

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EFFECTO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO LEGUMINOSA Y GRAMINEA
EN LA PRODUCTIVIDAD DEL MAIZ A LARGO PLAZO**

por

Pedro Aitor LARRAMENDY TRUJILLO
Francisco IGLESIAS DE SOTO

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

PAYSANDÚ
URUGUAY
2025

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Ing. Agr. (Mag.) Santiago Alvarez

Co-Director:

Ing. Agr. (PhD) Guillermo Siri

Tribunal:

Ing. Agr. (PhD) Guillermo Siri

Tribunal:

Ing. Agr. (MSc) Mauricio Bustamante

Tribunal:

Ing. Agr. (PhD) Pablo González

Fecha:

27 de marzo de 2025

Estudiante:

Pedro Aitor Larramendy Trujillo

Francisco Iglesias de Soto

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a nuestras familias y amigos por el apoyo y respaldo constante a lo largo de la carrera.

A los Ingenieros Agrónomos Santiago Álvarez y Guillermo Siri por la ayuda brindada durante la realización de esta tesis.

A la Facultad de Agronomía y a todos sus funcionarios por acompañarnos a recorrer este camino que hoy culmina, y del cual nos llevamos muchos recuerdos y amigos.

TABLA DE CONTENIDO

Página de aprobación	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURA.....	6
RESUMEN.....	7
SUMMARY	8
1 INTRODUCCIÓN.....	9
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 CULTIVOS DE SERVICIO.....	10
2.2 IMPACTO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE LOS SERVICIO ECOSISTÉMICOS	10
2.2.1 Aporte nitrógeno	10
2.2.2 Reciclaje de nitrógeno	11
2.2.3 Formación de materia orgánica	11
2.2.4 Servicio ecosistémico provisión de alimentos	12
2.3 GRUPOS FUNCIONALES DE CULTIVOS DE SERVICIO	13
2.3.1 Gramíneas.....	13
2.3.2 Leguminosas	13
2.3.3 Elección del cultivo de servicio	15
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	16
3.2 CONSTRUCCIÓN DE BASE DE DATOS.....	17
3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	18
3.3.1 Limpieza de base datos, ANAVA y p-valor	18
3.3.2 Análisis de Regresión del Rendimiento Relativo (RR)	19
3.4 Hipótesis agronómicas	20
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	21
4.2 EFECTO CULTIVO DE SERVICIO Y DOSIS DE NITRÓGENO SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ.....	22
4.3 ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA AGRONOMICA DE NITRÓGENO EN LA SERIE 2007-2019	24
4.4 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO AISLANDO EL EFECTO CLIMA A TRAVÉS DEL RENDIMIENTO RELATIVO.....	26
4.5 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO SEGÚN CONDICIÓN DE CHACRA	30
5 CONCLUSIONES	33

6 BIBLIOGRAFÍA.....	34
7 ANEXOS.....	39

LISTA DE TABLAS Y FIGURA

Tabla 1 <i>Características de las especies usadas como cultivos de servicio en el diseño experimental</i>	14
Tabla 2 <i>Especies de cultivos de servicio sembradas en distintos tratamientos entre 2007 y 2019</i>	16
Tabla 3 <i>Caracterización climática de la serie 2007 a 2019: Resumen para años buenos y malos</i>	21
Tabla 4 <i>Significancia según p-valor para grupo funcional de CS, dosis de nitrógeno y su interacción</i>	22
Tabla 5 <i>Rendimiento maíz (kg ha⁻¹) según grupo funcional y dosis de nitrógeno</i>	23
Tabla 6 <i>Eficiencia agronómica de nitrógeno por tratamiento y caracterización de año</i> 25	
Tabla 7 <i>Rendimientos bajo el concepto de chacra nueva y chacra vieja</i>	31
Figura 1 <i>Rendimiento relativo de maíz con distintos CS y fertilización en 13 años</i>	27

RESUMEN

La intensificación agrícola en Uruguay ha generado problemas de erosión y pérdida de nutrientes debido a la sustitución del sistema agrícola-pastoril por la agricultura continua. Los cultivos de servicio (CS), sembrados para proveer servicios ecosistémicos, son una estrategia clave para mitigar estos problemas y mejorar la sostenibilidad agrícola, este trabajo analiza el efecto a largo plazo de los CS y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento del maíz en un ensayo de 13 años. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de los cultivos de servicio y diferentes niveles de fertilización nitrogenada (0 y 50 kg N ha⁻¹) sobre el rendimiento del maíz en un sistema de siembra directa a largo plazo. Se consideran grupos funcionales de CS (leguminosas y gramíneas) y barbecho limpio. El ensayo se desarrolló en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (Paysandú) en un diseño experimental de bloques completos al azar con parcelas divididas, se evaluaron 9 tratamientos (8 CS y un testigo en barbecho) y dos niveles de fertilización nitrogenada (0 y 50 kg N ha⁻¹). Se midió rendimiento de maíz entre 2007 y 2019. Se utilizó análisis de varianza (ANAVA) y modelos mixtos para determinar efectos de CS, dosis de N y su interacción, clasificando años como “buenos” o “malos” según rendimiento promedio histórico. Los resultados indican que los CS afectaron significativamente el rendimiento del maíz, especialmente las leguminosas que incrementaron el rendimiento en comparación con barbecho y gramíneas. La fertilización nitrogenada tuvo mayor efecto a partir del quinto año del ensayo, reflejando la pérdida de capacidad de aporte de N del suelo. Las gramíneas, por su alta relación C/N, generaron una inmovilización de N que afectó negativamente el rendimiento del maíz. La eficiencia agronómica de N fue mayor en gramíneas en años favorables y en leguminosas en años malos. El rendimiento relativo disminuyó con el tiempo en barbecho, mientras que las leguminosas mostraron una tendencia positiva al agregar N. Los CS leguminosas lograron aumentar el rendimiento del maíz gracias a su aporte de N, aun en años de menor potencial de rendimiento del maíz. Por otro lado, las gramíneas presentan mayor eficiencia agronómica de N en años favorables, aunque limitan el rendimiento a largo plazo por su alta relación C/N. La respuesta a la fertilización nitrogenada aumenta a medida que se intensifica el uso agrícola continuo.

Palabras clave: rendimiento de maíz, cultivo de servicio, fertilización nitrogenada, eficiencia agronómica del nitrógeno

SUMMARY

The agricultural intensification in Uruguay has caused erosion and nutrient loss problems due to the replacement of the agricultural-pastoral system with continuous cropping. Cover crops (CC), sown to provide ecosystem services, are a key strategy to mitigate these problems and improve agricultural sustainability. This study analyzes the long-term effect of CC and nitrogen fertilization on maize yield in a 13-year trial. The aim of this study is to evaluate the effect of cover crops and different levels of nitrogen fertilization (0 and 50 kg N ha⁻¹) on maize yield in a long-term no-till system. Functional groups of CC (legumes and grasses) and bare fallow are considered. The trial was conducted at the Dr. Mario A. Cassinoni Experimental Station (Paysandú) using a randomized complete block design with split plots. Nine treatments were evaluated (eight CC and one fallow control) along with two levels of nitrogen fertilization (0 and 50 kg N ha⁻¹). Maize yield was measured from 2007 to 2019. Analysis of variance (ANOVA) and mixed models were used to determine the effects of CC, N rates, and their interaction, classifying years as "good" or "poor" based on historical average yield. The results indicate that CC significantly affected maize yield, especially legumes, which increased yield compared to fallow and grasses. Nitrogen fertilization had a greater effect from the fifth year of the trial, reflecting the loss of the soil's N-supplying capacity. Grasses, due to their high C/N ratio, caused N immobilization, negatively affecting maize yield. The agronomic efficiency of N was higher in grasses during favorable years and in legumes during poor years. The relative yield decreased over time in fallow, while legumes showed a positive trend with N addition. Legume CC managed to increase maize yield thanks to their N contribution, even in years with lower maize yield potential. On the other hand, grasses showed greater agronomic efficiency of N in favorable years, although they limited long-term yield due to their high C/N ratio. The response to nitrogen fertilization increases as continuous agricultural use intensifies.

Keywords: maize yield, cover crop, nitrogen fertilization, agronomic nitrogen efficiency

1 INTRODUCCIÓN

El aumento sostenido de la demanda en la producción de alimentos para consumo humano y animal, y para la producción de biodiesel ha provocado un cambio en el uso del suelo a nivel mundial. En Uruguay el proceso se caracterizó por una intensificación de la agricultura que determinó la sustitución del tradicional sistema de agricultura-pastura, que consistía 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 siempre en siembra directa, por un sistema de agricultura continua con una alta frecuencia de soja y la presencia de largos períodos de barbecho invernal. En consecuencia, se generaron secuencias de cultivo con largos períodos de tiempo de suelo descubierto, aumentando la probabilidad de que se produzcan pérdidas de suelo y nutrientes a causa de la erosión (Siri-Prieto & Ernst, 2012).

Con el objetivo de limitar los problemas asociados a la erosión de suelos, desde el 2013, el estado de Uruguay implementó la Ley 18.564, la cual exige la presentación de Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo y exhorta a cumplir con un límite de tolerancia de pérdidas de suelo por erosión anual y, por lo tanto, genera la necesidad de diseñar rotaciones agrícolas e implementar tecnologías para cumplir con esta normativa (Ley N° 18.564, 2009). A nivel comercial, se tradujo en un aumento sostenido en el área de cultivos de servicio (CS), también conocidos como cultivos de cobertura. Cultivos que son sembrados con el objetivo de proveer servicios ecosistémicos diferentes al de la provisión de alimentos.

Si bien existe información a nivel nacional y regional sobre el aporte de diversos servicios ecosistémicos por parte de los CS. Son escasos los estudios que profundizan en el efecto que pueden generar a largo plazo. En la hipótesis del estudio se plantea en primer lugar que los cultivos de servicio (CS) afectan significativamente el rendimiento del maíz. En segundo lugar, se hipotetiza que la fertilización nitrogenada en estadio V6 influye en la productividad del maíz, pero su efecto está modulado por el tipo de CS previo. Finalmente, se propone que la edad de la chacra, definida por su historia agrícola, genera una respuesta diferencial en el efecto de los CS y la fertilización nitrogenada, condicionando el rendimiento del maíz. Por consiguiente, el objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto a largo plazo de los CS y de diferentes niveles de fertilización nitrogenada sobre el rendimiento del cultivo de maíz en una serie histórica de 13 años.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CULTIVOS DE SERVICIO

Si bien la introducción de los CS en los sistemas agrícolas del país tuvo como objetivo limitar la erosión para cumplir con la normativa vigente de los Planes de Uso y Manejo de Suelos. Estos cultivos pueden proveer distintos servicios ecosistémicos según la especie seleccionada y contribuir a un proceso de intensificación agrícola sostenible de los sistemas productivos.

Los servicios ecosistémicos se definen como los beneficios obtenidos de los ecosistemas, que sustentan directamente la vida humana (Camacho Valdez & Ruiz Luna, 2012). Para evitar el deterioro de los servicios ecosistémicos es necesario implementar prácticas agrícolas sostenibles, que permitan preservarlos y hacer un uso eficiente de estos (Brutti et al., 2022). En este sentido la incorporación de los CS se considera una estrategia efectiva para mitigar riesgos en sistemas de producción agrícola, gracias a su capacidad para mantener o mejorar distintos servicios ecosistémicos y así evitar el deterioro de la salud del suelo y promover la sostenibilidad ambiental. De manera general, estos cultivos ofrecen beneficios inmediatos como: reducción de pérdidas de nutrientes por lavado y escurrimiento (Reeves et al., 1993), incorporación de nitrógeno y carbono al sistema (Blanco-Canqui et al., 2015), regulación de la erosión de suelo (Rimski-Korsakov et al., 2016), aumento de la biodiversidad (Finney et al., 2016), o el control de malezas (Rimski-Korsakov et al., 2016); y de largo plazo como: mejoras en la materia orgánica del suelo (Rimski-Korsakov et al., 2016), la estructura física y la fertilidad (Ruffo & Parsons, 2004).

Estas distintas funcionalidades les permiten reducir la dependencia de uso de insumos provenientes de energía fósil (Odhiambo & Bomke, 2001; Ruffo & Parsons, 2004) y, por ende, aumentar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a adversidades climáticas y desafíos ambientales (Álvarez et al., 2013). El aporte de los CS puede ser sustancialmente diferente según la historia de la chacra. En chacras en rotación con pasturas definidas como “chacra nueva”, el efecto pastura puede sostener por el rendimiento de los cultivos, pero en “chacras viejas”, luego de 4 o 5 de agricultura continua años post pastura el suelo comienza a perder estructura y capacidad de aporte de nutrientes (Ernst et al., 2018). Estas diferencias, pueden resultar importantes a la hora de interpretar el aporte de los CS al sistema e influir sobre el tipo de respuesta de los cultivos de renta subsiguientes.

2.2 IMPACTO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE LOS SERVICIO ECOSISTÉMICOS

En la siguiente sección se profundizará en los servicios ecosistémicos afectados por los CS que son de interés para un mejor entendimiento de este trabajo.

