

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**APORTE DE NITRÓGENO AL MAÍZ POR PARTE DE  
DISTINTOS CULTIVOS DE SERVICIO INVERNALES  
TALES COMO GRAMÍNEAS PURAS, LEGUMINOSAS Y  
SUS MEZCLAS**

**por**

**Federico BENTANCOR SALVO  
Juan FERREIRA LARROSA**

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

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2024**

**PAGINA DE APROBACIÓN**

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

\_\_\_\_\_  
Ing. Agr. (Dr) Oswaldo Ernst

Tribunal:

\_\_\_\_\_  
Ing. Agr. (MSc.) Santiago Alvarez

\_\_\_\_\_  
Ing. Agr. (PhD.) Guillermo Siri-Prieto

Fecha:

10 de octubre de 2024

Estudiante:

\_\_\_\_\_  
Federico Bentancor Salvo

\_\_\_\_\_  
Juan Ferreira Larrosa

## TABLA DE CONTENIDO

PAGINA DE APROBACIÓN.....	2
TABLA DE CONTENIDO .....	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS .....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT .....	7
1 INTRODUCCIÓN.....	8
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS OFRECIDOS POR LOS CULTIVOS DE SERVICIO.....	10
2.1.1 Control de erosión .....	10
2.1.2 Descompactación.....	11
2.1.3 Dinámica de nitrógeno.....	11
2.1.4 Dinámica de agua del suelo .....	13
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES UTILIZADAS .....	14
2.2.1 Gramíneas.....	14
2.2.2 Leguminosas.....	15
2.2.3 Mezcla de especies .....	18
2.3 MANEJO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO .....	18
2.3.1 <i>Agua en el suelo</i> .....	18
2.4 EFECTOS SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ.....	20
2.5 IMPACTO DE LA UTILIZACIÓN DE CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE LA ECONOMÍA DEL SISTEMA.....	21
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1 CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES .....	24
3.1.1 Localización.....	24
3.1.2 Características edafológicas e historia de la chacra.....	24
3.1.3 Diseño experimental .....	25
3.2 MANEJO Y DETERMINACIONES EN EL CULTIVO DE MAÍZ.....	27
3.2.1 Siembra del cultivo de renta .....	27
3.2.2 Determinaciones .....	27
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31
4.1 CARACTERIZACION CLIMATICA .....	31

4.1.1	Temperatura.....	31
4.2	Precipitaciones.....	32
4.3	EFFECTOS DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE EL SUELO.....	33
4.3.1	Nitratos en suelo y rastrojo.....	33
4.3.2	Resistencia a la penetración.....	41
4.3.3	Contenido de agua en el suelo .....	43
4.4	EFFECTO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE MAÍZ .....	47
4.4.1	Implantación .....	49
4.4.2	SPAD .....	50
4.4.3	Altura de plantas .....	50
4.4.4	Largo de la espiga.....	51
5	CONCLUSIONES.....	52
6	BIBLIOGRAFÍA .....	54

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

### Tabla No.

<b>Tabla 1</b> <i>Esquema para presupuestar la incorporación de un CS</i> .....	22
<b>Tabla 2</b> <i>N-NO<sub>3</sub> en suelo, porcentaje, cantidad de nitrógeno, biomasa, y relación C:N del rastrojo a siembra</i> .....	34
<b>Tabla 3</b> <i>N-NO<sub>3</sub> en suelo, porcentaje, cantidad de nitrógeno, biomasa, y relación C:N del rastrojo a V6</i> .....	37
<b>Tabla 4</b> <i>N-NO<sub>3</sub> según estrato de suelo a madurez y biomasa de rastrojo en prefloración</i> .....	39
<b>Tabla 5</b> <i>Resistencia a la penetración para cada tratamiento de CS en distintas profundidades a siembra (kPa)</i> .....	42
<b>Tabla 6</b> <i>Agua disponible en suelo según profundidad a la siembra</i> .....	46
<b>Tabla 7</b> <i>Agua disponible en suelo según profundidad a V6</i> .....	46
<b>Tabla 8</b> <i>Resumen de significancia según efecto cultivo de cobertura, efecto fertilización e interacción</i> .....	48
<b>Tabla 9</b> <i>Resumen de mediciones realizadas sobre el cultivo de maíz sin discriminar por dosis de fertilización</i> .....	49

### Figura No.

<b>Figura 1</b> <i>Esquema de la distribución de los tratamientos dentro de cada bloque del experimento</i> .....	25
<b>Figura 2</b> <i>Figura ilustrativa de las distintas mediciones recabadas en cada etapa</i> .....	29
<b>Figura 3</b> <i>Temperaturas mensuales medias en el periodo del experimento en comparación a los datos históricos</i> .....	31
<b>Figura 4</b> <i>Precipitaciones mensuales en el periodo del experimento en comparación a los datos históricos (1991-2020)</i> .....	32
<b>Figura 5</b> <i>Relación entre N-NO<sub>3</sub> a la siembra de maíz (0-7,5 cm) y relación C/N del CS</i> .	35
<b>Figura 6</b> <i>Relación N-NO<sub>3</sub> a la siembra de maíz (0-7,5 cm) y kgNha<sup>-1</sup> del rastrojo de cada CS</i> .....	36
<b>Figura 7</b> <i>Humedad gravimétrica (%) a distintas profundidades en el momento de siembra</i> .....	43
<b>Figura 8</b> <i>Humedad gravimétrica (%) a distintas profundidades en la etapa de V6</i> .....	44

## RESUMEN

Desde fines del siglo XX hasta la implementación definitiva de los Planes de Uso y Manejo responsable de Suelos (PUMS) en 2013, los sistemas de cultivos sufrieron una serie de cambios que llevaron a un aumento en la frecuencia de secuencias de cultivo continuo, basándose en la obtención de un cultivo por año, lo que estableció un sistema altamente extractivo. Estos cambios se vieron reflejados en la presencia de largos períodos de barbecho invernal entre la siembra de los cultivos estivales, produciendo un deterioro en las propiedades fisicoquímicas del suelo, al favorecer procesos como la erosión hídrica, pérdida de nutrientes por lixiviación y compactación del suelo, entre otros. La implementación de los PUMS, que establece límites de tolerancia a la erosión de suelos, estableció la necesidad de mantener el suelo cubierto, lo cual se tradujo a nivel comercial en un aumento significativo de la superficie agrícola de invierno con base en la incorporación de los cultivos de servicio (CS). Los mismos además de mantener el suelo cubierto, también pueden aportar carbono al sistema y reciclar nutrientes, entre muchos otros servicios ecosistémicos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto, al mantener el suelo cubierto, de 6 CS invernales sobre la humedad gravimétrica, N-NO<sub>3</sub> en el suelo y su impacto en el cultivo de maíz subsiguiente. Para ello se utilizaron dos gramíneas puras (*Avena strigosa* y *Avena byzantina*) dos mezclas de gramíneas con leguminosas (*Avena strigosa* + *Vicia villosa* y *Avena byzantina*+ *Vicia villosa*), dos leguminosas puras (*Vicia villosa* y *Lupinus angustifolius*) y por último el barbecho como testigo. Además, se abordó el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el cultivo de maíz, fertilizando subparcelas dentro de los tratamientos con las siguientes dosis, 0 kg N ha<sup>-1</sup>, 40 kgN ha<sup>-1</sup> y 80 kg N ha<sup>-1</sup> en diferentes etapas del cultivo. Para este ensayo en particular, realizado en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC) en el departamento de Paysandú, se encontraron diferencias en variables como implantación, N-NO<sub>3</sub> en el suelo y N en el rastrojo. Cabe destacar que las precipitaciones no fueron representativas del régimen hídrico de la región, estando muy por debajo de la media.

