	<0,0001
Tratamiento		<0,0001	0,7431	0,0086
EF x CS		0,0007	0,0059	0,0006

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

PMG=Peso de mil granos. PH=Peso hectolítrico.

El peso de granos se mantuvo dentro del rango esperado para todos los tratamientos y las distintas estrategias de fertilización. En el caso de los tratamientos sin N, se obtuvo un PMG superior cuando el antecesor fue barbecho invernal, *Avena*, o la mezcla *Avena* + *Vicia*, donde los rendimientos fueron significativamente menores, respecto a *Vicia*. La relación entre el PMG y el rendimiento fue moderadamente negativa ($r = -0,57$). Esto se debe al efecto compensatorio que ocurre cuando existe un menor número de granos por superficie y el cultivo aumenta el peso individual de los granos. De todas maneras, el efecto del componente peso de granos no suple la importancia de alcanzar un mayor número de granos por superficie para obtener altos rendimientos.

El peso hectolítrico presentó escasa variación entre CS y EF, es una variable menos sensible que el rendimiento y el PMG a las diferencias entre antecesores. Si bien no hubo efecto del tratamiento, la interacción EF x CS indica respuestas en casos particulares, cuando se ajustó el N, *Vicia villosa* alcanzó los valores más elevados de PH, esto podría deberse a que las condiciones de mayor disponibilidad de N al inicio del cultivo lo mantuvieron en una situación más favorable al momento del llenado de grano, alcanzando granos con mayor densidad. La ausencia de efecto del tratamiento y la escasa amplitud de los registros indican que el PH estuvo condicionado por otros factores, distintos al manejo de N y al CS antecesor. Los valores entre 73 y 77 kg hl⁻¹ del experimento coinciden con los estándares nacionales de calidad correspondientes a trigo de segunda y tercera categoría, el PH promedio nacional para la zafra 2024 fue de 77 kg hl⁻¹, estos valores bajos se corresponden con la falta de precipitaciones en etapas iniciales del cultivo y golpes de calor durante el llenado de grano (Fagundez et al., 2025).

Cuando el cultivo de trigo no se fertilizó existió un efecto positivo en el rendimiento de grano al incluir CS leguminosas, asociado al aporte de N por fijación biológica y a la mineralización de los residuos de *Vicia*, que tienen una relación C/N baja en comparación con las gramíneas puras y la mezcla. Estos resultados coinciden con lo reportado por los siguientes autores respecto al impacto de las leguminosas sobre la disponibilidad de N y el rendimiento de los cultivos sucesores en ambientes con restricciones nutricionales: Pott et al. (2021), Vanzolini et al. (2013) y Carciochi et al. (2023) observaron incrementos en el rendimiento de los cultivos posteriores cuando *Vicia villosa* fue utilizada como CS, en comparación con barbechos o gramíneas puras como *Avena*, siendo la magnitud de la respuesta dependiente de la cantidad de N aportada por la leguminosa. La respuesta diferencial observada cuando el antecesor fue una leguminosa resalta la importancia de incluir este grupo funcional como estrategia de manejo para mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes nitrogenados y reducir la dependencia de insumos externos en los sistemas agrícolas (Carciochi et al., 2023, 2025).