2.2.1 Aporte nitrógeno

El aporte de nitrógeno (N) que realizan las leguminosas en asociación con bacterias del género *Rhizobium*, mediante el proceso de fijación biológica de nitrógeno (FBN), es un servicio ecosistémico relevante para la sostenibilidad de los sistemas

agrícolas. La siembra de leguminosas como CS, puede mejorar significativamente este servicio al aumentar la disponibilidad de N en el suelo, promoviendo la fertilidad y reduciendo la dependencia de fertilizantes nitrogenados externos (Pott et al., 2021). Además, este aporte contribuye a evitar balances de nitrógeno negativos en los sistemas de producción, lo cual permite tanto mantener o aumentar la productividad y la salud del ecosistema agrícola a largo plazo (Siri-Prieto & Ernst, 2012).

Distintos estudios indican que las leguminosas pueden aportar entre 25 y 40 kg de N fijado de la atmósfera por tonelada de materia seca producida en sistemas de rotación de cultivos y pasturas (Díaz Rosello, 1992; Sawchik, 2001). Por otro lado, Büchi et al. (2015) sostiene que el aporte N por FBN de las leguminosas varían entre 50 y 150 kg por hectárea según el nivel de productividad. En aquellos sistemas que incluyen solamente cultivos para grano, la alternancia con leguminosas anuales es una opción razonable para reducir la dependencia del fertilizante nitrogenado (Sawchik, 2001).

Para lograr una provisión exitosa de este servicio ecosistémico, es fundamental sincronizar la mineralización del N con las necesidades del cultivo subsiguiente (Reeves et al., 1993). La eficacia del proceso está condicionada por factores como la madurez del CS, las condiciones ambientales y el manejo adecuado de la fertilización nitrogenada (Reeves et al., 1993). En adición a una correcta gestión del periodo de barbecho, para maximizar la eficiencia en la recuperación del N fijado (Ernst, 2006; Sawchik et al., 2015).

2.2.2 Reciclaje de nitrógeno

La absorción y liberación de nitrógeno y otros nutrientes por los CS evita la pérdida de nutrientes móviles en suelo por lavado y mejora la eficiencia de su uso al permitir la recuperación y reciclaje de nutrientes esenciales dentro del sistema suelo-planta (Garba et al., 2022; Odhiambo & Bomke, 2001; Salvagiotti et al., 2013). Para que se cumpla este servicio, la biomasa microbiana juega un papel central en la transformación del N mineral en compuestos orgánicos y viceversa (Jarvis et al., 1996). Durante este ciclo, el N mineral, como el amonio y el nitrato, es asimilado por los microorganismos y posteriormente transformado en formas orgánicas, lo que permite su retención antes de quedar nuevamente disponible para las plantas mediante la remineralización (Sawchik, 2001). La actividad microbiana se va a ver afectada por la relación carbono/nitrógeno (C/N) de los residuos y las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad (Giacomini et al., 2004; Sawchik, 2001). Respecto a la calidad de los residuos, para evitar problemas de deficiencias de N en suelo durante los cultivos subsiguientes es importante manejar correctamente los CS, para evitar residuos con una alta relación C/N y/o períodos muy cortos de barbecho que favorezcan procesos de inmovilización neta. Lo que puede afectar directamente la disponibilidad de nutrientes para los cultivos posteriores (Odhiambo & Bomke, 2001; Salvagiotti et al., 2013).

2.2.3 Formación de materia orgánica

La materia orgánica (MO) es fundamental para mejorar la estructura del suelo, aumentar la retención de agua y nutrientes, y fomentar la actividad biológica en el suelo. Además, contribuye a la resiliencia del suelo ante eventos climáticos extremos, como la sequía, y ayuda en la mitigación del cambio climático al actuar como reservorio de

carbono (Gentsch et al., 2024; Tisdall & Oades, 1982). Los CS son clave para aumentar los niveles de MO, ya que aportan biomasa que se descompone y enriquece el suelo (Tellatin & Myers, 2017).

La formación de MO puede verse afectada según las diferentes especies de CS que se empleen. Las gramíneas, como el centeno, tienden a producir una mayor proporción de MO particulada, la cual es más lábil y se descompone más rápidamente. Por otro lado, las leguminosas, como la vicia, favorecen la acumulación de MO asociada a la fracción mineral, que es más resistente a la descomposición y contribuye a la estabilidad del carbono en el suelo a largo plazo (Hudek et al., 2022; Liu et al., 2005).

2.2.4 Servicio ecosistémico provisión de alimentos

El servicio ecosistémico de provisión de alimentos es fundamental para la seguridad alimentaria, y los CS desempeñan un papel clave al mejorar este servicio mediante la optimización de nutrientes en el suelo, lo cual puede aumentar los rendimientos de los cultivos principales (Balbinot et al., 2011; Ruffo & Parsons, 2004).

Leguminosas como Vicia sativa han demostrado una notable capacidad para incrementar los rendimientos de maíz en comparación con parcelas en barbecho, logrando aumentos de hasta el 74% gracias a su eficiente fijación y liberación de nitrógeno (Giacomini et al., 2004). De igual manera, especies como el trébol y la arveja, con su baja C/N, facilitan una rápida mineralización y disponibilidad de nitrógeno, lo que resulta beneficioso para el maíz (Siri-Prieto & Ernst, 2012). Sin embargo, existen estudios que sugieren que, en ciertos contextos, las parcelas sin CS pueden alcanzar mayores rendimientos, posiblemente debido a una mayor disponibilidad de agua y nitrógeno en estos sistemas (Siri-Prieto & Ernst, 2012).

La incorporación de CS en sistemas agrícolas debe ajustarse a las necesidades específicas del cultivo de renta (CR) y a las condiciones de manejo. En un estudio realizado en Brasil, el uso de Vicia villosa combinado con fertilización nitrogenada ha generado un incremento del 8,3% en los rendimientos de maíz en áreas de baja productividad. Pero, además logró suplir entre el 72 a 89% de los requerimientos de nitrógeno del cultivo sucesor, contribuyendo a la reducción de insumos externos y promoviendo un mayor rendimiento del maíz en ambientes de baja fertilidad (Pott et al., 2021).

Los efectos de los CS en el rendimiento de los CR también están influenciados por la disponibilidad de agua y el manejo del suelo. En regiones áridas o semiáridas, donde el agua es un recurso limitante, los CS, particularmente las gramíneas, pueden reducir la disponibilidad de agua en el perfil del suelo debido a la transpiración durante su crecimiento, lo cual impacta negativamente en el rendimiento de los cultivos sucesores (Wang et al., 2021). No obstante, en áreas con mayor disponibilidad hídrica, los CS reducen la evaporación y mejoran la infiltración, ayudando a mantener la humedad en el suelo y favoreciendo el rendimiento del CR (Wang et al., 2021). Además, los CS contribuyen a la mejora de la estructura del suelo, lo que a su vez favorece el rendimiento de los CR, la incorporación de CS que generan una gran cantidad de biomasa, como las gramíneas, promueve una mejor agregación del suelo y aumenta la capacidad de retención de agua, lo que optimiza el uso del recurso hídrico en el sistema

agrícola (Marcillo & Miguez, 2017). Estos efectos estructurales pueden incrementar los rendimientos del maíz en un 30-33% cuando se combina con bajas tasas de fertilización nitrogenada o se emplea siembra directa en lugar de labranza convencional (Marcillo & Miguez, 2017).

Sin embargo, los beneficios de los CS no son universales y dependen de las condiciones ambientales y de manejo. En climas secos o en suelos con baja capacidad de retención de agua, los CS pueden reducir las reservas de humedad, afectando negativamente el rendimiento del CR (Wang et al., 2021). Asimismo, el éxito de los CS para incrementar el rendimiento depende de factores como la selección de especies, la fecha de terminación del cultivo y las prácticas de manejo de los residuos, elementos esenciales para maximizar el aporte de los CS al servicio ecosistémico de provisión de alimentos (Marcillo & Miguez, 2017).

2.3 GRUPOS FUNCIONALES DE CULTIVOS DE SERVICIO

Esta sección se enfocará en los grupos funcionales y especies utilizadas durante los 13 años de duración del experimento.

2.3.1 Gramíneas

Las gramíneas se caracterizan de manera general por su rápido crecimiento y capacidad de generar biomasa significativa, tienen menor susceptibilidad a plagas y enfermedades y una adaptabilidad a una amplia gama de suelos, incluidos los arcillosos y arenosos, lo que les permite tolerar condiciones de baja fertilidad natural, si bien ante condiciones de bajo contenido de MO ven fuertemente afectada su productividad (Carámbula, 2019). Este tipo de cultivos tiene una alta relación carbono/nitrógeno (C/N), generalmente superior a 24:1, lo que implica que sus residuos se descomponen más lentamente (Carámbula, 2019)

Las gramíneas son especialmente eficaces en el control de la erosión, debido a su capacidad de generar rápida cobertura del suelo, a la alta relación C/N de su rastrojo y al extenso sistema radicular que estabiliza el suelo, lo cual les permite reducir la pérdida de sedimentos durante lluvias intensas (Roth & Waite, 2021). Además, su rápido crecimiento y cobertura del suelo les permite ser muy competitivas con las malezas por recursos como luz y nutrientes, mejorando la eficiencia en el uso de herbicidas para su control (Blanco-Canqui et al., 2015). Otro beneficio clave es su contribución al aporte de materia orgánica particulada (MOP), lo que mejora la estructura del suelo y aumenta su capacidad de retener agua y nutrientes a largo plazo (Roth & Waite, 2021). Las gramíneas también son eficientes en la captura de nitrógeno, previniendo la lixiviación de nitratos hacia las aguas subterráneas (Finney et al., 2016). Por último, su sistema radicular profundo y fibroso les permite mejorar la estructura del suelo y aumentar la infiltración de agua (Essman & Legleiter, 2012).

2.3.2 Leguminosas

Las leguminosas se caracterizan de manera general por una tasa de crecimiento moderada, prácticamente nula en invierno, fijar N del aire y por poseer una relación C/N baja, generalmente entre 10:1 y 15:1 (Kladivko, 2016). Si bien, existen diferencias entre

especies (ver Tabla 1), las leguminosas se adaptan a diferentes tipos de suelos, pero algunas especies pueden tener una preferencia por suelos bien drenados y ricos en materia orgánica (Kladivko, 2016).

El principal servicio ecosistémico que ofrecen las leguminosas es la FBN, que incrementa la disponibilidad de este nutriente para los cultivos sucesores, mejorando la fertilidad del suelo y reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos (Flynn & Idowu, 2015). Además, aporta a la construcción de materia orgánica asociada a la fracción mineral, lo que contribuye a la mejora de la estructura del suelo y aumenta su capacidad para retener nutrientes y agua a largo plazo (Clark, 2012). Algunas leguminosas, como *Vicia villosa*, también han mostrado ser eficaces en el control de malezas, ya que su cobertura densa suprime la germinación de especies indeseadas (Ruffo & Parsons, 2004).

Tabla 1

Características de las especies usadas como cultivos de servicio en el diseño experimental

Especie	Fecha de siembra	Tipo de crecimiento	Producción Potencial *	C/N	Adaptabilidad a suelos pobres	Comentarios Adicionales
<i>Avena sativa L.</i>	Marzo	Erecto	Alto	Alta	Adaptabilidad a suelos de bajo potencial	Resistente a roya del tallo, menos a roya de la hoja
<i>Avena byzantina</i>	Febrero	Erecto	Alto	Alta	Adaptabilidad a suelos de bajo potencial	Susceptible al vuelco
<i>Avena strigosa</i>	Marzo	Semipostrado	Alto	Alta	Adaptabilidad a suelos de bajo potencial	Menor tamaño de semilla
<i>Lolium multiflorum</i>	Febrero-Marzo	Erecto	Alto	Media	Requiere mayor fertilidad y humedad	Competitividad reducida en tetraploides
<i>Triticale</i>	Otoño	Erecto	Medio	Alta	Adaptabilidad a suelos arenosos y ácidos	Buena resistencia a la roya
<i>Trébol alejandrino</i>	Marzo	Erecto	Bajo	Baja	Amplia gama, incluye suelos salinos y alcalinos	Aporta hasta 200 kg N/ha.
<i>Vicia sativa</i>	Marzo-abril	Postrado	Alto	Baja	Adaptabilidad a suelos de bajo potencial, pH 5 a 7	Buena cobertura y producción de MS
<i>Pisum sativum</i>	Marzo	Postrado	Alto	Baja	Suelos livianos y pH medios	Aporta 185 kg N/ha.

Nota. *Producción potencial de forraje: alta (> 5 Mg ha⁻¹) medio (3-5 Mg ha⁻¹) bajo (< 3 Mg ha⁻¹). Elaborado en base en Álvarez et al. (2013), Ayala et al. (2010), Baigorria et al. (2011), García (2003), Prieto (2010), Rennie y Dubetz (1986, como se cita en Ferraris et al., 2011), Siri-Prieto y Ernst (2012), Terra et al. (2012).

2.3.3 Elección del cultivo de servicio

La elección adecuada de CS según los objetivos específicos de un sistema de producción agrícola es fundamental para optimizar los beneficios ecosistémicos y minimizar los posibles efectos adversos. Garba et al. (2022) enfatizan en la importancia de seleccionar especies basadas en las características específicas del suelo y los objetivos deseados, como mejorar la fertilidad del suelo o reducir la erosión. Este enfoque es respaldado por Siri-Prieto y Ernst (2012), quienes destacan que la elección del CS debe considerar tanto las condiciones del suelo y el clima como los objetivos específicos, tales como control de malezas y fijación de nitrógeno.