*Palabras clave:* cultivo de cobertura, nitrógeno, maíz, agua en el suelo

## **ABSTRACT**

From the late 20th century until the full implementation of the Responsible Land Use and Management Plans (PUMS for its Spanish acronym) in 2013, cropping systems underwent a series of changes that led to an increase in the frequency of continuous cropping sequences, based on obtaining one crop per year, which established a highly extractive system. These changes were reflected in the presence of long periods of winter fallow between the planting of summer crops, leading to the deterioration of the soil's physicochemical properties by favoring processes such as water erosion, nutrient loss due to leaching, and soil compaction, among others. The implementation of the PUMS, which sets erosion tolerance limits for soils, established the need to keep the soil covered. This was translated commercially into a significant increase in winter agricultural area based on the incorporation of cover crops (CC). In addition to keeping the soil covered, these crops can also contribute carbon to the system and recycle nutrients, among many other ecosystem services. The objective of this work was to evaluate the effect of keeping the soil covered with 6 winter CCs on gravimetric moisture, soil N-NO<sub>3</sub>, and their impact on the subsequent corn crop. For this purpose, two pure grasses (*Avena strigosa* and *Avena byzantina*), two mixtures of grasses with legumes (*Avena strigosa* + *Vicia villosa* and *Avena byzantina* + *Vicia villosa*), two pure legumes (*Vicia villosa* and *Lupinus angustifolius*), and finally fallow as a control were used. Additionally, the effect of nitrogen fertilization on the corn crop was addressed by fertilizing subplots within the treatments with the following doses: 0 kg N ha<sup>-1</sup>, 40 kg N ha<sup>-1</sup>, and 80 kg N ha<sup>-1</sup> at different stages of the crop. For this particular experiment, conducted at the EEMAC in the city of Paysandú, differences were found in variables such as establishment, soil N-NO<sub>3</sub>, and stubble N. It is worth noting that the rainfall was not representative of the region's water regime, being well below the average.

*Keywords:* cover crops, nitrogen, corn, soil water

## **1 INTRODUCCIÓN**

En las últimas décadas la presión global por aumentar la producción de alimentos ha provocado un importante cambio en el uso del suelo. Las zonas agrícolas del Uruguay no han estado exentas de dicho proceso. Este proceso consistió en la sustitución del tradicional sistema de rotación agricultura/pastura y en la expansión sobre tierras marginales de un sistema de agricultura continua con una alta frecuencia de soja, siempre bajo siembra directa. Como consecuencia, se dio un aumento exponencial del área sembrada de soja durante la primera década, transformándose en el cultivo con mayor superficie sembrada (40%) a nivel nacional en los años 2008-2009 (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2009). Sin embargo, este incremento no estuvo acompañado por un aumento similar en el área de cultivos de invierno, lo que generó un importante incremento del área en barbecho durante el invierno, período en el cual el suelo es más susceptible a la erosión. En consecuencia, en 2013 se implementaron los Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo el cual se basa en la Ley n° 15.239 surgida en el año 1981, en los cuales se establece un criterio de erosión tolerable. La puesta en marcha de dicha reglamentación llevó a que, de no realizar cultivos de renta de invierno, fuera necesaria la incorporación de CS en la secuencia de cultivos, para cumplir con los niveles de erosión tolerables.

Realizar cultivos con el objetivo de cubrir el suelo permitió mantener sistemas de agricultura continua dentro de un rango tolerable de pérdida de suelo por erosión y, por ende, evitar la degradación del suelo. Si bien el foco ha sido puesto en la regulación de la erosión, otros beneficios, también denominados servicios ecosistémicos, pueden ser generados por el uso de estos cultivos. Estos servicios pueden ser: reducir la compactación, minimizar la lixiviación de nitratos residuales, incrementar la concentración de carbono (C) y nitrógeno (N) orgánico del suelo, controlar malezas y plagas, aportar N mineral al cultivo de renta subsiguiente o aumentar la conservación de agua del suelo, entre otros (Bacigaluppo et al., 2020).

Sin embargo, también es necesario considerar los posibles inconvenientes que pueden surgir por incorporar esta tecnología al sistema. Como el consumo de agua durante el período invierno-primaveral, que puede afectar la oferta normal de agua para el siguiente cultivo, o la inmovilización de nutrientes durante el establecimiento del cultivo de renta. Debe existir una

relación costo-beneficio que sean razonables para el productor y además que los motive a realizarlos. El objetivo de este trabajo fue evaluar la multifuncionalidad de diferentes CS invernal y su efecto sobre el cultivo de maíz.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS OFRECIDOS POR LOS CULTIVOS DE SERVICIO

En los sistemas agrícolas del Uruguay, la sustitución de la rotación cultivo-pastura, por sistemas de cultivos continuo en siembra directa centrados en el cultivo de soja (Franzluebbers et al., 2014), han resultado en el mediano plazo en pérdidas de servicios ecosistémicos de regulación y soporte, incluyendo una reducción en la capacidad de aporte de nutrientes (De Falco, 2017), la pérdida de estructura y MO (Clunes et al., 2014 como se cita en Capurro, 2018), del control de plagas y malezas (Campiglia et al., 2011), entre otros.

El proceso de intensificación sostenible, propuesto por Bass et al. (1995), engloba una serie de prácticas las cuales toman en cuenta las exigencias del cultivo y a las características de cada lugar. Este concepto propone a partir de la inclusión de una serie de prácticas proteger el suelo de la erosión y la degradación, mejorar la biodiversidad y contribuir a la preservación de los recursos naturales, sin dejar de lado los niveles de productividad de los sistemas. Las prácticas asociadas a los sistemas de cultivo sostenibles están basadas en tres principios: minimizar la alteración del suelo, mantenerlo con cobertura permanente, y realizar rotación de cultivos (Gil & González, 2008).

Los CS, que tradicionalmente son utilizados en el país para controlar la erosión, pueden también cumplir una serie de servicios ecosistémicos de regulación y soporte que serán dependientes de la especie sembrada. Siendo, por lo tanto, una herramienta valiosa para lograr mejoras en el agroecosistema y contribuir a la sostenibilidad ambiental (Rimsky-Korsakov et al., 2016).

#### 2.1.1 Control de erosión

Los CS son una herramienta útil para controlar la erosión. La cobertura generada disminuye la energía cinética de la gota de lluvia, haciendo que el impacto contra el suelo sea menos erosivo. Además, mejoran la estabilidad de los agregados a través de su sistema radicular y por el aporte de MO. Son, por lo tanto, una buena alternativa en ambientes con un clima de precipitaciones intensas y estacionadas con topografía que favorecen la erosión hídrica (Cisneros et al., 2012).