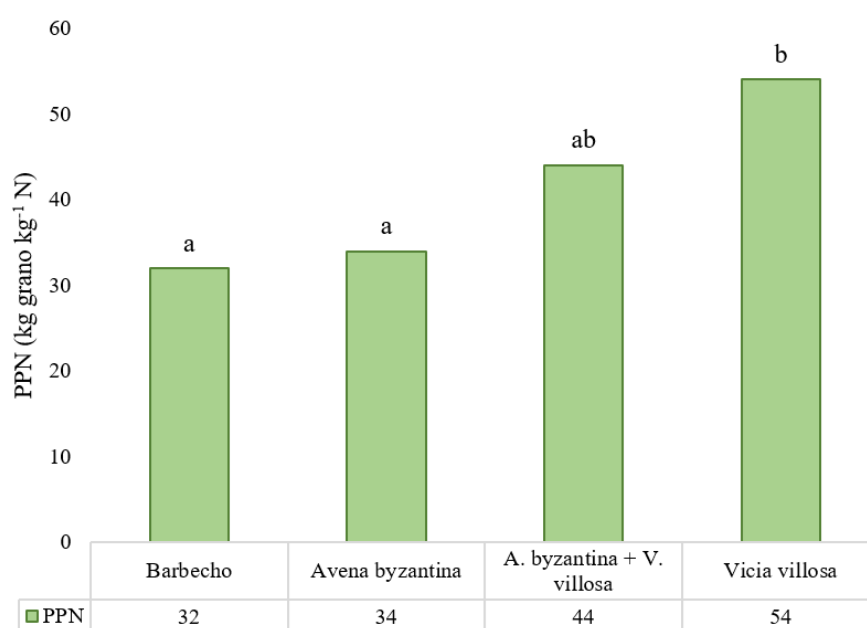
Cuando el cultivo de trigo recibió fertilización nitrogenada, las diferencias de rendimiento según tratamientos desaparecieron, lo que sugiere que la aplicación de N logró sustituir las diferencias en la oferta de este nutriente generadas por los distintos CS. Este comportamiento indica que el principal beneficio productivo asociado a la incorporación de leguminosas está relacionado con su capacidad para incrementar la disponibilidad de N en el sistema, ya que al cubrir las restricciones nutricionales, el rendimiento de trigo no se diferenció respecto al que tuvo gramínea o mezcla como antecesores.

4.4 PRODUCTIVIDAD PARCIAL DE NITRÓGENO (PPN)

Existieron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la PPN según CS antecesor. El mayor rendimiento de trigo por unidad de fertilizante aplicado se alcanzó luego de *Vicia villosa* como CS antecesor, mientras que el mínimo fue con *Avena byzantina*.

Figura 4

Productividad Parcial de Nitrógeno según CS antecesor



Cuando la fertilización del cultivo de trigo se ajustó según las recomendaciones agronómicas de Hoffman et al. (2001, 2010) para cereales de invierno, cada tratamiento de CS tuvo una demanda de N diferente (Tabla 2), sin embargo, todos alcanzaron el mismo rendimiento de grano (Tabla 7), estas diferencias en los requerimientos de fertilización entre tratamientos se deben al efecto residual de los CS.

El incremento en la PPN cuando se incluyó leguminosas como CS evidencia uno de los mayores beneficios de esta práctica para el sistema, que no se limita a incrementar el rendimiento de los cultivos inmediatamente sucesores, sino que continúa con la sustitución parcial del fertilizante nitrogenado requerido por cultivo de invierno siguiente. La inclusión de *Vicia villosa* permitió reducir la dosis de fertilizante nitrogenado de 101 a 67 kg N ha⁻¹ sin afectar el rendimiento de grano del trigo. Esta reducción de 34 kg N ha⁻¹ equivale a aproximadamente 74 kg de urea ha⁻¹, lo que representa un ahorro económico asociado a la fertilización nitrogenada de 30 U\$S ha, considerando que el costo de la urea promedió los 400 U\$S ha⁻¹ en 2024. Si se considera la inestabilidad del precio de la urea, con picos de 840 U\$S ha⁻¹ en 2026, el impacto económico sería significativamente mayor.

5. CONCLUSIONES

La evaluación del efecto de los CS sobre el trigo sucesor se realizó en una temporada con condiciones ambientales desafiantes, caracterizada por abundantes precipitaciones durante el período de barbecho que retrasaron la fecha de siembra, así como en la primavera, donde las condiciones de alta nubosidad afectaron el desarrollo de un coeficiente fototermal óptimo durante el período crítico del cultivo.

Las variables asociadas a la dinámica de N y al comportamiento del trigo demostraron que el efecto del CS antecesor depende de la estrategia de fertilización utilizada.