Pinto et al. (2021) afirma la importancia de la elección del CS, en ese sentido sostiene que para una chacra cuyo objetivo sea el control de erosión, por ejemplo, sería recomendable optar por especies o mezclas que proporcionen una cobertura rápida y generen rastrojos de descomposición lenta. En cambio, si el propósito es aumentar el contenido de nitrógeno orgánico o mejorar el rendimiento del maíz, las leguminosas serían la mejor opción debido a su capacidad de FBN, sin comprometer la humedad del suelo (Garba et al., 2022). En la Pampa argentina, por ejemplo, se observó que los CS leguminosa incrementaron el rendimiento del maíz en un 7%, mientras que los CS no leguminosos resultaron en una disminución del rendimiento en un 8% (Alvarez et al., 2017). Sin embargo, su impacto en el rendimiento es dependiente del cultivo de renta sucesor. Si el cultivo sembrado es soja, la conservación de agua del suelo es la variable de mayor interés (Wang et al., 2021).

Finalmente, es esencial equilibrar los beneficios deseados con los posibles efectos no deseados. Garba et al. (2022) advierten que los CS, también pueden tener efectos negativos en el rendimiento posterior de los cultivos comerciales al afectar la disponibilidad de agua del suelo. El manejo y la selección basada en un entendimiento profundo de las dinámicas de cada CS y su impacto en el ambiente son clave para maximizar sus beneficios (Garba et al., 2022).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

El experimento está ubicado aproximadamente a 10 km de la ciudad de Paysandú en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC) (32° 21' S y 58° 02' W; elevación de 61 m).

Se ubica sobre suelos de la unidad San Manuel según la carta 1:1.000.000 del Ministerio de Agricultura y Pesca (Altamirano et al., 1976). El suelo es arcillo-limoso (Argiudol típico) con una capacidad de retención de agua disponible de 100 mm en los primeros 0,6 m del perfil del suelo. En el otoño de 2007, luego de una pastura de trébol rojo, se instaló el experimento que consiste en una secuencia de CS-maíz en sistemas de siembra directa.

El diseño experimental fue de bloques completos al azar (DBCA) con parcelas divididas. Contando con 3 bloques y 9 tratamientos (8 CS más un testigo) (parcela mayor), con dimensiones de 15 m de longitud y 5.0 m de ancho con diez hileras de 0.50 m. Cada parcela tiene dos niveles de fertilización en V6 del cultivo de maíz (parcela menor): 0 kg N ha⁻¹ y 50 kg N ha⁻¹.

Se han evaluado desde el comienzo 9 tratamientos: Avena sativa, Avena byzantina, Avena strigosa, Lolium multiflorum, Triticum aestivum, Trifolium alexandrinum, Vicia sativa, Pisum sativum. Habiendo siempre una parcela en Barbecho, la cual oficia de testigo sin cultivo de servicio (Tabla 2).

Tabla 2

Especies de cultivos de servicio sembradas en distintos tratamientos entre 2007 y 2019

Tratamiento	Período		
	2007/2009	2010	2011-2019
1	Barbecho	Barbecho	Barbecho
2	Avena Negra	Avena Común	Avena Común
3	Avena Común	Avena Común	Avena Común
4	Triticale	Triticale	Triticale
5	Raigrás	Raigrás	Raigrás
6	Alejandrino	Alejandrino	Alejandrino
7	Vicia sativa	Vicia Sativa	Alejandrino
8	Mostaza	Mostaza	Arveja
9	Arveja*	Arveja	Arveja

Nota. (*) De 2007 a 2008 Trifolium balcarcae.

Los cultivos fueron sembrados entre las fechas 10/4 a 22/7. La supresión fue entre 15/9 y 26/10. La siembra de maíz se realizó entre 1/11 y 30/12 con una sembradora Semeato de cinco hileras a una densidad de 72.000 semillasha⁻¹.

Anualmente se midió rendimiento en grano de maíz en kg ha⁻¹ tomando submuestras, cada una de 8 m².

3.2 CONSTRUCCIÓN DE BASE DE DATOS

Se agruparon la información de todo el período en estudio, ordenándola según las categorías: año, bloque, tratamiento, grupo funcional de CS y dosis de nitrógeno. Grupo funcional agrupa tres tipos de tratamientos: gramíneas, leguminosas y barbecho. Se cargó información referente a los CS: fecha de siembra, fecha de supresión; y del cultivo de maíz: fecha de siembra y fecha de floración. En los años en que no se disponía de registros de la fecha de floración, se estimó que esta ocurría 60 días después de la siembra, teniendo en cuenta que se trata de una variedad de ciclo intermedio.

El clima fue obtenido a partir de la estación meteorológica de la EEMAC. Se relevaron un total de 7 variables climáticas durante un periodo de 13 años. Para las variables de precipitación acumulada (PP_Total), temperatura promedio (Tx), radiación acumulada (Rad_Total), temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin), se seleccionó el período comprendido entre noviembre y marzo, debido a que durante este lapso se abarca todo el ciclo del cultivo de maíz. Para precipitación en período crítico (PP_PC), se consideraron las precipitaciones acumuladas en torno a la floración (± 15 días). Para precipitación acumulada en el período de barbecho (PP_BB), se determinaron las precipitaciones acumuladas entre la fecha de supresión del CS y de siembra del cultivo de renta.

Con el rendimiento según la dosis de fertilización y con la dosis de fertilizante se determinó la Eficiencia Agronómica del Nutriente Aplicado (EA) para evaluar cómo CS pudieron influir en la eficiencia de uso del nitrógeno. La EA se define como el incremento en el rendimiento del cultivo por unidad de nutriente aplicado. Dónde:

$$EA = (Y - Y_0) / F$$

Y es el rendimiento del cultivo con la aplicación del fertilizante.

Y₀ es el rendimiento del cultivo sin fertilizante (control).

F es la cantidad de fertilizante aplicado en kg ha⁻¹.

Para facilitar la discusión de los resultados, se clasificaron los años como "Bueno" o "Malo". El criterio utilizado fue compara la media de cada año con el rendimiento promedio histórico de toda la serie. Si el rendimiento anual fue superior al promedio, el año se caracterizó como "Bueno", y si fue inferior, como "Malo". A su vez, para la discutir los resultados en el contexto de chacras nuevas y viejas, se utilizó el siguiente criterio: "chacra nueva" para el período de los primeros cuatro años de la serie y "chacra vieja" abarcó los 9 años restantes de la serie.

Con el fin de obtener un análisis más objetivo, se realizó una comparación basada en rendimientos relativos (RR), lo que permitió identificar el mejor tratamiento independientemente del efecto del año. Los rendimientos se agruparon por tratamiento y nivel de aplicación de nitrógeno para cada año, y se calculó el rendimiento relativo, tomando como base 100 a la unidad experimental con mayor rendimiento en ese año y luego se hizo el promedio de las unidades experimentales de cada bloque para así obtener el valor de RR que se ingresó al análisis estadístico. Este análisis se realizó por

separado para los tratamientos con 0 y 50 kg N ha⁻¹. Posteriormente se realizó un análisis estadístico mediante un modelo lineal para obtener las medias de cada grupo funcional y para cada año. Se graficaron las medias para toda la serie de años y se generó la ecuación de la línea de tendencia.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.3.1 Limpieza de base datos, ANAVA y p-valor

El análisis estadístico fue realizado utilizando el software R, versión 4.4.0. A continuación, se describen los distintos procedimientos estadísticos y modelos aplicados a las variables de estudio, con el fin de evaluar el rendimiento del cultivo de maíz en función de diferentes cultivos de servicio y niveles de nitrógeno. Se trabajó con dos conjuntos de datos: uno correspondiente al rendimiento absoluto y otro relacionado con el RR.

Se realizaron análisis exploratorios iniciales con gráficos de violín para visualizar la distribución de la variable de respuesta (Rendimiento y RR) en función de los niveles de Nitrógeno y Año. Este análisis permitió una comprensión inicial de la dispersión y la simetría de los datos, facilitando la identificación de posibles patrones asociados a los tratamientos.

Para el análisis específico por año, se ajustó un modelo lineal mixto para evaluar el efecto de la interacción entre tipo de cultivo de servicio (CS) y el nivel de fertilización nitrogenada (Nitrógeno) sobre el rendimiento de maíz. Se consideraron como efectos aleatorios la variable Bloque y como efectos fijos el CS y su nivel de fertilización. El modelo fue ajustado:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_k + CS_i + (CS * Bloque)_{ik} + N_j + (CS * N)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

μ : media general.

β_k : efecto aleatorio del bloque k.

CS_i : efecto fijo del cultivo de servicio (parcela grande).

$(CS * Bloque)_{ik}$: error A, o variación entre parcelas grandes dentro del mismo bloque.

N_j : efecto fijo del nitrógeno (parcela chica).

$(CS * N)_{ij}$: interacción CS \times Nitrógeno.

ε_{ijk} : error B o error residual (dentro de cada subparcela).

Se realizó un análisis de varianza (ANAVA), lo que permitió determinar la significancia de los efectos de los tratamientos y la interacción entre las variables de CS y Nitrógeno.

Se obtuvieron las medias ajustadas para los diferentes niveles de CS y Nitrógeno, así como para su interacción. Para este análisis, se utilizó el paquete emmeans, aplicando un nivel de confianza del 95%. Posteriormente, se realizaron comparaciones múltiples utilizando el método de Tukey, implementado a través de la función `clid()` del paquete `multcompView`. Estas comparaciones permitieron identificar diferencias significativas entre los tratamientos de CS, los niveles de Nitrógeno y su interacción. Los resultados de estas comparaciones fueron visualizados mediante gráficos de barras, en los cuales se representan las medias ajustadas junto con sus errores estándar y las letras de significancia, que indican los grupos que no presentaban diferencias significativas entre sí.

Se llevó a cabo un diagnóstico de los residuos del modelo para verificar los supuestos de homogeneidad de varianza y normalidad de los errores. Para ello, se generaron gráficos de residuos frente a valores ajustados con el fin de evaluar visualmente la homogeneidad de la varianza, y gráficos Q-Q (cuantil-cuantil) para analizar la normalidad de los residuos. Adicionalmente, se construyó un histograma de los residuos para evaluar su distribución. No se utilizaron pruebas formales ya que el diagnóstico fue principalmente visual. Estos análisis permitieron confirmar que el modelo ajustado cumplía de manera adecuada con los supuestos básicos de los residuos.

3.3.2 Análisis de Regresión del Rendimiento Relativo (RR)

Para el ajuste del modelo de regresión se realizó un análisis adicional para evaluar las tendencias del rendimiento relativo (RR) del maíz en función de los grupos funcionales (Grupo Funcional) y el año (Año Relativo). Se ajustó un modelo lineal, que incluyó interacciones entre Grupo Funcional y Año Relativo, así como el efecto de Bloque. Este modelo evalúa cómo varía RR según el grupo funcional y el año relativo, además de considerar el efecto del bloque experimental.

El modelo fue:

$$RR_{ijk} = \mu + GF_i + A_j + (GF * Año)_{ij} + B_k + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

RR_{ijk} : rendimiento relativo observado para grupo funcional i, año j, bloque k

μ : media general.

GF_i : efecto del grupo funcional del cultivo de servicio (Gramínea, Leguminosa, Barbecho)

A_j : efecto del año relativo (de 1 a 13)

$(GF * Año)_{ij}$: interacción entre grupo funcional y año relativo

B_k : efecto del bloque

ε_{ijk} : error residual (variación no explicada por el modelo)

A continuación, se generaron gráficos de residuos frente a valores ajustados para verificar la homogeneidad de la varianza y la presencia de posibles outliers. Además, se identificaron aquellos residuos con desviaciones superiores a tres veces la desviación estándar, los cuales fueron analizados en detalle para detectar errores en los datos.

Se realizó un análisis de varianza (ANAVA), lo que permitió determinar la significancia de los factores, Grupo funcional indica si el rendimiento varía entre los grupos funcionales, Año relativo, indica si hay una tendencia en el tiempo y también la interacción entre estos factores que indica si la tendencia en el tiempo varía según los grupos funcionales.

Para la realización de tendencias temporales y comparación de medias ajustadas se utilizaron estas últimas para evaluar las diferencias entre los grupos funcionales a lo largo del tiempo. Estas medias ajustadas se visualizaron a través de gráficos de puntos que mostraban las tendencias del rendimiento relativo a lo largo de la serie de años (13 años). Además, se ajustaron líneas de regresión para cada grupo funcional.

Los desvíos estándar del rendimiento relativo se calcularon para cada combinación de Grupo Funcional y Año Relativo, y se incorporaron en los gráficos de puntos mediante barras de error. Esto permitió una visualización más precisa de la incertidumbre en las estimaciones de las medias ajustadas.