Siri-Prieto y Ernst (2011) estimaron para una secuencia soja/barbecho una pérdida promedio de suelo de  $23 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , muy por encima del límite máximo de tolerancia establecido a nivel nacional ( $7 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Sin embargo, se vio que al incluir raigrás como CS la pérdida de suelo anual disminuyó a  $4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Del estudio se concluye que la inclusión de cultivos de invierno que minimicen el período de barbecho es un factor clave para controlar la pérdida de suelo por erosión.

### 2.1.2 Descompactación

La compactación de los suelos puede tener diferentes causas, tráfico de maquinaria, pisoteo animal o baja cobertura del suelo (Torres et al., 2017), manifestándose en un aumento de la densidad aparente y alterando la distribución de los poros, aumentando su resistencia mecánica a la penetración y disminuyendo la infiltración de agua (Hamza & Anderson, 2005). Esto provoca problemas en el crecimiento de los cultivos reduciendo la captura de agua debido a la menor exploración radicular, provocando una reducción del crecimiento de la biomasa aérea producto de una menor intercepción de radiación (Sadras et al., 2005). Etchegoimberry (2019) determinó como valor de referencia de resistencia a la penetración 1300 kPa, a partir del cual la compactación se comporta como un factor limitante a la hora de evaluar el rendimiento de soja.

La producción de raíces de los CS incide a la hora de descompactar el suelo, ya que al degradarse se generan poros en los lugares donde se encontraban las raíces, promoviendo la descompactación de suelo y facilitando por ende la incorporación del agua de lluvia (Bertolotto & Marzetti, 2017).

### 2.1.3 Dinámica de nitrógeno

La dinámica del N comprende varios procesos, entre ellos y los más importantes son: fijación de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), la mineralización, la inmovilización, la nitrificación y la desnitrificación (Hayatsu et al., 2008), siendo los microorganismos los encargados de llevar a cabo estos procesos (Klotz & Stain, 2008). La disponibilidad de nitrógeno para las plantas está controlada por la inmovilización, que junto con la relación C:N son variables claves que afectan la tasa de mineralización (Cerón Rincón & Aristizábal Gutiérrez, 2012).

La relación C:N cumple un rol importante para la sucesión de los procesos. Si la cantidad de N presente en la descomposición de los residuos orgánicos es mayor a la

requerida por los microorganismos, ocurrirá mineralización neta con liberación de N inorgánico. Si sucede lo contrario y el N en el residuo es menor al requerido por la biomasa microbiana, el N inorgánico será inmovilizado. El punto de equilibrio entre mineralización e inmovilización se da en relaciones C:N en torno a 25/1, si la relación disminuye (15/1), ocurre mineralización neta con ganancia de N mineral del suelo, por su parte si la relación aumenta (33/1) se da la inmovilización neta de N mineral por parte de los microorganismos heterotróficos del suelo (Perdomo & Barbazán, 2008).

El rendimiento de cultivos con una alta demanda de N es dependiente, en gran medida de factores como la relación C:N y la biomasa seca de los CS (Mailhos & Ramos, 2017). En este sentido, las leguminosas entregan más rápidamente el N al suelo gracias a su baja relación C:N en su residuo, aumentando la disponibilidad para el próximo cultivo (Gliessman, 2002). La relación C:N de los rastrojos fluctúa entre 15/1 leguminosas y 45-50/1 en gramíneas (Álvarez et al., 2023).

Boccolini et al. (2013) encontraron al utilizar Vicia como CS, un potencial de nitrificación (pasaje de  $\text{NH}_4^+ - \text{NO}_3^-$ ) de 17% mayor al tratamiento en barbecho químico. Esto aumenta el pool de N disponible, y en algunos casos llega a producciones similares que con fertilizante nitrogenado (Giacomini et al., 2004). Por el contrario, al utilizar gramíneas como cultivo antecesor, la alta relación C:N de los restos podría causar problemas en la nutrición y el rendimiento del maíz posterior (Zotarelli et al., 2009).

Según Cazorla et al. (2013), el aporte de N de la gramínea como CS se da a través de la reducción de las pérdidas de nutrientes que ocurren durante el periodo de barbecho. Los CS compuestos por gramíneas generan una disminución en las concentraciones de  $\text{N-NO}_3^-$  y una inmovilización de N. Por su parte, Rimsky-Korsakov et al. (2013), mencionan que los nitratos residuales son aquellos ubicados en los primeros 150 cm de suelo luego de la cosecha de un cultivo (por ejemplo, maíz). Los mismos quedan libres en el suelo y pueden ser lavados causando la contaminación de aguas subsuperficiales y superficiales con estos componentes, ya sean provenientes de fertilizantes o de la mineralización de materia orgánica (MO) y residuos vegetales presentes en el suelo. Por ello la inclusión de CS puede reducir estos riesgos mediante dos etapas, la primera es la absorción de esos  $\text{N-NO}_3^-$  por parte del cultivo, y la segunda es la liberación de estos para ser utilizados por el próximo cultivo de renta. Años

secos agravan el problema ya que la planta ante un estrés hídrico no es capaz de absorber el N, lo que incrementa los nitratos residuales aumentando el riesgo de una posible lixiviación (Serra & Del Campo, 2017).

Los CS modifican el ciclo de nutrientes mediante la absorción de estos, que están presentes en la solución del suelo, para devolverlos posteriormente a través del rastrojo, pudiendo afectar la nutrición mineral del cultivo siguiente en la rotación (Basanta et al., 2016). La disponibilidad de nutrientes después de un CS está determinada por la actividad microbiana y por lo tanto, depende en el corto plazo, de factores que afectan su actividad. Estos factores son la humedad, la temperatura, el acceso microbiano al sustrato y el pH, que a su vez se ven afectados por el clima, el tipo de suelo, la labranza, el tamaño y composición de los residuos, entre otras cosas (De Sá Pereira, 2013). Todavía no es posible predecir con mucha certeza la cantidad y el momento en que los nutrientes quedarán disponibles en el suelo, lo que genera que los productores sigan utilizando la aplicación de fertilizantes para mantener los niveles de nutrientes. Es por ello por lo que toma relevancia el conocimiento de la dinámica de nutrientes en los sistemas agrícolas que incorporan CS (Sarrantonio & Gallandt, 2003).

#### 2.1.4 Dinámica de agua del suelo

Según Siri-Prieto y Ernst (2011) el consumo de agua por los CS es el principal problema en los sistemas agrícolas de Uruguay y está directamente relacionado a las condiciones hídricas de su período de crecimiento. “Para producir un gramo de biomasa se necesitan entre 100 y 1.000 gramos de agua, y el valor exacto depende tanto del tipo de planta como de las condiciones ambientales” (Urrutia Ochoa, 2022). Es por esto que la eficiencia del uso del agua cumple un rol importante a la hora de tomar decisiones (Medrano et al., 2007). La salida del agua del suelo se da por medio del proceso de evapotranspiración siendo la misma la suma de la evaporación y la transpiración. Estas ocurren simultáneamente y no es fácil de distinguir entre estos dos procesos. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo, la transpiración se convierte en el proceso principal (Allen et al., 2006). En un suelo con cobertura la relación transpiración/evaporación es mayor comparado a lo que sucede en un suelo desnudo donde dicha relación es menor (Bertolotto & Marzetti, 2017).