Al momento de la siembra de trigo no existió diferencias entre tratamientos en cuanto a la concentración de N-NO_3^- en suelo, las diferencias se manifestaron al inicio de macollaje donde el cultivo con *Vicia villosa* como antecesor no requirió fertilización nitrogenada, comprobando que existe un efecto residual de los CS leguminosas sobre la dinámica de N que se mantiene hasta el segundo cultivo de la secuencia.

Cuando no se fertilizó el cultivo de trigo, la inclusión de *Vicia villosa* como CS antecesor aumentó la altura de HB, el número de espigas por unidad de superficie y el rendimiento del cultivo. Cuando se ajustó la fertilización nitrogenada, la incorporación de *Vicia villosa* como CS aumentó la disponibilidad de N para el cultivo de trigo, reduciendo la dosis total de N aplicada sin afectar su rendimiento. De esta manera aumenta la productividad parcial del nutriente minimizando la dependencia de insumos externos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica del sistema en el mediano-largo plazo.

Ante la situación de N no limitante los beneficios de la inclusión de *Vicia villosa* sobre la dinámica de N desaparecen, ya que el fertilizante reemplaza el aporte de nutriente de la leguminosa y el cultivo de trigo demuestra una mayor producción de biomasa y absorción de N con CS gramíneas como antecesor. Probablemente al eliminar la deficiencia nutricional se manifiesten otros beneficios de la inclusión de gramíneas para el sistema como el aporte de materia orgánica, la mayor cobertura y la mejora de las condiciones físicoquímicas del suelo que sería interesante evaluar en el mediano-largo plazo.

Este trabajo resalta la importancia de elegir el CS acorde al beneficio que se quiera capitalizar en el sistema, según las condiciones particulares de producción.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, S., & Ernst, O. (2025). Explaining how diversified crop rotation systems reduce soybean yield gap: The case of Uruguay. *Field Crops Research*, 325, Artículo e109823. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109823>
- Alvarez, 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. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17385/1/Revista-INIA-74-set-2023-22.pdf>
- Angus, J. F. (2001). Nitrogen supply and demand in Australian agriculture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41(3), 277-288. <https://doi.org/10.1071/EA00141>
- Baethgen, W. E. (1992). Dinámica del nitrógeno en sistemas de rotación cultivos pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas*, (1), 3-25. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8834/1/15630031207133952.pdf>
- Balbinot, A., Jr, Veiga, M., Moraes, A., Pelissari, A., Mafra, A., & Picolla, C. (2011). Winter pasture and cover crops and their effects on soil and summer grain crops. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 46(10), 1357-1363. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000032>
- Berger, A. (2022, 17 de junio). *Recomendaciones para aumentar el rendimiento de trigo en Uruguay*. INIA. <https://inia.uy/noticias/recomendaciones-para-aumentar-el-rendimiento-de-trigo-en-uruguay>
- Berger, A. (2023). El trigo marcó un nuevo récord: Qué factores influyeron en este avance y cómo consolidar altos rendimientos. *Revista INIA*, (73), 27-30. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17258/1/Revista-INIA-73-junio-2023-09.pdf>
- Boccolini, M. F., Aimetta, B., Cazorla, C., & Conde, B. (2012). Efecto del residuo de vicia (*Vicia sativa* L.) sobre el potencial de nitrificación del suelo. 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. 83-87). INTA.
- Capurro, J., Surjack, J., Andreani, J., Dickie, M., & González, M. (2010). Evaluación de distintas especies de cultivos de cobertura en secuencias soja-soja en el área sur de la provincia de Santa Fe. *Informaciones Agronómicas*, (47), 13-15. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2010/09/13.pdf>