3.4 Hipótesis agronómicas

- El rendimiento de cultivo de Maíz es afectado por al menos uno de los CS.
- Hay respuesta en el rendimiento del cultivo de maíz al agregado de Nitrógeno en V6.
- El efecto de edad de chacra por su historia agrícola genera una respuesta diferencial en el efecto del cultivo de servicio y el agregado de N en el rendimiento de maíz.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Durante el período en estudio existió una amplia variabilidad climática explicada por las precipitaciones del período noviembre a marzo ($PP_Total = 819 \pm 345$ mm) y aún más por las precipitaciones en periodo crítico ($PP_PC = 224 \pm 178$ mm). Lo cual muestra que existió una amplia variedad de condiciones climáticas para la formación de rendimiento del cultivo de maíz (Tabla 3). En este sentido los años clasificados como “Bueno”, donde el rendimiento en grano fue más alto que el promedio, la media de las PP_PC fue de 291 mm, mientras que en años de clasificados como “Malo” estas fueron de 146 mm.

Tabla 3

Caracterización climática de la serie 2007 a 2019: Resumen para años buenos y malos

Año	PP_Total	PP_PC	Rad_Total	Tx	Tmax	Tmin	PP_BB
	mm	mm	MJ/m ²	°C	°C	°C	mm
2007	389	63	3059	23	30	16	72
2008	682	250	3695	24	30	17	109
2009	1789	727	3220	23	29	18	504
2010	536	278	3622	23	30	17	82
2011	874	54	3640	23	30	17	47
2012	854	214	3479	22	28	17	381
2013	933	384	3265	23	29	18	289
2014	825	288	3402	23	29	17	175
2015	842	5	3437	23	29	17	155
2016	966	191	3447	23	29	17	135
2017	409	145	3596	23	30	17	133
2018	1012	220	3115	22	28	17	110
2019	533	98	3419	23	28	18	138
Media Bueno	815	291	3415	23	29	17	189
Media Malo	823	146	3415	23	29	17	168
Media histórica	819	224	3415	23	29	17	179
D.S. histórico	345	178	194	0	1	1	128

Nota. D.S. = Desvío estándar. Tomado de S. Alvarez (comunicación personal, 7 de febrero, 2024).

4.2 EFECTO CULTIVO DE SERVICIO Y DOSIS DE NITRÓGENO SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ

Existió un efecto significativo ($p \leq 0,05$) del tratamiento CS sobre el rendimiento de maíz a lo largo de la mayoría de los años analizados con excepción del 2010, 2011 y 2012. Respecto a la dosis de N (0 y 50 kg N ha⁻¹), de los primeros cuatro años solo uno fue significativo (2009) mientras que los siguientes 9 años fueron significativos ($p \leq 0,05$). En cuanto a la interacción entre CS y N (CS-N) solo 3 años (2007, 2013 y 2014) fueron significativos ($p \leq 0,05$).

Tabla 4

Significancia según p-valor para grupo funcional de CS, dosis de nitrógeno y su interacción

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
CS	0,000 *****	0,002 ****	0,000 *****	0,365 NS	0,362 NS	0,659 NS	0,000 *****	0,000 *****	0,000 *****	0,007 ****	0,000 *****	0,004 ****	0,006 ****
N	0,887 NS	0,966 NS	0,000 *****	0,110 NS	0,023 ***	0,000 *****	0,003 ****	0,000 *****	0,081 **	0,011 ***	0,079 **	0,000 *****	0,007 ****
N-CS	0,000 *****	0,610 NS	0,398 NS	0,953 NS	0,236 NS	0,539 NS	0,000 *****	0,000 *****	0,759 NS	0,924 NS	0,076 NS	0,106 NS	0,319 NS

Nota. Nivel Significancia: *****: $p \leq 0,0001$; ****: $p \leq 0,001$; ***: $p \leq 0,01$; **: $p \leq 0,05$; NS: $p > 0,05$.

El efecto CS subraya la importancia del antecesor de invierno para el cultivo de maíz. Dado que el manejo realizado fue el mismo en todas las parcelas, la diferencia entre tratamientos de CS se interpreta como cambios en la dinámica de nutrientes asociado a cambios en la absorción, aporte y reciclaje de nutrientes del suelo que genera la inclusión de diferentes CS o el hecho de mantenerlo en barbecho invernal. En este sentido, las especies de CS gramínea afectaron negativamente el rendimiento de maíz durante prácticamente todo el período en estudio (ver anexo), explicado posiblemente por la alta relación C/N de sus residuos que inmovilizó nitrógeno del suelo afectando su disponibilidad. Este efecto también fue evaluado por Vyn et al. (2000) donde el tratamiento de avena sin aplicación de N al maíz tuvo en promedio un rendimiento de 1000 kg ha⁻¹ menos respecto al barbecho limpio, estos autores relacionan esto a la capacidad de inmovilizar nitrógeno del CS no Leguminosa. En base a esto, Vyn et al. (2000) sugieren que si el objetivo de incluir un CS en la rotación es asegurara la disponibilidad de N para el subsiguiente cultivo de maíz, este CS no debería ser solo de gramíneas.

La baja respuesta a la dosis de N en los primeros años del experimento puede estar explicada por el N residual de la pastura de Trébol rojo previa al comienzo del experimento. El cual permitió cubrir mayormente la demanda de N del cultivo de maíz. Sin embargo, desde el 2011 en adelante, el agregado de fertilizante nitrogenado se vuelve significativo para todos los años, lo que permite suponer una pérdida en la capacidad de suministro de N del suelo en la medida que se pasa a un sistema de agricultura continua. Estos resultados son similares a los obtenidos por Ernst et al. (2018) para trigo en secuencias de monocultivos de soja.

Solo en tres años la interacción entre un tipo particular de CS con la dosis de N tuvo un impacto relevante en la variable de respuesta. Lo cual sugiere que, con la dosis planteada, son bajas las posibilidades de corregir el efecto generado en la disponibilidad de N causada por la inclusión de los CS. Sin embargo, existieron algunas excepciones como el caso del año 2007, donde el CS de Triticale generó el menor rendimiento de maíz cuando este no se fertilizó, sin embargo, al suministrar N, pasó a ser el maíz de mayor rendimiento (ver Figura A1 del anexo).

Al agruparlo según grupo funcional, se revelan patrones importantes sobre su efecto en el cultivo de maíz bajo diferentes condiciones (Tabla 5). El rendimiento promedio general para todos los tratamientos fue de $4.327 \pm 1.138 \text{ kg ha}^{-1}$. Con una media para los años buenos y malos de 5.291 y 3.202 kg ha^{-1} , respectivamente. Para los grupos funcional, leguminosa, gramínea y barbecho, fue de 4.841 ± 1.002 , 3.477 ± 1.246 y $4.662 \pm 1.086 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente. Al comparar según la dosis de N, el rendimiento promedio fue de 3.633 y 5.020 kg ha^{-1} para N0 y N50, respectivamente, lo que representa un incremento promedio de 1387 kg ha^{-1} con la aplicación de nitrógeno.

Tabla 5

Rendimiento maíz (kg ha^{-1}) según grupo funcional y dosis de nitrógeno.

Año	Tipo	Leguminosa		Gramínea		Barbecho		Promedio	Desvío
		N 0	N50	N 0	N 50	N 0	N 50		
2007	Bueno	5.275	5.345	3.781	5.605	4.915	5.218	5.023	591
2008	Bueno	4.845	4.392	4.830	5.634	7.815	7.155	5.779	1.275
2009	Bueno	5.992	8.550	2.219	3.260	7.849	8.540	6.068	2.521
2010	Bueno	4.967	6.127	4.314	5.478	5.053	6.441	5.397	719
2011	Malo	2.664	3.353	2.152	3.051	3.220	4.844	3.214	830
2012	Malo	2.583	5.474	2.127	4.379	2.473	4.315	3.559	1.231
2013	Bueno	7.335	7.896	3.496	6.583	4.611	7.276	6.199	1.597
2014	Malo	3.470	4.859	1.975	2.264	2.355	3.804	3.121	1.020
2015	Malo	2.508	3.103	835	1.718	1.950	3.032	2.191	792
2016	Bueno	4.353	6.279	2.689	5.152	3.007	4.598	4.346	1.224
2017	Bueno	3.894	5.557	2.414	4.927	2.883	5.674	4.225	1.262
2018	Malo	3.183	4.209	2.067	2.739	2.211	3.607	3.003	755
2019	Malo	3.840	5.801	2.430	4.283	3.130	5.259	4.124	1.159
Promedio Bueno		5.237	6.306	3.392	5.234	5.162	6.415	5.291	794
Promedio Malo		3.041	4.467	1.931	3.072	2.557	4.143	3.202	639
Promedio histórico		4.224	5.457	2.718	4.237	3.959	5.366	4.327	1.289

Nota. La columna tipo indica el si el promedio de rendimiento de maíz del año se encuentra por encima (Bueno) o debajo (Malo) de la media.

En cuanto al tratamiento de leguminosa, el rendimiento promedio en los años analizados fue de 4.224 y 5.457 kg ha⁻¹ para N0 y N50, respectivamente. Esto representa un incremento de 1.233 kg ha⁻¹ con la aplicación de nitrógeno, lo cual sugiere una mejora en el rendimiento con el uso de nitrógeno. En los años considerados buenos, el rendimiento promedio tuvo un incremento de 1069 kg ha⁻¹ por el agregado de N, mientras que en los años malos hubo un incremento de 1426 kg ha⁻¹. Esto refleja que, en los años buenos la diferencia de rendimiento con y sin agregado de nitrógeno es menor.

Para el tratamiento con gramínea, el rendimiento con y sin agregado muestra una diferencia de 1.519 kg ha⁻¹. Esta diferencia es mayor respecto a los otros 2 tratamientos. En los años buenos, los rendimientos con aplicación de nitrógeno fueron 1842 kg ha⁻¹ superiores respecto al N0. Sin embargo, en años malos, los rendimientos fueron 1141 kg ha⁻¹ mayores con la aplicación de N. En comparación con años buenos la respuesta al agregado de N es menor, probablemente debido a un menor potencial de rendimiento del cultivo en esos años. Para este caso de la gramínea los resultados obtenidos en cuanto a respuesta al agregado de N son congruentes con lo esperado.

En el tratamiento de barbecho, la diferencia por el agregado de N fue de 1.407 kg ha⁻¹ superior. Durante los años buenos, la diferencia en rendimiento por el agregado de N fue de 1253 kg ha⁻¹, mientras que en los años malos esta diferencia fue de 1586 kg ha⁻¹.

Además, en el primer año de la serie, la baja variabilidad podría estar vinculada al efecto antecesor del trébol rojo, el cual aporta nitrógeno al suelo haciendo este menos limitante, este efecto del antecesor fue reportado por (Flynn & Idowu, 2015).

Por otro lado, en el año 2009 se registraron rendimientos promedio más altos, pero con una variabilidad considerablemente mayor, el rendimiento promedio fue de 6.068 kg ha⁻¹, pero con una desviación de 2521 kg ha⁻¹. Esa gran variabilidad está explicada por el desempeño del maíz sobre antecesores de CS gramínea. Puede deberse a un efecto de competencia por recursos como nitrógeno y agua. Asimismo, por el efecto de la inmovilización de nutrientes por parte del CS gramínea el cuál pudo tener una gran biomasa y tener una lenta descomposición, respecto a un CS leguminosa. Lo que conlleva a una menor disponibilidad de nutrientes en el momento de mayor demanda por parte del CR.

4.3 ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA AGRONÓMICA DE NITRÓGENO EN LA SERIE 2007-2019

A lo largo de los años analizados, la eficiencia agronómica (EA) entre los tres tipos de tratamientos (leguminosa, gramínea y barbecho), fue en promedio de 25 kg grano kg N⁻¹ para leguminosas, 30 kg grano kg N⁻¹ para gramíneas y 28 kg grano kg N⁻¹ para barbecho limpio, con desviaciones de 19,3, 17,3 y 18,6 respectivamente. En cuanto a la EA por tipo de año, se ve que no hay grandes diferencias ya que en ambos tipos de año fue de 28 kg grano kg N⁻¹. Estos resultados se encuentran dentro del rango descrito por Dobermann (2007) para una chacra bien manejada con niveles bajos de fertilización nitrogenada.

Tabla 6*Eficiencia agronómica de nitrógeno por tratamiento y caracterización de año*

Año	Tipo	Leguminosa	Gramínea	Barbecho	Promedio	Desvío
		EA	EA	EA		
2007	Bueno	1,4	36,5	6	15	16
2008	Bueno	0	16,1	0	5	9
2009	Bueno	51,2	20,8	13,8	29	16
2010	Bueno	23,2	23,3	27,8	25	2
2011	Malo	13,8	18	32,5	21	8
2012	Malo	57,8	45	36,8	47	9
2013	Bueno	11,2	61,7	53,3	42	22
2014	Malo	27,8	5,8	29	21	11
2015	Malo	11,9	17,7	21,6	17	4
2016	Bueno	38,5	49,3	31,8	40	7
2017	Bueno	33,3	50,3	55,8	46	10
2018	Malo	20,5	13,4	27,9	21	6
2019	Malo	39,2	37,1	42,6	40	2
Promedio Bueno		21	37	25	28	8,3
Promedio Malo		29	23	32	28	4,6
Promedio histórico		25	30	28	28	2,5

En años buenos, la EA promedio para leguminosa fue de 21 kg grano kg N⁻¹, lo que está por debajo del promedio general. Esto indica que, si bien los rendimientos en estos años fueron altos, la EA fue relativamente menor. Esto se ajusta a lo evidenciado por Alvarez et al. (2023) quienes sugieren que, en años de alto potencial de rendimiento para el cultivo de maíz, podría existir un gran desarrollo del CS leguminosa lo cual permitiría un aporte de N por FBN que disminuye la demanda de N por fertilización. En el caso de las Gramíneas, la EA fue de 37 kg grano kg N⁻¹, superior al promedio general. Esto indica que, en años favorables, aumenta la demanda de N por parte del CS y CR. Esto puede deberse a la mayor inmovilización por el rastrojo. Mientras que para el tratamiento BB, la EA fue de 25 kg grano kg N⁻¹, un valor inferior al promedio general de este tratamiento.