Asociado con la realización del CS aparece la problemática de la disponibilidad hídrica para la siembra e implantación del cultivo de renta siguiente, y esto depende de cuánta agua consume el CS durante su ciclo, por eso es imprescindible un buen manejo en periodo de barbecho. Según Restovich y Andriulo (2013) los CS que más produjeron biomasa aérea fueron los que presentaron menor cantidad de agua a la siembra de los cultivos principales. De esta manera se podría ver afectada la producción del cultivo siguiente si las lluvias primaverales están por debajo del promedio ya que solo recargará los primeros centímetros. Esto no ocurriría en años normales o muy húmedos. Por lo tanto, especies con alto consumo de agua, podrían condicionar el crecimiento del cultivo posterior, particularmente en años muy secos. En el trabajo realizado por Scianca (2010) se demostró que aquellos tratamientos que se suprimieron primero, antes de la siembra soja, llegan con más contenido de agua a la siembra. Las diferencias en la cantidad de agua acumulada de los distintos tratamientos se deben al consumo de agua del CS en base a cuanto se adelante su supresión. Además, la ocurrencia de lluvias insuficientes para la recarga del perfil juega un papel importante en el suelo durante el barbecho.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES UTILIZADAS

Distintas especies son utilizadas como CS a nivel comercial, siendo las gramíneas y las leguminosas las familias de especies más desarrolladas.

### 2.2.1 Gramíneas

En lo que refiere las gramíneas, son capaces de producir rápidamente altas cantidades de biomasa de lenta descomposición por su alta relación C:N, además sus raíces fibrosas y ampliamente ramificadas, favorecen la agregación de las partículas del suelo, características que ayudan a controlar la erosión, pero al mismo tiempo son capaces de absorber N residual de cultivos anteriores y gracias a su sistema radicular penetran en suelos compactados (Restovich, 2023). Su rápido establecimiento y alta capacidad de producir biomasa no solo son beneficiosos para controlar la erosión sino también para poder combatir a las malezas, al evitar su germinación y crecimiento por la competencia que generan. Una vez que el cultivo se suprime y es incorporado al suelo, aumenta el contenido de MO del mismo (Ramírez Ceballos, 2023). Entre las gramíneas más relevantes como CS podemos encontrar a las *Avenas sp*, el *Secale cereale*, la *Hordeum vulgare* y el *Lolium multiflorum* (Carfagno et al., 2013).

### 2.2.1.1 Avena

La avena es una de las especies más utilizadas como CS en el país, la misma es una gramínea anual invernal, cuya fecha de siembra abarca desde los últimos días de febrero hasta fines de mayo, es reconocida por su precocidad y altas tasas de crecimiento durante el invierno (Sawchik et al., 2015). Esta especie se caracteriza por su rusticidad teniendo bajas exigencias hídricas y edáficas, siendo capaz de realizar reciclaje de nutrientes tales como N y fósforo (P) (Borrajo et al., 2011). Se destaca por poseer buenos niveles de implantación y un alto vigor inicial que le permite establecerse rápidamente y generar una alta producción de materia seca (MS) temprano. Estas características permiten que el suelo quede cubierto de forma temprana, evitando pérdidas de nutrientes y erosión, al mismo tiempo que realizan un buen control de malezas (Carámbula, 2007).

Como todas las gramíneas, las avenas presentan una relación C:N alta. La cual es menor cuando la planta se encuentra en estado vegetativo (Floss, 2000), tomando valores de entre 17-20:1 y mayor cuando se da la plena floración, 41-50:1. En cuanto a la producción anual de MS, ronda los 3000-7000 kg MS ha<sup>-1</sup>, tanto en *Avena byzantina* como *Avena strigosa* (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA] & Instituto Nacional de Semillas [INASE], 2023).

La *Avena strigosa* más conocida como avena negra es una de las más utilizadas dentro de este género. Posee un ciclo corto, floración temprana, y tiene una baja capacidad de macollaje y rebrote. Se destaca por su temprana producción de forraje con escasa contribución en primavera (Pedrozo et al., 2018). Por su parte la *Avena Byzantina* conocida también como avena amarilla, es un cultivo de ciclo largo con un hábito de crecimiento semipostrado. Esta planta se distingue por su capacidad de macollaje abundante, lo que significa que produce numerosos brotes desde la base (Carámbula, 2007).

### 2.2.2 Leguminosas

El uso de leguminosas como CS (en mezcla o puras) tiene como uno de sus objetivos cubrir parte del requerimiento de N del próximo cultivo de renta sembrado luego de su supresión. La mayor parte de las leguminosas acumulan N en su biomasa aérea (Fageria et al., 2005) que queda rápidamente disponible para cultivos posteriores luego de su

descomposición (Ruffo & Bollero, 2003). Explicado fundamentalmente por la baja relación de C:N y proporción de lignina en la biomasa vegetal (Barbazán et al., 2002).

La fertilización nitrogenada es uno de los costos más importantes con una incidencia del 30% del total de los costos que conlleva instalar un cultivo (Clark et al., 1995, como se cita en Vanzolini et al., 2010), en este sentido las leguminosas son una buena alternativa cuando el objetivo del CS es el aporte de N extra al que ya está presente en el suelo, mediante la captura de N proveniente desde la atmósfera mediante el mecanismo de fijación biológica (FBN). El N presente en los residuos depende de cada especie utilizada como CS, y su grado de adaptación a las condiciones locales tanto climáticas como edafológicas. Así mismo también depende del N disponible que hay en el suelo y el momento en que se suprime su crecimiento (Bertolotto & Marzetti, 2017).

El N que aportan los residuos de estos cultivos afecta la mineralización de la MO mediada por los microorganismos del suelo. Se entregará más rápido el N en aquellos cultivos que sus residuos posean una baja relación C:N como los son las leguminosas, aumentando la disponibilidad de este nutriente para los microorganismos y para el próximo cultivo (Romano Rumbo, 2022).

#### 2.2.2.1 Vicia villosa

La Vicia Villosa es una leguminosa forrajera anual de ciclo invierno-primaveral, concentrando su producción durante el periodo primaveral (Ruiz et al., 2019). Posee un porte postrado, es de lento crecimiento inicial, disminuyendo la tasa de crecimiento desde finales de otoño y durante el invierno, aumentando la producción en primavera (Vanzolini et al., 2013). Esta especie presenta alta plasticidad a la siembra por lo que puede ser implantada desde fines de verano hasta el invierno, dando mayores producciones de forraje que Vicia sativa (Carfagno et al., 2013). La fecha de siembra es uno de los factores más determinantes del rendimiento, la siembra tiene un gran periodo de tiempo para realizarse, empezando a fines de verano y culminando a mediados de invierno, con producciones que varían entre 500 y 7200 kg MS ha<sup>-1</sup> (Vanzolini et al., 2009, como se cita en Carfagno et al., 2013). Asimismo la relación C:N ronda entre valores de 10 a 12 lo que conlleva a que la acumulación de N en biomasa dependa mucho de la producción de MS (Ahunchain Crusich et al., 2022).

Se destaca por su elevada producción de biomasa, su buena adaptación al frío y sequías, al igual que a las plagas y enfermedades. Dentro de los objetivos por lo cual es cultivada esta especie, está la producción de forraje, abono verde y también como CS (Renzi, 2020). Se ha observado que por su tipo de crecimiento genera una amplia cobertura con bajos niveles de biomasa (Ahunchain Crusich et al., 2022), lo cual le permite ser un cultivo apto para reducir la erosión del suelo, mejorar la eficiencia del uso de agua mediante la disminución de las pérdidas del sistema (Carfagno et al., 2013) y controlar malezas tanto de invierno como de verano. La aparición de biotipos de malezas con resistencia a herbicidas, las cuales son difíciles de controlar por medio de los controles químicos convencionales, provocó que la utilización de *Vicia villosa* como CS aumentará notoriamente durante los últimos años como estrategia en el manejo integrado de malezas (Bertolotto & Marzetti, 2017).