- Carciochi, W. D., Cafaro La Menza, F., Crespo, C., Domínguez, G., Rodríguez, 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://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109138>
- Carciochi, W. D., Cafaro La Menza, F., Terwissen Gjerloff, D. G., Reussi Calvo, N. I., Divito, G. A., Avila Manotoa, O. R., Rodríguez, M. P., Tovar Hernández, S., Lapaz Oliveira, A. M., Sainz Rozas, H. R., & Barbieri, P. A. (2025). A comprehensive analysis of the nitrogen synchrony between cover crops release and maize uptake. *Plant and Soil*, 516, 1639-1653. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07821-9>
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
- Celaya-Michel, H., & Castellanos-Villegas, A. E. (2011). Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 343-356. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000300343#B8
- Cerrutti Rodríguez, M. A., & López Martinelli, M. (2025). *Dinámica del nitrógeno en maíz posterior a cultivos de servicios invernales* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/50199>
- Dirección General de Recursos Naturales. (s.f.). *Coneat, carta de suelos y cartografía de campo natural*. MGAP. <https://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/>
- Ernst, O., Dogliotti, S., Cadenazzi, M., & Kemanian, A. (2018). Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield. *Field Crops Research*, 217, 180-187. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.014>
- Ernst, O., & Siri-Prieto, G. (2011a). La agricultura en Uruguay: Su trayectoria y consecuencias. En A. Ribeiro (Ed.), *II Simposio Nacional de Agricultura: No se llega si no se sabe a dónde ir: El abordaje necesario para que el proceso de expansión agrícola madure en Uruguay* (pp. 149-163). Universidad de la República.
- Ernst, O., & Siri-Prieto, G., (2011b). Raigrás como cultivo de cobertura: Efecto del largo del período de barbecho sobre la disponibilidad de agua, el riesgo de erosión y el rendimiento de la soja. *Cangüé*, (31), 18-27.
- Evans, L. T., & Fischer, R. A. (1999). Yield potential: Its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, 39(6), 1544-1551. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961544x>

- Fagundez, P., Rovetta, N., Avellaneda, J., Ayrala, D., Durán, C., Koster, C., Massa, F., Suburú, G., Córdova, D., Martinez, N., Godiño, M., & Vázquez, D. (2025). *Informe de calidad e inocuidad de trigo uruguayo: Zafra 2024/2025*. <https://mesadetrigo.uy/wp-content/uploads/2025/04/Publicacion-24-25-1.pdf>
- Fassana, N., Akerman, A., & Van del Dorpel, M. (2025). *Caracterización de cultivares de trigo 2025: Evaluación 2024*. Universidad de la República. <https://portal.fagro.edu.uy/wp-content/uploads/2025/05/Caracterizacion-Trigo-2024-Informe-2025.pdf>
- Fassana, N., Hoffman, E., Berger, A., & Ernst, O. (2022). Nitrogen nutrition index at GS 3.3 is an effective tool to adjust nitrogen required to reach attainable wheat yield. *Agrociencia Uruguay*, 26(2), Artículo e924. <https://doi.org/10.31285/AGRO.26.924>
- Fassana Pereira, C. N. (2019). *Diagnóstico y predicción de respuesta nitrogenada en base al estado nutricional de trigo en Z.33* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29335>
- Fischer, R. A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science*, 105(2), 447-461. <https://doi.org/10.1017/S0021859600056495>
- García Lamothe, A. (2010). Mejores prácticas de manejo (MPM) de nutrientes para la fertilización de trigo en sistemas intensivos. *Revista INIA*, (22), 21-24. <https://inia.uy/sites/default/files/publications/2024-06/revista-INIA-22-p.21-24.pdf>
- García Lamothe, A. (2017). Densidad de siembra en trigo. *Revista INIA*, (49), 17-22. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6995/1/revista-INIA-49.p.17-22.pdf>
- Giacomini, S., Aita, C., Chiapinotto, I., Hübner, A., Marques, M., & Cadore, F. (2004). Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto: II - Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 28(4), 751-762. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000400015>
- Godiño Silva, M. (2020). *Rendimiento de Trigo (Triticum aestivum L.) en Uruguay durante el período 1997-2018* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29941>
- González Álvarez, E. M. (2023). *Caracterización de los productores del litoral sur del país en función de la adopción e implementación de cultivos de servicio* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/44060>