En años malos, la EA para leguminosa aumentó a 29 kg grano kg N⁻¹, superando tanto el promedio general como el de los años buenos. Esto sugiere que, en condiciones menos favorables, el N tuvo un impacto más significativo en la producción de grano. Un posible motivo podría ser que, en estos años de menor potencial para el maíz, también lo fue para el desarrollo del CS, por lo que la leguminosa pudo aportar menos nitrógeno al maíz debido a una menor FBN, lo que hizo que el N aplicado fuera más importante para sostener los rendimientos. Para el caso de las gramíneas la EA descendió a 23 kg

grano kg N^{-1} , lo que es inferior a la EA registrada en años buenos. Esto sugiere que, en condiciones menos favorables el maíz bajo este tratamiento tiene una capacidad más limitada para aprovechar el N. Mientras que, para el BB la EA para barbecho se incrementó a $32 \text{ kg grano kg N}^{-1}$, lo que supera tanto la media general como los valores observados en años buenos. Esto indica que, en condiciones más limitadas, el nitrógeno aplicado tendría en promedio una mayor eficiencia, probablemente porque el barbecho no aporta nutrientes adicionales al suelo como lo haría un cultivo de servicio.

En resumen, haciendo referencia a la Tabla 5 y 6, podemos determinar las siguientes conclusiones. El tratamiento gramíneo muestra la mayor eficiencia en años buenos, mientras que la leguminosa y el barbecho tienden a ser más eficientes en años malos. En los primeros años de la serie la EA no varía mucho, esto puede deberse en parte al efecto del antecesor de trébol rojo. Por ejemplo, en el año 1 la gramínea fue la única que tuvo diferencia en el rendimiento con y sin N, se puede ver también que es la que tiene mayor EA, por otro lado en el segundo año las EA son bajas, especialmente en Leguminosa y Barbecho, pudiéndose deber a la gran disponibilidad de N en suelo ya que este tuvo más tiempo para mineralizar el N proveniente del trébol. En gramíneas las EA altas se relacionan con rendimientos altos, mientras que en leguminosas no se da esta tendencia tan marcada.

4.4 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO AISLANDO EL EFECTO CLIMA A TRAVÉS DEL RENDIMIENTO RELATIVO

La figura a continuación muestra el rendimiento relativo en porcentaje de tres tratamientos a lo largo de la serie de años, comparando dos niveles de fertilización con y sin agregado. La gráfica superior (A) corresponde a la condición sin fertilización N_0 , mientras que la inferior (B) corresponde a la adición de N_{50} .

En la condición de N_0 , las funciones lineales para cada tratamiento se expresan de la siguiente manera:

- Barbecho: $y = 87.22 - 3.6x$

- Gramínea: $y = 53.44 - 1.2x$

- Leguminosa: $y = 72.93 - 0.2x$

Para la condición de N_{50} , las funciones lineales son:

- Barbecho: $y = 60.05 - 0.97x$

- Gramínea: $y = 61.51 + 1.9x$

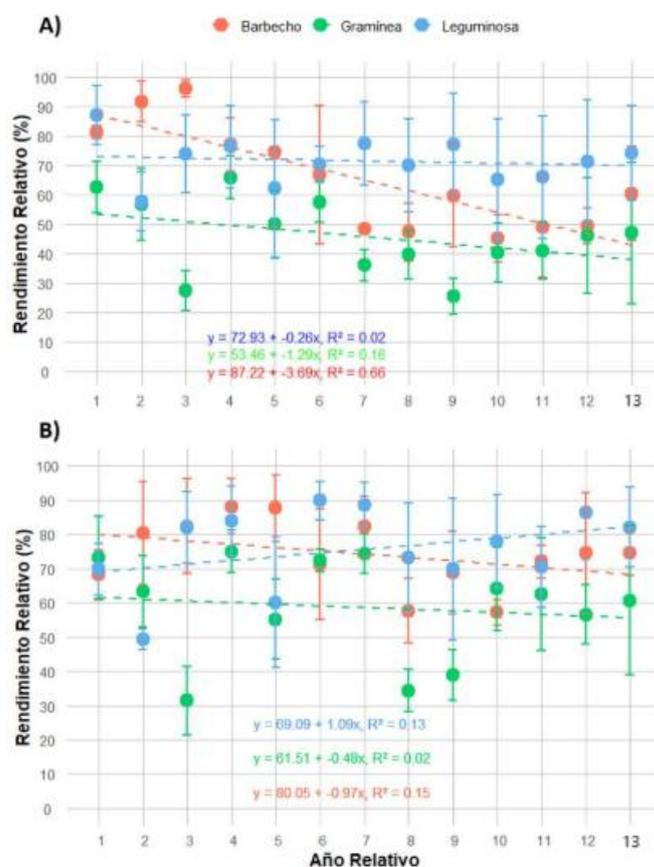
- Leguminosa: $y = 69.09 + 1.0x$

En estas ecuaciones, el intercepto representa el RR inicial o máximo estimado para cada categoría en el primer año de tratamiento, lo que sugiere un techo en el RR. La pendiente (b) de la recta indica la variación anual del RR, a medida que avanzan los años de la serie. Un valor negativo en la pendiente refleja una disminución en el rendimiento a lo largo del tiempo, mientras que una pendiente positiva indica una

tendencia al alza. En el caso sin fertilización, se observa una disminución en el rendimiento para todos los tratamientos, siendo más pronunciada en el Barbecho. Sin embargo, en la condición de N50, los tratamientos Barbecho y Gramínea siguen mostrando una ligera caída, esta es menos pronunciada, mientras la Leguminosa presenta tendencias de aumento en su rendimiento relativo con el tiempo.

Figura 1

Rendimiento relativo de maíz con distintos CS y fertilización en 13 años



Nota. A) sin agregado de nitrógeno N0 y B) con agregado de nitrógeno N50

En el caso de la figura (a), el tratamiento de Barbecho se destaca inicialmente como el que presenta el mejor rendimiento relativo (RR), alcanzando un 87% al inicio del experimento en sincronía con lo evidenciado en trabajos de Siri-Prieto y Ernst (2012). Esta ventaja inicial puede atribuirse a varios factores: el efecto del antecesor de trébol rojo, que posiblemente dejó un suelo con buen aporte de nitrógeno. Otro factor puede ser la ausencia de cultivos que compitan por nutrientes y agua durante el barbecho, lo que maximiza la disponibilidad de recursos para el cultivo subsiguiente. Además, el hecho de tratarse de una chacra nueva, con su mayor capacidad de aporte de nutrientes, pudo haber potenciado estos resultados iniciales en concordancia con lo evidenciado por Ernst et al. (2018). Sin embargo, a lo largo del tiempo, BB muestra una tendencia negativa pronunciada, con una pérdida anual de rendimiento del 3,7%, la más alta entre todos los tratamientos. Esta caída se relaciona con el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, entre ellas la disminución de nitrógeno, que se pierde por extracción en grano. Para el caso del grano de maíz, tomando en cuenta una concentración de proteína Cruda de 10 % y considerando un factor de conversión de

PC a nitrógeno de 6,25, esto determinaría una extracción de nitrógeno en grano de 80 kg N ha⁻¹ por año en una situación de Barbecho. Según lo evidenciado por Ernst et al. (2018) podría deberse a un deterioro en las propiedades físicas del suelo, como la compactación y la pérdida de porosidad, lo que reduce la capacidad de absorción y disponibilidad de agua (CAAD) para el cultivo de maíz. Además, Wang et al. (2021) afirma que la ausencia de cobertura durante el invierno incrementa la escorrentía en relación con la infiltración, lo cual genera mayor erosión laminar, contribuyendo a la pérdida de carbono orgánico en el suelo y de rendimiento en el largo plazo.

El tratamiento con Leguminosa, que inicia con un RR del 73%, representa un comportamiento intermedio en comparación con BB y el tratamiento con Gramínea. A lo largo de la serie, este tratamiento se destaca por su sostenibilidad, presentando la menor tasa de pérdida de rendimiento anual (0,26%). Esta estabilidad se debe en gran parte al servicio ecosistémico de fijación biológica de nitrógeno (FBN) proporcionado por la leguminosa, que permite mantener el rendimiento sin la necesidad de fertilización externa lo cual se ajusta con lo evidenciado por Pott et al. (2021). A partir del cuarto año, este servicio ecosistémico se hace más evidente, equiparando el RR de la Leguminosa con el de BB. Además, la menor relación C/N de la Leguminosa facilita una descomposición más rápida del rastrojo, liberando nutrientes de manera más eficiente. Respecto a BB este tratamiento podría tener menores pérdidas por evaporación y escorrentía, al tiempo que mejora la infiltración del agua, también este CS logra aumentar la productividad de MS del cultivo de maíz lo cual aporta mas CO al suelo.

Por su parte, el tratamiento con Gramínea inicia con el menor RR, un 53%, posiblemente debido a la alta inmovilización de nitrógeno. A pesar de esto, la gramínea presenta una pérdida de rendimiento intermedia del 1,29% anual, lo que la sitúa entre los otros dos tratamientos en términos de sostenibilidad. Esta pérdida de rendimiento coincide con la descrita por Álvarez et al. (2017) donde sugieren que un CS no leguminosa tiene una tendencia a disminuir el rendimiento en un 8% comparado con un barbecho. Según lo sugerido por Marcillo y Miguez (2017) esta pérdida moderada puede explicarse por la mejora en las propiedades físicas del suelo a largo plazo, gracias al aporte de biomasa y carbono. Alvarez et al. (2023), sostienen que este tratamiento es el que a priori tendría menor pérdida de erosión por su gran producción de biomasa y relativamente lenta descomposición también por el efecto de las raíces en la estructura del suelo. El cual debido a su rápido crecimiento genera una rápida cobertura del suelo, de esta manera el suelo queda protegido frente a la erosión y la pérdida de agua por evaporación.

Mientras que en la figura (b), los resultados sugieren que la adición de nitrógeno mejora la estabilidad del sistema, evidenciada por pendientes menos pronunciadas en las tasas de pérdida de rendimiento en comparación con la situación sin fertilización (N0). Esto subraya la importancia del nitrógeno como un factor limitante clave en la producción de maíz, especialmente debido a la alta demanda de este nutriente por parte del cultivo.

En el tratamiento de Barbecho (BB), se observa un rendimiento relativo (RR) inicial del 80%, el cual es superior al de los tratamientos con Gramínea y Leguminosa. Además, este rendimiento relativo en barbecho es menor que para barbecho en N0 lo que puede deberse a que la chacra es nueva y el suelo tenía buen aporte de N en los

primeros años. Sin embargo, a partir del quinto año, el RR del tratamiento con BB empieza a ser superado por el tratamiento con Leguminosa. Vemos que este comportamiento se “retrasa” un año respecto a N0 debido al aporte de N mediante fertilización. A partir del quinto año de la serie el nitrógeno residual del trébol rojo, utilizado como antecesor, ya no es suficiente para mantener el rendimiento del maíz. La tasa de pérdida de rendimiento en BB es de 0,97% anual, la más alta entre los tratamientos, lo que indica una disminución gradual en la productividad a lo largo del tiempo, a pesar del aporte externo de nitrógeno. Sin embargo, esta tasa de pérdida es 2.7% menor a la situación sin nitrógeno, esto podría deberse además del efecto del nitrógeno, al mayor rendimiento del cultivo de maíz el cual aporta mayor volumen de rastrojo al suelo, aumentando los niveles de carbono orgánico. En la serie de años, en el tratamiento BB, donde se aplicó nitrógeno se obtuvo un rendimiento extra de 1404 kg ha⁻¹ respecto al tratamiento sin fertilización. Considerando un índice de cosecha de 40% se corresponde con 2113 kg ha⁻¹ de rastrojo. En base a los descrito por Thelen (2021), el maíz contiene aproximadamente un 40% de carbono, por lo tanto, se estarían aportando 845 kg CO ha⁻¹ al suelo por el agregado de nitrógeno al maíz. Lo cual se corresponde con un aporte extra al sistema de 10.990 kg CO ha⁻¹ en el total de la serie de años.

El tratamiento con Leguminosa muestra un rendimiento inicial del 69%, que es intermedio en comparación con los otros tratamientos. Sin embargo, este tratamiento se destaca por ser el único que presenta una tendencia positiva en el rendimiento relativo, con una tasa de ganancia anual de 1,09%. Este comportamiento puede atribuirse a la combinación del aporte de nitrógeno por fijación biológica de la leguminosa y la fertilización externa. Al final de la serie, el tratamiento con Leguminosa logra superar en rendimiento relativo a los otros tratamientos, coincidiendo con el trabajo realizado por Ernst (2006) en donde los CS leguminosas generaron mayores rendimientos en el cultivo de maíz, esto puede ser explicado por su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo gracias a la FBN, y su baja relación C/N que le permite aportar N por mineralización rápidamente, logrando sincronizar el aporte con la demanda del CR de este nutriente. Logrando incluso aumentar levemente la productividad del maíz a largo plazo, se hace notorio el servicio ecosistémico brindado por este tratamiento en el aporte de N.