#### 2.2.2.2 *Lupinus angustifolius*

*Lupinus angustifolius* es una leguminosa anual invernal que es incluida en las rotaciones por su gran aporte de N atmosférico, que es fijado al suelo, además posee una gran adaptabilidad a suelos de baja disponibilidad de fósforo y a la posibilidad de hacer manejos efectivos de gramíneas malezas gracias a ser de hoja ancha (Arza et al., 2022). La fecha de siembra es un factor determinante en la obtención de altas acumulaciones de forraje, con relación a esto el lupino es otoño-invernal pudiendo ser sembrados a partir de mediados de abril hasta fines de junio, las variedades de ciclo largo deben sembrarse más temprano.

El lupino presenta muchos beneficios para ser elegido como CS, la baja relación C:N del rastrojo de lupino resulta un factor importante, esta relación acelera la velocidad de descomposición de los restos secos en superficie por partes de los microorganismos del suelo, aumentando la disponibilidad de nutrientes. Por otro lado, esta baja relación C:N también es responsable en el mejoramiento de la estructura del suelo como consecuencia de la acción de las hifas de hongos descomponedores que aumentan y aglutinan los agregados del suelo (Mera, 2016).

La simbiosis establecida entre el *Lupinus angustifolius* y bacterias del género *Rhizobiumlupini* y *Bradyrhizobium* sp, permite a este cultivo a ser capaz de fijar una cantidad de N elevada que ronda entre los 150 y 316 kg N ha<sup>-1</sup>, esto significa una menor necesidad de uso de fertilizantes en el cultivo siguiente y además contribuye a la sustentabilidad del

ecosistema productivo. A diferencia con otras leguminosas, el *Lupinus angustifolius* tiene la capacidad de aumentar el fósforo disponible en el suelo, esto se debe a que sus raíces son capaces de exudar ácidos orgánicos que solubilizan fosfatos del suelo haciéndolo disponible para las plantas una forma de fósforo que se encontraba fijado, en la fracción no lábil (León et al., 2001).

### 2.2.3 Mezcla de especies

Sembrar una sola especie de CS puede traer tanto ventajas como desventajas sobre los servicios ecosistémicos. Especies gramíneas producen altas cantidades de biomasa aérea, sin embargo presentan ciertos inconvenientes como su alta relación C:N, no fijan N, entre otras. A su vez especies de leguminosas (por ejemplo el Trébol) tiene beneficios como la fijación de N y baja relación C:N. Sin embargo, su bajo volumen de biomasa y alto costo de semilla son algunas de las limitaciones que tiene en comparación con especies de gramíneas como las ya nombradas Avena y Centeno (Chapagain et al., 2020). Según Finney et al. (2016) la mezcla de CS mejora los servicios ecosistémicos. Entre ellos aumenta la producción de biomasa y con esto mejorarán los mismos. Además, encontró una relación positiva entre el número de especies de la mezcla y la biomasa producida. Sin embargo, Wendling et al. (2019) indicaron que el rendimiento del CS depende mucho de las condiciones de crecimiento, siendo las mezclas con dos especies la más productiva. Al utilizar una mezcla con características contrastantes mejora la probabilidad de obtener beneficios positivos ya que una alta diversidad garantiza una gran estabilidad y alta producción de biomasa. La estabilidad es una de las principales ventajas de las mezclas y esto es gracias a la adaptación a distintos ambientes.

## 2.3 MANEJO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO

### 2.3.1 Agua en el suelo

Una de las barreras más importantes en la adopción de CS en climas con agua limitada es la reducción potencial del agua disponible para el próximo cultivo de renta y su posible penalización en rendimiento. Diversos estudios indican el bajo contenido de agua a la hora de sembrar el cultivo sucesor luego de un CS, posiblemente por su consumo y su baja recarga de agua en el suelo posterior a su supresión. Si bien estos CS reducen la pérdida por

evaporación y escorrentía y mejoran las propiedades fisicoquímicas del suelo, las mejoras en eficiencia no siempre son suficientes para compensar el agua adicional utilizada. Este riesgo dependerá de la duración de los períodos de barbecho, la elección del CS, la fecha de siembra y supresión de este y las prácticas de manejo en los cultivos comerciales sucesores (Garba et al., 2022).

Distintos trabajos realizados en Uruguay indican que tiempos de barbecho de entre 20 y 40 días son la mejor opción en lo que respecta acumulación de biomasa y alta probabilidad de lograr una adecuada humedad a la siembra y así disminuir problemas de déficit hídrico a la siembra y evitar condicionar el rendimiento del cultivo siguiente. En este sentido, tanto la capacidad de almacenaje de agua de los suelos, el manejo del CS y el régimen de precipitaciones, cumplen un rol importante para poder evaluar la influencia de los CS sobre la disponibilidad de agua (costo hídrico en la generación de biomasa). Este aspecto es particularmente importante ya que define de alguna manera el periodo necesario para la recarga del perfil (fecha de secado) (Álvarez et al., 2023).

Ridley (2006) evaluó que a medida que se demoró su secado químico, por un lado, aumentó el consumo de agua por parte del CS y por otro disminuyó el tiempo de barbecho para recargar el perfil. Como consecuencia, una demora en la fecha de secado aumenta las probabilidades de llegar al cultivo sucesor con mucha menos agua, además de consumir agua retenida en profundidad, de más difícil recarga. En trabajo realizado por Garba et al. (2022), se encontró que los CS disminuyeron el contenido de agua del suelo en un promedio de 18%.

De Sá Pereira et al. (2013) mostraron cómo los CS no presentaron un efecto negativo sobre rendimientos de un próximo cultivo de maíz. Puntos claves como el balance diario de agua en el suelo, capacidad de almacenamiento y probabilidad de ocurrencia de lluvias son muy importantes a la hora de decidir sembrar y suprimir un CS.

### 2.3.2 Nitrógeno

Vanzolini et al. (2010) concluyeron que, al retrasar el momento de secado de vicia, incrementa su producción de materia seca y su concentración de N. A su vez la disponibilidad de agua en el perfil a la hora de sembrar maíz fue variable entre los años de estudio ya que es una variable que depende de las condiciones meteorológicas del año (temperatura y humedad). Temperaturas bajas inciden en la actividad microbiana reduciéndose, por lo tanto,

la descomposición va a ser más lenta. Esto conlleva a una menor disponibilidad de N (Perdomo & Barbazán, 2008).

Estudios realizados por Rillo et al. (2013) obtuvieron producciones de vicia con un mínimo de 1475 kg MS ha<sup>-1</sup> y un máximo de 5700 kg MS ha<sup>-1</sup>. En referencia a biomasa, las fechas tempranas de secado acumularon sólo un 37,3% del total de las que fueron suprimidas en fechas tardías. Y desde el punto de vista de acumulación de N las fechas tempranas sólo significaron un 30% del total de las fechas tardías. Entonces se podría decir que hay una relación estrecha entre la producción de biomasa y la acumulación de N.