- Hoffman, E., & Castro, A. (2012). Cambios en la fecha de siembra de los cultivos de invierno: Implicancias sobre el rendimiento y el riesgo. *Cangüé*, (32), 31-39. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/49688>
- Hoffman, E., & Ernst, O. (2017). Manejo del cultivo de trigo en distintas regiones: Uruguay. En G. A. Divito & F. O. García (Eds.), *Manual del cultivo de trigo* (pp. 136-142). IPNI.
- Hoffman, E., Fassana, N., Mazzilli, S., Berger, A., & Ernst, O. (2016). La necesidad de incrementar la eficiencia de uso del nitrógeno en cereales de invierno. *Fertilizar*, (24), 2-5. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2016/12/2.pdf>
- Hoffman, E., Fassana, N., & Perdomo, C. (2013). Manejo de nitrógeno en cereales de invierno: ¿Agregando más nos estamos quedando cortos? En A. Ribeiro & H. Silva (Eds.), *III Simposio Nacional de Agricultura: No se llega si no se sabe a dónde ir: Pensar en las causas y no solo medir las consecuencias* (pp. 51-62). Universidad de la República.
- Hoffman, E., Perdomo, C., & Ernst, O. (2011). Como enfocar el manejo de la fertilización nitrogenada en cereales de invierno para la nueva realidad agrícola del Uruguay. En A. Castro, E. Hoffman, & L. Viega (Eds.), *Limitaciones para la productividad de trigo y cebada* (pp. 83-93). Universidad de la República.
- Hoffman, E., Perdomo, C., Ernst, O., Bordolli, M., Pastorini, M., Pons, C., & Borghi, E. (2001). Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno. En Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (Ed.), *Seminario de Discusión Técnica: Manejo de la fertilización nitrogenada en cultivos de invierno*. Universidad de la República. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/45289>
- Hoffman, E., Perdomo, C., Ernst, O., Bordolli, M., Pastorini, M., Pons, C., & Borghi, E. (2010). Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (46), 13-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2010/06/13.pdf>
- Hoffman, E., Perdomo, C., Fassana, N., Ernst, O., & Berger, A. (2017). Realidades y mitos en el manejo del nitrógeno en cereales de invierno en Uruguay. *Cangüé*, (38), 23-29. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/Cangue-n8017.p3-Hoffman-et-al.pdf>
- Ignaciuk, A., Ilicic, J., Asprooth, L., Sitko, N. J., Bernard, A., Maggio, G., Tubiello, F. N., & Mueller, M. (2021). *Progress towards sustainable agriculture: Drivers of change*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7896en>

- Jorajuría Noya, N. P. (2019). *Efecto de la densidad de avena (Avena strigosa) y el rolado como método de desecación sobre el control de malezas y el rendimiento de soja* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29495>
- Kaspary, T. E., García, A., Jorajuría, P., & Cabrera, O. 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>
- Kremen, C., & Miles, A. (2012). Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: Benefits, externalities, and trade-offs. *Ecology and Society*, 17(4), Artículo e40. <https://doi.org/10.5751/ES-05035-170440>
- Larramendy Trujillo, P., & Iglesias de Soto, F. (2025). *Efecto de los cultivos de servicio leguminosa y gramínea en la productividad del maíz a largo plazo* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Servicio de Corrección Bibliográfica. <http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/view/331/244/7305>
- Ley n° 15.239: *Declaración de interés nacional: Uso y conservación de los suelos y de las aguas superficiales destinados a fines agropecuarios*. (1982). IMPO. <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/15239-1981>
- López Selios, J. (2025). *Efecto residual de la cobertura invernal sobre el suministro de nitrógeno y el rendimiento de cebada sembrada después de maíz y soja* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Servicio de Corrección Bibliográfica. <http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/book/315>
- Lupwayi, R. I., & Soon, Y. K. (2016). Nitrogen-related rotational effects of legume crops on three consecutive subsequent crops. *Soil Science Society of America Journal*, 80(2), 306-316. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.08.0299>
- Morón, A. (1994). El ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-planta-animal. En A. Morón & D. Risso (Coords.), *Nitrógeno en pasturas* (pp. 1-12). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8373/1/111219220807121938-p.1-12.pdf>
- National Aeronautics and Space Administration. (s.f.). *NASA POWER: Data Access Viewer*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2021). *Anuario estadístico agropecuario 2021*. MGAP.
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2022). *Anuario estadístico agropecuario 2022*. MGAP.

- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Anuario estadístico agropecuario 2023*. MGAP.
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2024a). *Anuario estadístico agropecuario 2024*. MGAP.
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2024b). *Encuesta agrícola primavera 2023*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/Comunicado_%20Agr_Prim_%202023_.pdf
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2025). *Anuario estadístico agropecuario 2025*. MGAP.
- Paredes, M. C. (2013). *Fijación biológica de nitrógeno en leguminosas y gramíneas* [Trabajo final de grado, Universidad Católica Argentina]. Biblioteca digital de la UCA. <https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/393/1/doc.pdf>
- Pinto, P., Paruelo, J. M., 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 tecnológico del INIA a las trayectorias agroecológicas* (pp. 215-234). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17110/1/Pinto-P.-et.al-Capitulo-11.pdf>
- Pistón Aguilar, B. S., & Pistón Aguilar, C. S. (2025). *Producción de biomasa aérea, radicular y aportes de nitrógeno de distintos cultivos de servicio invernales* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Servicio de Corrección Bibliográfica. <http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/book/348>
- Pott, L. P., Amado, T. J. C., Schwalbert, R., Gebert, F. H., Reimche, G. B., Pes, L. Z., & Ciampitti, I. A. (2021). Effect of hairy vetch cover crop on maize nitrogen supply and productivity at varying yield environments. *Science of the Total Environment*, 759, Artículo e144313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144313>
- Restovich, S., & Andriulo, A. (2012). Cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: Biomasa aérea, captura de nitrógeno, consumo de agua y efecto sobre el rendimiento en grano. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bordero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 29-35). INTA.
- Restovich, S., Andriulo, A., & Améndola, C. (2011). Introducción de cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: Efecto sobre algunas propiedades del suelo. *Ciencia del Suelo*, 29(1), 61-73. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672011000100007&lng=es&tlng=es

- Rillo, S., Álvarez, C., Bagnato, R., & Noellemeyer, E. (2012). Cultivos de cobertura: Gramíneas y leguminosas en el centro oeste de la provincia de Buenos Aires. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bordero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 58-68). INTA.
- Rimski-Korsakov, H., Zubillaga, M. S., Landriscini, M. R., & Lavado, R. S. (2016). Maize and cover crop sequence in the Pampas: Effect of fertilization and water stress on the fate of nitrogen. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(1), 12-20. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.12>
- Ruffo, M. L., & Parsons, A. T. (2004). Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (21), 13-15.
- Scavo, A., Fontanazza, S., Restuccia, A., Gaetano, R., Abbate, C., & Mauromicale, G. (2022). The role of cover crops in improving soil fertility and plant nutritional status in temperate climates: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, Artículo e93. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00825-0>
- Uruguay XXI. (2025). *Informe anual de comercio exterior de Uruguay 2024*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/informe-anual-de-comercio-exterior-de-uruguay-2024/>
- van Ittersum, M., Cassman, K., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance: A review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Vanzolini, J. I., Galantini, J. A., & 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. Bordero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 21-28). INTA.
- Zufiaurre, E., Mestre, B., Beltrán, M., & Luna, M. E. (2025). The inclusion of cover crops in agricultural rotation increases soil macrofauna diversity in the Pampas region. *Ciencia del Suelo*, 43(2), 228-240. <https://doi.org/10.64132/cds.v43i2.929>