Por otro lado, el tratamiento con Gramínea inicia con el menor RR, de 61,5%, lo cual podría deberse a la inmovilización de nitrógeno del rastrojo en CS Gramínea lo que disminuye la disponibilidad de este para el maíz, esto fue reportado en trabajos de Sawchik (2001). En el año inicial, la Gramínea con nitrógeno es el único que muestra un RR mayor en relación con los tratamientos sin agregado de nitrógeno. Lo que indica un mayor consumo de nitrógeno por parte de la gramínea. Este mayor consumo de nitrógeno puede haber reducido los niveles de este nutriente en el suelo, limitando el rendimiento del maíz. A lo largo de la serie, la gramínea muestra una tasa de pérdida de rendimiento de 0,48% anual, un comportamiento similar al observado en el escenario sin fertilización, aunque con una menor tasa de pérdida de rendimiento 1% menos, lo que sugiere que el aporte externo de nitrógeno ayuda a mitigar la disminución del rendimiento. A pesar de esto, al final de la serie, el tratamiento con Gramínea tiene el menor rendimiento relativo, lo que indica que, aunque la gramínea ofrece cierta estabilidad, no es suficiente para mantener un rendimiento alto sin la adición continua

de nitrógeno. Este resultado también fue demostrado en el trabajo realizado por Restovich et al. (2012) donde en los años 2005 a 2010 el rendimiento luego de un CS gramínea fue menor al resto de los CS, estos autores explican esto debido al contenido de $\text{NO}_3\text{-N}$ a la siembra el cual es inversamente proporcional a la relación C/N al momento de suprimir el CS. Por lo tanto, obtuvieron un menor rendimiento del cultivo de maíz al incrementar la relación C/N del CS predecesor.

En el análisis final, aunque la gramínea tiene el menor rendimiento relativo al final de la serie, la tendencia negativa más pronunciada de BB sugiere que, a largo plazo, el RR de BB podría caer por debajo del de la Gramínea debido al deterioro progresivo de las propiedades físicas del suelo, siendo esta tendencia más abrupta en el caso de la figura (a), las gramíneas tienen la capacidad de mantener y mejorar las propiedades físicas del suelo como lo sugieren Essman y Legleiter (2012), esto se debe a su sistema radicular profundo y fibroso. El tratamiento de BB, a pesar de su buen rendimiento inicial, muestra ser insostenible a largo plazo, con una marcada disminución en el rendimiento del maíz, atribuida principalmente al deterioro de las propiedades del suelo, entre estas el CO del suelo ya que no existe un aporte de este durante el invierno, Milesi Delaye et al. (2014) mediante una simulación estiman que un CS invernal aporta entre 2.3 y 3.1 t C ha⁻¹, en el caso del BB limpio este aporte no existiría, contribuyendo a disminuir el stock de CO del suelo. El tratamiento con Gramínea, aunque presenta una disminución moderada en el rendimiento, no es suficiente para mantener la fertilidad del suelo sin la adición de nitrógeno. Por otro lado, el tratamiento con Leguminosa se muestra como la opción más estable y sostenible en ambas condiciones de fertilización, gracias a su capacidad para fijar nitrógeno y mantener un rendimiento relativamente estable a lo largo del tiempo.

4.5 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO SEGÚN CONDICIÓN DE CHACRA

El análisis de rendimiento en la serie de años estudiada muestra una disminución progresiva en la productividad de maíz, lo que sugiere la necesidad de diferenciar entre dos condiciones productivas: “chacra nueva” y “chacra vieja”. Se observó que las diferencias en rendimiento se acentúan a medida que el sistema evoluciona de una chacra nueva a una chacra vieja. Por ello, se decidió realizar un análisis separado para ambas condiciones, permitiendo evaluar con mayor precisión el impacto del manejo agronómico en cada contexto productivo.

Para la condición de chacra nueva se observa tanto para los tratamientos con fertilización como los que no se fertilizan, que el tratamiento Barbecho logra los mayores rendimientos (5770, DS +/- 2015 kg ha⁻¹) con N0 y (6439, DS +/-1491 kg ha⁻¹) para N50. Estos rendimientos se relacionan con los obtenidos por Čupina et al. (2017), quienes lograron rendimientos inferiores del maíz proveniente de CS de gramínea y leguminosa con respecto al barbecho limpio. Sin embargo, para BB bajo condición de chacra vieja, los rendimientos fueron 2827 DS +/- 828 kg ha con N0. Mientras que para N50 fue 4696 DS +/- 1354 ha⁻¹.

En la condición de chacra vieja el sistema más degradado debido a los años bajo agricultura tuvo una mayor respuesta al CS leguminosa, logrando los mayores rendimientos para ambos niveles de fertilización, (3895, DS +/- 1529 kg ha⁻¹) sin fertilización y cuando se agregó N este pasó a ser de (5397 DS +/- 1423 kg ha⁻¹).

Tabla 7*Rendimientos bajo el concepto de chacra nueva y chacra vieja*

Chacra nueva			
Tratamiento	Rendimiento absoluto kg ha ⁻¹	Desvío estándar kg ha ⁻¹	Rendimiento Relativo %
<i>Dosis 0 N</i>			
Barbecho	5.770	2.016	100
Gramínea	3.459	1.221	60
Leguminosa	4.748	1.248	82
<i>Dosis 50 N</i>			
Barbecho	6.439	1.497	100
Gramínea	4.606	1.327	72
Leguminosa	5.553	1.971	86
Chacra vieja			
Tratamiento	Rendimiento absoluto kg ha ⁻¹	Desvío estándar kg ha ⁻¹	Rendimiento Relativo %
<i>Dosis 0 N</i>			
Barbecho	2.827	828	73
Gramínea	2.254	749	58
Leguminosa	3.896	1.530	100
<i>Dosis 50 N</i>			
Barbecho	4.696	1.354	87
Gramínea	4.006	1.642	74
Leguminosa	5.397	1.423	100

Los resultados son congruentes con lo reportado por Ernst et al. (2018), en situaciones de chacra nueva, donde el suelo tiene una mayor capacidad de aporte de nutrientes debido al efecto residual de la pradera, se ven mayores rendimientos en los tratamientos de Barbecho ya que este permite una mayor mineralización y liberación de los nutrientes. Por lo que el efecto positivo de la leguminosa y gramínea no se hacen notorios mientras que en situaciones de suelo degradado el tratamiento Leguminosa fue el más destacado lo que sugiere que en sistemas más degradados este tratamiento es capaz de mantener rendimientos altos, gracias a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico. En contraste, el tratamiento de gramínea mostró los menores rendimientos en ambas condiciones de chacra, esto indica una gran dependencia de nitrógeno externo por parte de este cultivo, también debido a su alta relación C/N que inmoviliza nitrógeno. Este efecto es más marcado bajo condición de chacra vieja. En condición de chacra nueva tuvo un incremento de 1146 kg ha⁻¹ por el agregado de N, mientras que en chacra vieja este fue mayor, con 1751 kg ha⁻¹.

Se puede observar que, bajo condiciones de chacra vieja sin agregado de nitrógeno, se pierden en promedio 1667 kg ha⁻¹ en comparación con chacra nueva. Existen tratamientos como el caso del CS leguminosa el cual tuvo un mejor comportamiento frente a estas condiciones de chacra degradada, este perdió 853 kg

ha⁻¹ por otro lado, el CS gramínea tuvo un comportamiento intermedio perdiendo 1205 kg ha⁻¹. El tratamiento que tuvo peor desempeño fue Barbecho con una pérdida de 2943 kg ha⁻¹. Esto significa que la leguminosa es el tratamiento que menos rendimiento pierde en el largo plazo ante situaciones de cero agregados de N lo cual coincide con Giacomini et al. (2004) quienes describen una superioridad en rendimiento de las leguminosas del 74% frente a Barbecho.

Analizando los rendimientos a través de la serie de años se destaca que el tratamiento con leguminosas fue el que mantuvo mayores rendimientos en kg ha⁻¹ y también el que tuvo una menor dependencia del aporte de nitrógeno por fertilización logrando mantener altos rendimientos en ambos niveles de fertilización. Se puede estimar el aporte de N por FBN en toda la serie de años basándose en la producción acumulada de biomasa a la cual se le estima el contenido de nitrógeno, siendo este aporte de 68 kg N año⁻¹ valor comparable con lo reportado por Pinto et al. (2021). En el largo plazo se corresponde a 887 kg N en el periodo de 13 años.

5 CONCLUSIONES

Los CS impactaron significativamente en el rendimiento del maíz a largo plazo por lo que la hipótesis planteada se cumplió en 10 de 13 años de evaluación.

Respecto al agregado de 50 kg de nitrógeno en etapa de V6 del maíz impactó significativamente en su rendimiento para 10 de 13 años de la serie.

Por otro lado, solo se encontró interacción CS-N en 3 de 13 años. Este efecto fue sólo en las gramíneas.

Hay un efecto de la edad de chacra generando respuestas diferenciales en el rendimiento según el CS y nivel N. Se concluye que la fertilización nitrogenada es más relevante en chacras viejas.

El tratamiento con leguminosa demostró ser el más sostenible en términos de rendimiento en el largo plazo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echeverría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos de Uruguay: Tomo I. Clasificación de suelos*. MAP.
- Álvarez, C., Quiroga, A., Santos, D., & Bodrero, M. (2013). *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sustentabilidad de los sistemas de producción*. INTA.
- Alvarez, R., Steinbach, H. S., & De Paepe, J. L. (2017). Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 170, 53-65. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.03.005>
- Alvarez, S., Siri Prieto, G., Rey, L., Abbate, S., Ernst, O., Piñeiro, G., & Dabalá, L. (2023). *Agricultura: Diversidad planificada*. INIA; AUSID; Universidad de la República. https://ausid.com.uy/wp-content/uploads/2024/02/Revista_FPTA_2da_Edicion-2.pdf
- Ayala, W., Bemhaja, M., Cotro, B., Docanto, J., García, J., Olmos, F., Real, D., Rebuffo, M., Reyno, R., Rossi, C., & Silva, J. (2010). *Forrajeras: Catálogo de Cultivares 2010*. INIA.
- Baigorria, T., Gómez, D., Cazorla, C., Lardone, A., Bojanich, M., Aimetta, B., Bertolla, A., Cagliari, M., Vilches, D., Rinaudo, D., & Canale, A. (2011). *Bases para el manejo de vicia como antecesor del cultivo de maíz*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas%20artificiales/232-vicia.pdf
- Balbinot, A., Jr., da Veiga, M., de Moraes, A., Pelissari, A., Mafra, A., & Dela 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>
- 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://doi.org/10.2134/agronj15.0086>
- Brutti, L. N., Roba, M. A., Romito, A., Giardina, E. B., Tesouro, M. O., D'Amico, J. P., & Ciarlo, E. A. (2022). Servicios ecosistémicos: Una mirada desde los intercultivos. *Revista de Investigaciones Científicas de la Universidad de Morón*, 6(10), 59-70.
- Büchi, L., Gebhard, C.-A., Liebisch, F., Sinaj, S., Ramseier, H., & Charles, R. (2015). Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. *Plant and Soil*, 393, 163-175. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2476-7>

- Camacho Valdez, V., & Ruiz Luna, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1(4), 3-15. <https://doi.org/10.15741/revbio.01.04.02>
- Carámbula, M. (2019). *Pasturas y forrajes: Vol. 1. Potenciales y alternativas para producir forraje*. Hemisferio Sur.
- Clark, A. (Ed.). (2012). *Managing cover crops profitably* (3rd ed.). SARE; NIFA. <https://www.sare.org/wp-content/uploads/Managing-Cover-Crops-Profitably.pdf>
- Čupina, B., Vujić, S., Krstić, D., Radanović, Z., Čabilovski, R., Manojlović, M., & Latković, D. (2017). Winter cover crops as green manure in a temperate region: The effect on nitrogen budget and yield of silage maize. *Crop & Pasture Science*, 68(11), 1060-1069. <https://doi.org/10.1071/CP17070>
- Díaz Rosello, R. (1992). Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. *Revista INIA Investigaciones Agronómicas*, 1(1), 27-35.
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency: Measurement and management. En International Fertilizer Industry Association (Ed.), *Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for their Adoption and Voluntary Initiatives vs Regulations* (pp. 1-28). https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2007_IFA_FBMP-Workshop_Brussels.pdf
- Ernst, O. (2006). Efecto de la leguminosa invernal como cultivo de cobertura sobre rendimiento en grano y respuesta a nitrógeno de maíz sembrado sin laboreo. *Agrociencia (Uruguay)*, 10(1), 25-35. <https://doi.org/10.31285/AGRO.10.937>
- Ernst, O. R., Dogliotti, S., Cadenazzi, M., & Kemanian, A. R. (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>
- Essman, A., & Legleiter, T. (2012). *Ryegrass control and cover crop termination: Characteristics and management*. Ohio State University Extension. <https://agcrops.osu.edu/newsletter/corn-newsletter/2024-14/ryegrass-control-and-cover-crop-termination>
- Ferraris, G. N., Couretot, L. A., & Magnone, G. (2011). *Nutrición del cultivo de arveja: Experiencias de la campaña 2011/12*. https://mycophos.com/ensayos/Arveja_inta_Pergamino_2011.pdf
- Finney, D. M., White, C. M., & Kaye, J. P. (2016). Biomass production and carbon/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. *Agronomy Journal*, 108(1), 39-52. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0182>
- Flynn, R., & Idowu, J. (2015). *Nitrogen fixation by legumes*. New Mexico State University. https://pubs.nmsu.edu/_a/A129/