Así mismo, trabajos realizados por Vanzolini et al. (2013) muestran máximos de 5558 kg MS ha<sup>-1</sup> y mínimos de 1980 kg MS ha<sup>-1</sup>. Los máximos fueron los que se suprimieron una semana antes de la siembra de maíz y los mínimos los que suspendieron su ciclo tres semanas antes de la siembra del cultivo de renta. A su vez la concentración de N fue mayor en el que se suprime una semana antes con 205 kg N ha<sup>-1</sup>, y el de menor fue el suprimido tres semanas antes de la siembra con 79 kg N ha<sup>-1</sup>. En promedio la vicia acumuló 126 kg N ha<sup>-1</sup> durante las dos semanas entre el secado temprano y el tardío. Con esto lleva a una tasa diaria de acumulación de 8,4 kg N día<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>.

#### 2.4 EFECTOS SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ

Los CS poseen como uno de sus principales servicios ecosistémicos el aporte de MO lo que permite mantener el suelo en un buen estado de productividad. La MO lleva a ciertos beneficios en el suelo, le brinda estructura con la formación de agregados resultando en un suelo con alta aireación e infiltración, permitiendo la retención del agua y facilitando la exploración radicular (Montenegro & Malangón, 1990, como se cita en Benavides et al., 2015). Al descomponerse la MO aporta N y otros nutrientes al suelo para los cultivos. Asimismo, la actividad microbiana se ve beneficiada por la descomposición de los residuos de estos cultivos, lo que conlleva a una mayor salud al ecosistema (De Sá Pereira et al., 2013). A pesar de que los CS buscan generar mejoras en el agroecosistema que ayuden a mantener o incluso mejorar el rendimiento de los cultivos de renta, en determinadas situaciones, el rendimiento del cultivo de renta puede ser menor al ser sembrado posteriormente a un CS. Este detrimento en el rendimiento es producido por la competencia de recursos (por lo

general agua y nutrientes) generada entre elCS y el cultivo de renta siguiente (Rimsky-Korsakov et al., 2016).

La incorporación de estos cultivos puede tener efectos tanto positivos como negativos. Por el lado positivo, entre otros, pueden mejorar la concentración de N a través de la FBN (gracias a la presencia de leguminosa en la mezcla), menos presencia de malezas y plagas, y mejoras en las propiedades físicas y químicas del suelo. Pero por el lado negativo pueden llevar a que exista una competencia por los recursos entre los mismos y los cultivos de renta subsiguientes, principalmente por agua y nutrientes (Rimsky-Korsakov et al., 2015).

Según Restovich y Andriulo (2013), el rendimiento de maíz fue menor cuando se utilizaron gramíneas como Avena y Raigras que cuando se usaron leguminosas como CS en un año que las precipitaciones no fueron favorables. Asimismo, en el siguiente periodo donde no fueron limitados por agua, *Vicia villosa* como cultivo antecesor fue el que provocó mayor rendimiento. Cabe destacar que en una fase de pocas precipitaciones la falta de aprovechamiento del N aportado por la leguminosa puede ser importante, determinando mayor N residual a la cosecha del maíz potencialmente lixiviable (Restovich et al., 2008 como se cita en Restovich & Andriulo, 2013).

En sistemas donde se utiliza soja como monocultivo cuestiona la sustentabilidad debido a su baja relación C/N, lo que conlleva a un tiempo relativo menor de permanencia en el suelo y rápida degradación. Como posible acercamiento a una solución, el agregado de gramíneas en la rotación como CS permitirá mayor aporte de residuos y mejoraría el balance de carbono del sistema (Salvagiotti et al., 2013).

## 2.5 IMPACTO DE LA UTILIZACIÓN DE CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE LA ECONOMÍA DEL SISTEMA

Habitualmente los márgenes económicos son menores cuando se realiza esta práctica. Esto se debe a los mayores costos en los que se incurre al realizar un CS, y al escaso efecto positivo de los mismos sobre los rendimientos de los cultivos comerciales (Domínguez et al., 2014 como se cita en Rimsky-Korsakov et al., 2016). En este sentido, resulta de interés la evaluación de CS leguminosa o mezcla de leguminosas con gramíneas, donde el aporte de N por fijación, y consecuente ahorro de fertilizante, puede contrarrestar los costos de la realización de estos cultivos (Rimsky-Korsakov et al., 2016). Hay que considerar la cantidad

de costos que requiere la realización de esta práctica como lo son: siembra (en base a la especie que se elija va a depender de la variedad de la semilla), densidad de siembra de esta, mecanismo de supresión a utilizar, si se decide hacer en forma mecánica (rolo) o de forma química, entre otros.

A continuación, se presenta la Tabla 1 con los posibles costos más relevantes a la hora de optar por un invierno con CS o en barbecho químico.

**Tabla 1**

*Esquema para presupuestar la incorporación de un CS*

	Barbecho químico	Cultivo de servicio
Herbicida otoño	Si	Si
Siembra	No	Si
Semilla + Curado	No	Si
Herbicida primavera	Si (para el control de lo nacido + control residual)	Si (para el secado del CS; puede reemplazarse por rolado)
Herbicida pre emergente al cultivo de renta	Si	Si
Herbicida post emergente al cultivo de renta	Si	Si (igual o menor al utilizado en BQ)

*Nota.* Tomado de Gauna (2020).

En el trabajo realizado por Cano et al. (2020) se evaluaron tres factores principales: las secuencias de cultivo (soja continua: S-S, soja-maíz: S-M, maíz-soja-trigo/soja: M-S-T/S), la siembra de CS (con cobertura: CC y sin cobertura: SC), y dos niveles de uso de insumos (manejo agronómico promedio en la zona: MAP, y un manejo con mayor nivel de intensificación: MI). Los resultados marcaron que del punto de vista margen bruto su mejor opción será la rotación Maíz-Soja-Trigo/Soja y sin CS. Todo ello si el objetivo del productor es maximizar resultados económicos por unidad de superficie en el mediano plazo.

Los tratamientos que incluyen CS, más allá si el rendimiento del cultivo de renta se mantuvo o disminuyó, es de esperar que los márgenes brutos sean relativamente menores que

en las secuencias sin CS. El costo de implantación es la principal causa de esto. Pero la pregunta es: ¿qué tan sostenible son estos resultados a largo plazo teniendo en cuenta los problemas ambientales que esto trae al recurso suelo? Para mejorar los resultados económicos de los tratamientos con CS es imprescindible realizar un manejo que permita capitalizar los beneficios ambientales, como, por ejemplo, reduciendo la fertilización nitrogenada del maíz con vicia como cultivo antecesor, o disminuyendo las aplicaciones de herbicidas para el control de malezas (Fernández et al., 2012; Restovich et al., 2012).

Ruffo y Parsons (2004) afirman que a la hora de implementar CS en la rotación cumplen dos roles importantes como lo son el aporte de carbono al sistema y aumentar el rendimiento de maíz como cultivo sucesor. Esto lo hace económicamente más competitivo frente a un posible cultivo de soja.

El ahorro de fertilizante resulta importante a la hora de implementar estos cultivos. Para ello Ruffo y Parsons (2004) estiman el aporte de N de un CS al siguiente cultivo mediante el valor de reemplazo de fertilizante. El cual es definido como la dosis de fertilizante a la cual un maíz con barbecho invernal iguala en rendimiento a un maíz en cual tuvo como antecesor a un CS con y sin fertilizante. Generalmente este valor oscila entre 20-200 kg N ha<sup>-1</sup> con valores que en la realidad varían entre 60-100 kg N ha<sup>-1</sup>.

El trabajo realizado por Gauna (2020) muestra que la incorporación de coberturas de Vicia en la rotación, el sistema se estaría ahorrando solo en fertilizantes aproximadamente U\$S 69.75 por hectárea, lo cual en el total de las hectáreas que serían U\$S 38.502 en las 552 hectáreas que posee la empresa en estudio.

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES

##### 3.1.1 Localización

El trabajo experimental fue realizado en la EEMAC perteneciente a la Facultad de Agronomía, ubicada en el kilómetro 363 de la ruta nacional número 3 en el departamento de Paysandú. El experimento estuvo ubicado en el potrero 5D (32°22'37"S 58°02'40"W).

##### 3.1.2 Características edafológicas e historia de la chacra

Según la carta de reconocimiento de Suelos del Uruguay - Escala 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976), la chacra donde se ubicó el experimento se encuentra sobre la unidad San Manuel. El suelo dominante de esta unidad es un Brunosol Eutrítico Típico. El material que da origen a estos suelos son Lodolitas cuaternarias de la formación Fray Bentos y presenta una topografía de laderas ligeramente convexas con pendientes del 2%.

A su vez, se corresponde con el grupo CONEAT 11.3, con un índice de productividad de 149. En este, se describe que el material geológico son sedimentos limosos consolidados recubiertos por finos sedimentos limosos friables. Dichos sedimentos tienen una clara herencia litológica del material de Fray Bentos. El relieve descrito es de forma general mesetiforme, con zonas altas aplanadas de pendiente nula. Los suelos en las laderas son Brunosoles Eutríticos Típicos y en las zonas altas, Brunosoles Eutríticos Lúvicos, de color pardo muy oscuro, textura franca arcillo limosa, fertilidad alta y moderados a imperfectamente bien drenados. También pueden existir suelos como Planosoles Eutríticos Melánicos y Litosoles Eutríticos Melánicos.

En cuanto al historial de la chacra, la misma era utilizada para pasturas hasta que en el 2021 se realizó un cultivo de soja y posteriormente, el 13 de mayo del 2022, se sembraron los CS para realizar el experimento. En cuanto a la supresión de los CS fue diferencial, para el caso de los CS gramíneos fueron suprimidos el 20 de septiembre, mientras que las leguminosas el 16 de octubre. Lo que determinó un periodo de barbecho de 62 y 36 días respectivamente, hasta la siembra del maíz, el 21 de noviembre de 2022. Para el caso de las mezclas, tanto las gramíneas como las leguminosas fueron suprimidas el mismo día que en

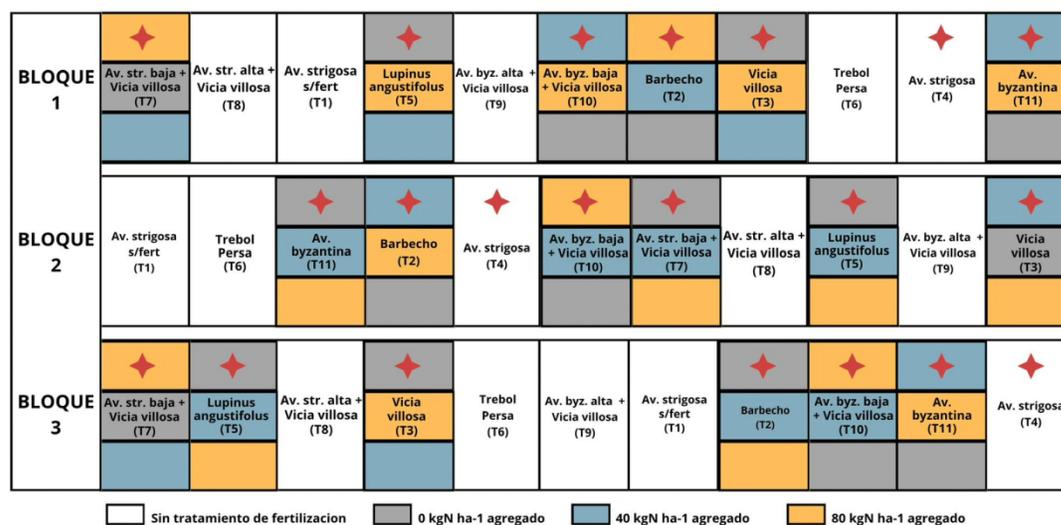
los tratamientos puros, por lo cual luego de suprimir las gramíneas de los tratamientos mezclas, las leguminosas de los mismos continuaron con su ciclo 27 días más.

### 3.1.3 Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue un DBCA en parcelas divididas con tres repeticiones. La parcela mayor (16m x 4,2m), queda definida por 6 CS y un barbecho químico. La parcela menor (4 m x 4,2m) está determinada por diferentes dosis de nitrógeno (0, 40, 80 kg N ha<sup>-1</sup>). Para lograr las dosis de N definidas en cada tratamiento, se aplicaron a la siembra 40 kg N ha<sup>-1</sup> en 2 de las subparcelas y se dejó una sin aplicación (0 kg N ha<sup>-1</sup>). Luego en V6, en una de las subparcelas fertilizadas, se vuelve a aplicar 40 kg N ha<sup>-1</sup>, alcanzando los 80 kg N ha<sup>-1</sup>. El fertilizante utilizado fue la urea y la fertilización se realizó al voleo y de forma manual. En la Figura 1 se presenta el esquema del diseño experimental.

#### Figura 1

Esquema de la distribución de los tratamientos dentro de cada bloque del experimento



*Nota.* Las estrellas indican los tratamientos (6 CS y 1 barbecho químico) estudiados en este trabajo.

El análisis estadístico se realizó sobre siete tratamientos, que se consideraron representativos de la totalidad de los tratamientos que tenía el experimento. Estos fueron dos gramíneas puras (*Avena strigos* y *Avena byzantina*), dos mezclas de gramíneas con

leguminosas (*Avena strigosa* + *Vicia* y *Avena byzantina* + *Vicia villosa*), dos leguminosas puras (*Vicia villosa* y *Lupinus angustifolius*) y por último un barbecho químico como testigo. Cabe destacar que, de los siete tratamientos, la *Avena strigosa* fue la única que no fue sometida a diferentes dosis de nitrógeno, pero fue incluida a modo de tener dos tratamientos de gramíneas puras dentro del experimento.

Para el análisis de las variables altura y SPAD se utilizó el modelo de DBCA en parcelas divididas, utilizando los diferentes niveles de fertilización mencionados anteriormente. Para el resto de las variables, el modelo utilizado para su análisis estadístico fue un DBCA ya que sus mediciones se determinaron en el testigo con  $0 \text{ kgNha}^{-1}$ .