- Garba, I. I., Bell, L. W., & Williams, A. (2022). Cover crop legacy impacts on soil water and nitrogen dynamics, and on subsequent crop yields in drylands: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, Artículo e34. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00760-0>
- García, J. A. (2003). *Variedades forrajeras en el Uruguay: Rol del INIA, la industria y el impacto al productor*. INIA.
- Gentsch, N., Riechers, F. L., Boy, J., Schwenecker, D., Feuerstein, U., Heuermann, D., & Guggenberger, G. (2024). Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *SOIL*, 10, 139-150. <https://doi.org/10.5194/soil-10-139-2024>
- 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 Ciência do Solo*, 28(4), 751-762.
- Hudek, C., Putinica, C., Otten, W., & De Baets, S. (2022). Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science*, 73(1), Artículo e13147. <https://doi.org/10.1111/ejss.13147>
- Jarvis, S. C., Stockdale, E. A., Shepherd, M. A., & Powlson, D. S. (1996). Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: Processes and measurement. *Advances in Agronomy*, 57, 187-235.
- Kladivko, E. (2016). *Cover crops for soil nitrogen cycling*. Purdue University. <https://ag.purdue.edu/department/agry/agry-extension/docs/cover-crops/covercropsnitrogen.pdf>
- Ley N° 18.564: *Conservación y uso sostenible del suelo y del agua*. (2009). IMPO. <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18564-2009/2>
- Liu, A., Ma, B., & Bomke, A. A. (2005). Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of American Journal*, 69(6), 2041-2048. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0032>
- Marcillo, G., & Miguez, F. E. (2017). Corn yield response to winter cover crops: An updated meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(3), 226-239. <https://doi.org/10.2489/jswc.72.3.226>
- Milesi Delaye, L. A., Irizar, A. B., Magrín, G. O., & Andriulo, A. E. (2014). Perspectivas para el stock orgánico del suelo de la Pampa Ondulada bajo diferentes escenarios agronómicos y climáticos En G. O. Magrín, M. I. Travasso, & G. R. Rodríguez (Eds.), *Sustentabilidad y las emisiones de carbono en la agricultura argentina* (pp. 123-145). INTA. https://www.researchgate.net/publication/304913926_Sustentabilidad_y_las_emisiones_de_carbono_en_la_agricultura_argentina

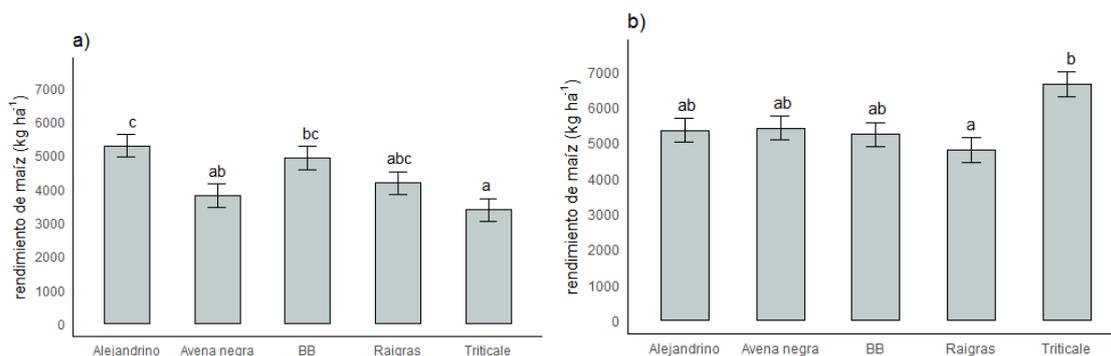
- Odhambo, J. J. O., & Bomke, A. A. (2001). Grass and legume cover crop effects on dry matter and nitrogen accumulation. *Agronomy Journal*, 93(2), 299-307. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932299x>
- Pinto, P; Rubio, G; Gutiérrez, F; Sawchik, J; Arana, S; Piñeiro, G. (2021). Variable root:shoot ratios and plant nitrogen concentrations discourage using just aboveground biomass to select legume service crops. *Plant Soil*, 463, 347-358. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04916-x>
- Pott, L. P., Amado, T. J. C., Schwalbert, R. A., 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 in Southern Brazil. *Science of the Total Environment*, 759, Artículo e144313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144313>
- Prieto, G. M. (2010). *Pautas para el manejo del cultivo de arveja*. <https://es.scribd.com/doc/60330824/Pautas-Para-El-Manejo-Del-Cultivo-de-Arveja-Final>
- Reeves, D. W., Wood, C. W., & Touchton, J. T. (1993). Timing nitrogen application for corn in a winter legume conservation tillage system. *Agronomy Journal*, 85(1), 30-85. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500010020x>
- Restovich, S. B., Andriulo, A. E., & Portela, S. I. (2012). Introduction of cover crops in a maize–soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Research*, 128, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.012>
- Rimski-Korsakov, H., Álvarez, C. R., & Lavado, R. S. (2016). Cultivos de cobertura invernales en la región pampeana argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 21, 2-6. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/48332>
- Roth, T., & Waite, J. (2021). *Early spring carbon to nitrogen ratios of cereal rye varieties*. USDA <https://nracs.usda.gov/plantmaterials/kspmcsr13883.pdf>
- Ruffo, M., & Parsons, A. (2004). Cultivos de coberturas en sistemas agrícolas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 21, 8-17.
- 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.
- Sawchik, J. (2001). Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo-pastura bajo laboreo convencional y siembra directa. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Reunión técnica sobre siembra directa* (pp. 323-345). http://www.inia.org.uy/novedades/jorge_sawchik.pdf

- 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 J. Terra, J. Sawchik, & G. Siri (Eds.), *IV Simposio Nacional de Agricultura* (pp. 149–168). INIA.
https://www.researchgate.net/publication/283582178_El_sistema_agricola_bajo_amenaza_que_aportan_los_cultivos_de_cobertura_yo_las_pasturas_cortas
- Siri-Prieto, G., & Ernst, O. (2012). Effect of legume or grass cover crops and nitrogen application rate on soil properties and corn productivity. *Agrociencia (Uruguay)*, 16(3), 294-301. <https://doi.org/10.31285/AGRO.16.686>
- Tellatin, S., & Myers, R. (2017). *Cover crops at work: Increasing soil organic matter*. SARE. <https://www.sare.org/wp-content/uploads/Cover-Crops-at-Work-Increasing-Soil-Organic-Matter.pdf>
- Terra, J., Ayala, W., Cantou, G., Barrios, E., & Cardozo, G. (2012). Cultivos de cobertura en esquemas agrícolas con soja Resultados experimentales 2012-13. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Arroz-Soja: Resultados experimentales 2012-2013* (pp. 16-18).
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8000/1/Ad-713-c.9-p.16-18.pdf>
- Thelen K. D. (2021, 20 de abril). *Understanding the role of carbon in agriculture: Part 1*. Michigan State University Extension.
<https://www.canr.msu.edu/news/understanding-the-role-of-carbon-in-agriculture-part-1>
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33(2), 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- Vyn, T. J., Faber, J. G., Janovicek, K. J., & Beauchamp, E. G. (2000). Cover crop effects on nitrogen availability to corn following wheat. *Agronomy Journal*, 92(5), 915-924. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.925915x>
- Wang, J., Zhang, S., Sainju, U. M., Ghimire, R., & Zhao, F. (2021). A meta-analysis on cover crop impact on soil water storage, succeeding crop yield, and water-use efficiency. *Agricultural Water Management*, 256, Artículo e107085.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107085>

7 ANEXOS

Figura A1

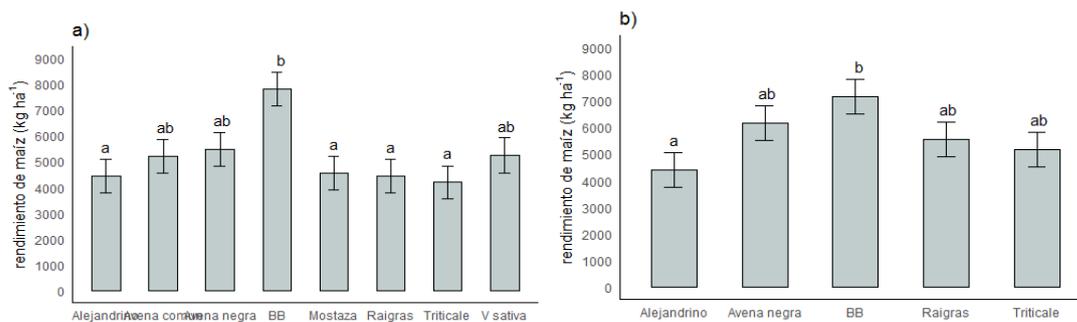
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2007



Nota. Fue significativo el CS y también hubo interacción CS N. Sin embargo, el N no fue significativo, puede deberse al efecto del TR antecesor el cual aportó gran cantidad de N. Para N 0: Triticale Avena y raigrás. Hay una diferencia significativa entre Triticale y Alejandrino. Luego con el N 50: hubo cambio de ranking puesto a que Triticale pasó de ser el mejor a estar en la segunda categoría.

Figura A2

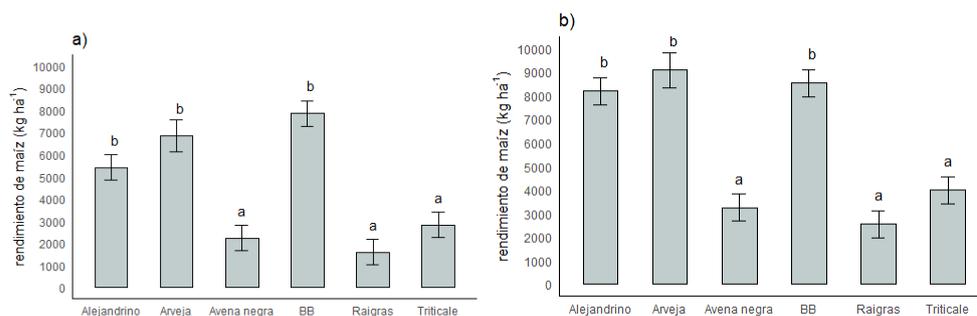
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2008



Nota. Es significativo el CS mientras que el N no. Tampoco hay interacción. N0: Todos los tratamientos CS son iguales menos el BB el cual rindió más respecto a los otros. Puede deberse a menor consumo de agua del BB y además es una chacra nueva con un aporte de N suficiente. N50: se da la misma relación.

Figura A3

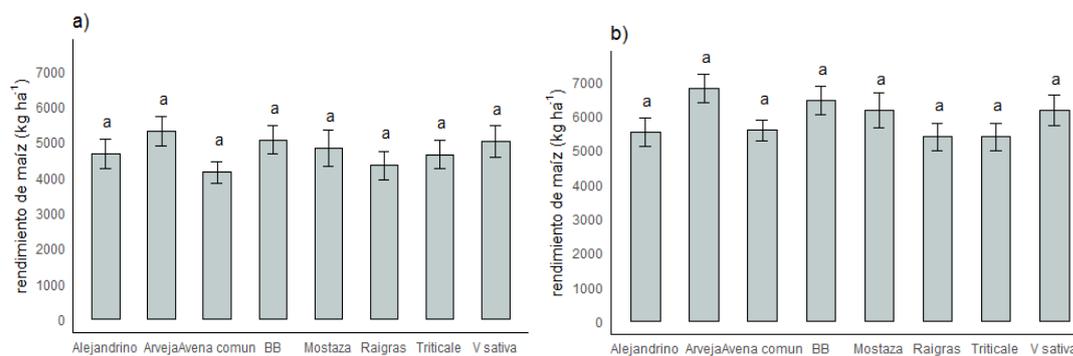
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2009



Nota: Es significativo el efecto de CS y también el del N. No hay interacción entre CS-N. Para N0: BB, Arveja y Aleandrino fueron iguales entre ellos y superiores a las gramíneas. Con N50: No hubo cambio de ranking. Rindieron más en general.

Figura A4

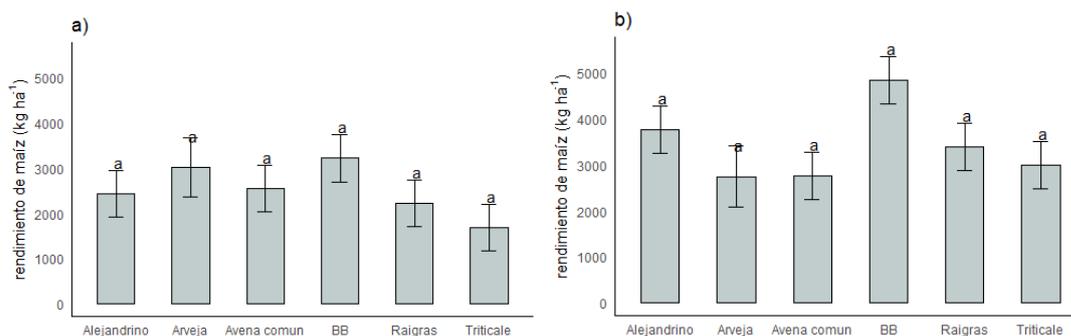
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2010



Nota. No hubo efecto significativo de CS ni de N. Tampoco hubo interacción entre ellos. Se ven diferencias en rendimiento, pero no son estadísticamente significativas. Puede deberse al efecto clima para ese año.

Figura A5

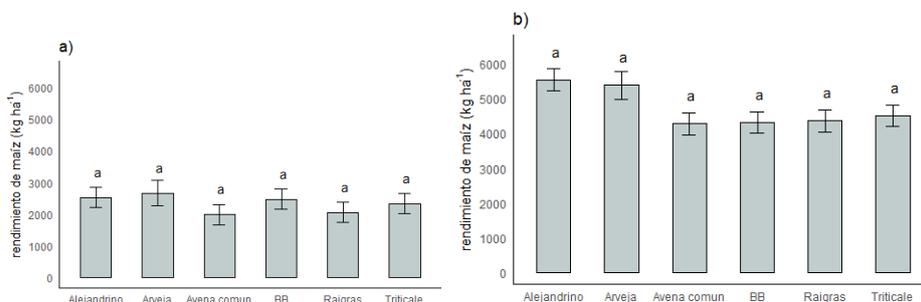
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2011



Nota. Hay un efecto significativo de N, pero no de CS. No se ve interacción entre CS-N. Hubo un efecto en N rindieron más con N50. Se puede inferir que hubo un efecto año ya que los rendimientos son relativamente bajos. Las leguminosas no aportaron significativamente más nitrógeno.

Figura A6

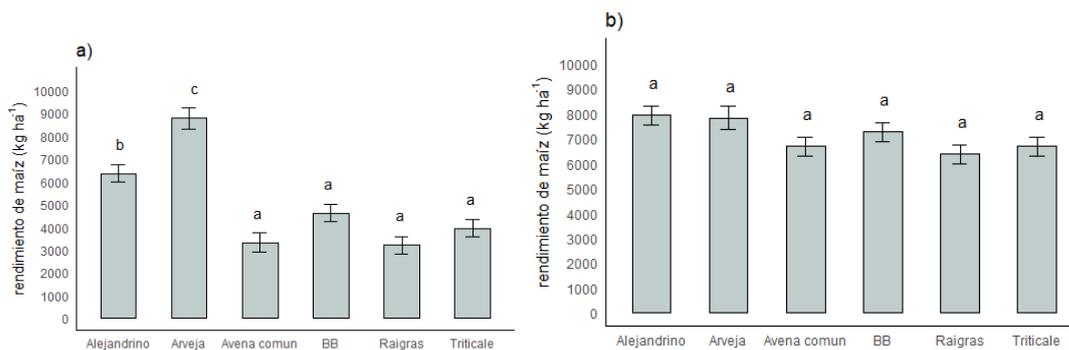
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2012



Nota. Hay un efecto significativo de Nitrógeno en el rendimiento. Sin embargo, no hay diferencias significativas entre CS. El efecto del N tiene un nivel de significancia mayor que el año anterior. Las leguminosas parecen no aportar N significativamente. Puede haber poca biomasa. Puede haber mala nodulación FBN. Puede que haya baja absorción del N por parte del maíz.

Figura A7

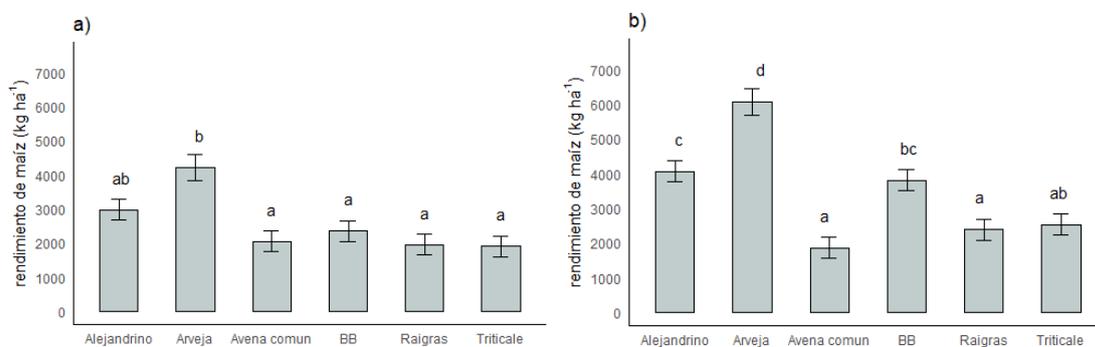
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2013



Nota. Para N50: no hay diferencias significativas. La Arveja parece rendir más sin N para este año.

Figura A8

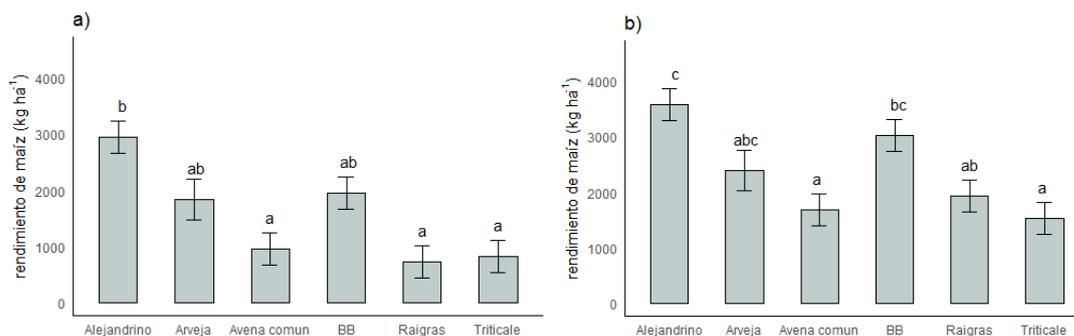
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2014



Nota. Hay efecto de CS-N y además hay interacción. Para N0: Arveja y Alejandrino son iguales entre sí y superiores al resto.

Figura A9

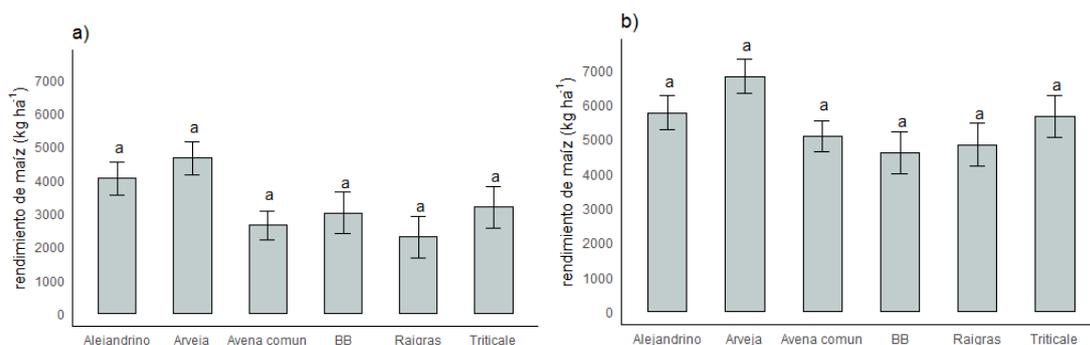
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2015



Nota. Hubo efecto de CS en mayor nivel de significancia y en menor medida por el efecto de N. Para N0: Alejandrino BB y Arveja son iguales entre sí y superiores al resto. Para N50: hubo un aumento de rendimiento levemente significativo, pero no hubo interacción ni cambio de ranking. Se puede inferir que fue un año seco por los bajos rendimientos en general y por el efecto del consumo de agua de los CS gramíneas.

Figura A10

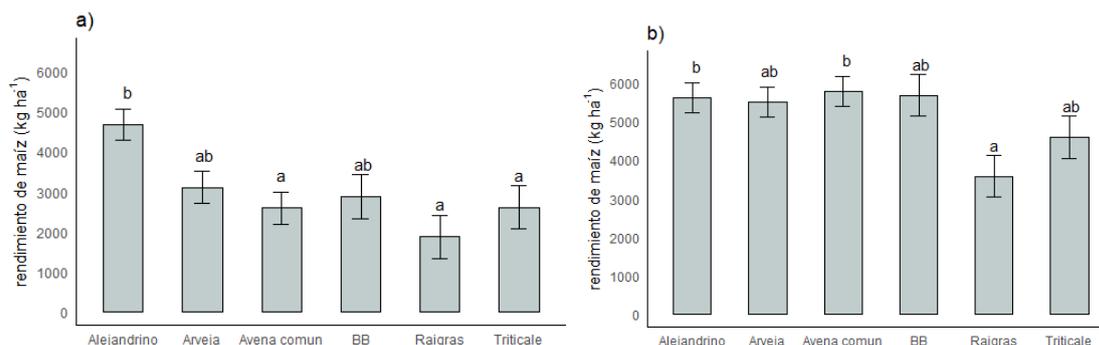
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2016



Nota. Hay un efecto del CS y del N en menor medida, pero no hay interacción, se esperaría diferencia en las letras, se nota una gran variabilidad dentro de cada tratamiento, el valor más bajo de arveja es igual al más alto de raigrás. El error estándar es muy elevado comparado con años anteriores. Eso puede estar enmascarando que no haya diferencia entre medias. Hay mucha variabilidad que hace ruido.

Figura A11

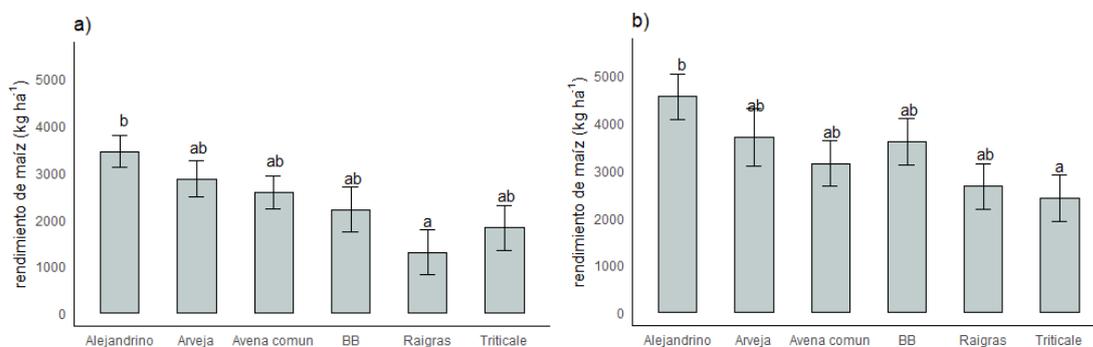
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2017



Nota. Hay un efecto significativo del CS, y en menor medida el N, hay interacción CS-N. avena común y alejandrino son superiores al raigrás.

Figura A12

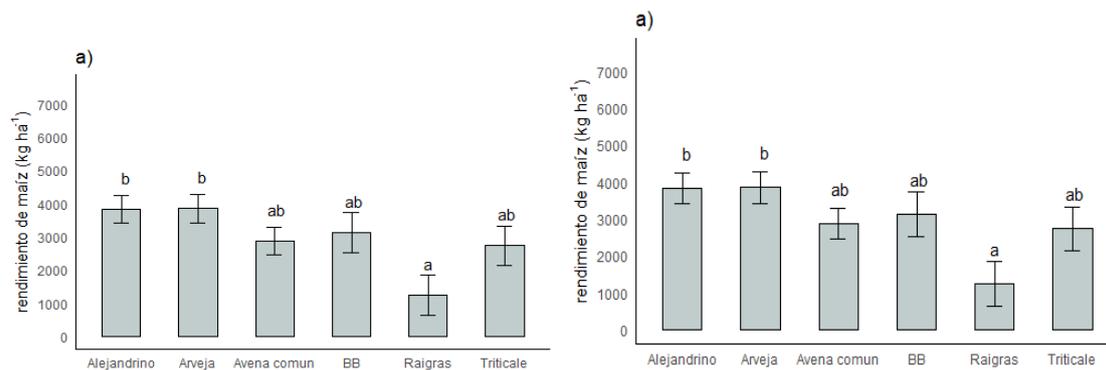
Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2018



Nota. Hay efecto significativo del CS y del nitrógeno, no hay interacción, para N=0 el alejandrino es superior al raigrás, el resto no tiene diferencia significativa, con N=50 el alejandrino es significativamente superior al Triticale, sin diferencias entre los otros CS, para N=100 las leguminosas son iguales entre sí y superiores a la avena común, este tratamiento no se aplicó a todos los CS.

Figura A13

Rendimientos y significancia para CS y dosis de nitrógeno (a y b), año 2019



Nota. Hay efecto significativo del CS y del N en el rendimiento del maíz, pero no hay interacción. para N=0 hay diferencias entre leguminosas y el raigrás, para N=50, la arveja es superior al Triticale y al raigrás, para N=100 no hay diferencias significativas, se podría decir que hay un problema de deterioro de calidad del suelo que no se soluciona con N.