Para el caso del DBCA en parcelas divididas, el modelo estadístico utilizado fue:  $Y_{ijk} = \mu + \gamma_k + \tau_i + (\gamma\tau)_{ki} + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$ , siendo  $Y_{ijk}$  las observaciones de la unidad experimental,  $\mu$  la media general,  $\gamma_k$  el efecto de los bloques,  $\tau_i$  el efecto de los cultivos cobertura,  $(\gamma\tau)_{ki}$  el error de la parcela grande (CS),  $\beta_j$  el efecto de la fertilización nitrogenada,  $(\tau\beta)_{ij}$  el efecto de interacción CS x fertilización nitrogenada y  $\epsilon_{ijk}$  el error de la subparcela (fertilización nitrogenada). Este modelo cumple con los supuestos que, para la condición de parcela grande, que los errores son variables aleatorias independientes, idénticas, con distribución normal, con media 0 y varianza de error de la parcela grande. Y para la parcela chica cumple con los supuestos de que los errores son variables aleatorias independientes, idénticas, con distribución normal, con media 0 y varianza de error de la subparcela ( $p \leq 0.05$ ).

Para el caso del DBCA el modelo estadístico utilizado fue:  $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$ , siendo  $Y_{ij}$  las observaciones de la unidad experimental,  $\mu$  la media general,  $\beta_j$  el efecto de los bloques,  $\tau_i$  el efecto de los CS y  $\epsilon_{ij}$  el error experimental.

## 3.2 MANEJO Y DETERMINACIONES EN EL CULTIVO DE MAÍZ

### 3.2.1 Siembra del cultivo de renta

Previo a la siembra del maíz se realizó una aplicación de herbicida: 1,5 l ha<sup>-1</sup>S-metolaclor + 0,4 l ha<sup>-1</sup>Isoxaflutole, Thiencarbazonemetil, Cyprosulfamida + 3 l ha<sup>-1</sup> Glifosato + 0,7 l ha<sup>-1</sup> Dicamba. La siembra se realizó el 21 de noviembre del año 2022 con una sembradora Semeato de doble disco con cinco cuerpos y una separación entre hileras de 0,52 m. La población objetivo fue de 55000 plantas por hectárea. El cultivar de maíz utilizado para el ensayo fue P2021 PWUE.

### 3.2.2 Determinaciones

Las determinaciones a campo se realizaron entre la siembra y la cosecha del maíz, más exactamente entre el 21 de noviembre del 2022 y el 18 de marzo del 2023. Las mismas se realizaron en cinco fechas diferentes correspondiendo estos momentos con alguna etapa clave del cultivo de maíz, siendo estas, a la siembra, V6, prefloración, floración y por último la madurez del cultivo. Cabe destacar que las determinaciones realizadas en cada una de las cinco etapas del cultivo no siempre fueron las mismas (Figura 2).

A la siembra, el 21/11/22, se determinó la concentración de N-NO<sub>3</sub> en suelo. En cada unidad experimental se tomó una muestra compuesta de suelo con calador a profundidades de 0-7,5 cm y 7,5 a 15 cm. Cada muestra compuesta se conformó por 10 submuestras de suelo. El suelo muestreado se colocó en bolsas plásticas rotuladas, y fueron llevadas al laboratorio donde se las secó en un horno a 60 °C por 48 horas. Posteriormente se molieron en un molino de suelo y se determinó la concentración de N-NO<sub>3</sub> en suelo por medio de espectrofotometría.

Por otra parte, se determinó la cantidad de biomasa del rastrojo dejada por cada CS al momento de la siembra del maíz. Para ello se realizaron cortes de los restos secos con un cuadro metálico de 30 cm de lado, con un total de tres cortes por parcela. Las muestras de biomasa se llevaron al laboratorio, se secaron en horno a 60 °C por 48 horas, para luego ser pesadas y así determinar la cantidad de restos secos aportados por cada tratamiento. A los

restos ya procesados se los molió en un molino y fueron analizados para determinar el porcentaje de N en los rastrojos.

También se hicieron muestreos para determinar la humedad gravimétrica (HG) del suelo. En este caso, se tomaron muestras de suelo con taladro holandés a profundidades de 0-15 cm, 15-45 cm, 45- 60 cm. Las muestras de suelo se llevaron al laboratorio, se pesaron en húmedo y luego se colocaron en una estufa a 105 °C por 48 horas, para posteriormente pesarlas nuevamente en seco, determinando por diferencia el contenido de humedad de las muestras.

Se realizó por último el muestreo para determinar la resistencia a la penetración que presentaba cada parcela, para ello se utilizó un penetrómetro, con el cual se realizaron cinco repeticiones por parcela.

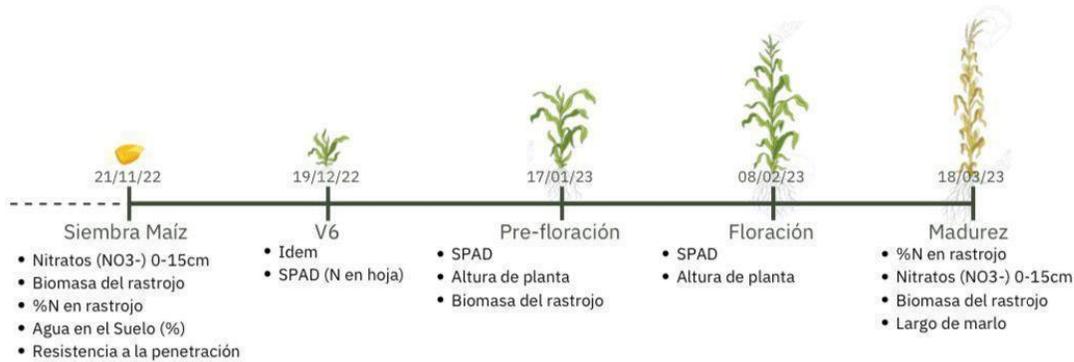
El 19/12/22 que corresponde a la etapa V6 del cultivo, se realizaron las mismas determinaciones que a la siembra del maíz, pero en adición se realizaron determinaciones de N en hoja por medio de un instrumento de medición denominado SPAD, más específicamente un Minolta-502. Este instrumento estima el contenido de N en hoja sin necesidad de cortar la misma. Las mediciones se realizaron en tres sectores de la última hoja totalmente expandida de la planta de maíz, en un total de 3 plantas por unidad experimental.

El tercer momento de muestreo se realizó en la etapa de prefloración el 17/01/23, donde se realizaron las mediciones ya mencionadas de biomasa de rastrojo y N en hoja con el SPAD, sumándose la determinación de altura de las plantas de maíz. Para esta última determinación, se midió la altura de todas las plantas encontradas en 2 m lineales de tres filas diferentes.

En floración, el 08/02/23, se midió N en hoja con el SPAD y altura de planta. Por último, en en madurez, el 18/03/23 se midió porcentaje de N en rastrojo, N-NO<sub>3</sub> de suelo en dos profundidades, biomasa de rastrojo y largo de marlos. Esta última medida tuvo como objetivo poder estimar el rendimiento obtenido con cada tratamiento ya que no se realizó la cosecha del cultivo de maíz. Las mediciones se tomaron en tres hileras de dos metros lineales, al igual que se realizó con las mediciones de altura de planta.

## Figura 2

Figura ilustrativa de las distintas mediciones recabadas en cada etapa



En la figura anterior (Figura 2) se presentan las mediciones que fueron llevadas a cabo en cada etapa del cultivo a modo de simplificar la información.

Cabe agregar que, para realizar los cálculos pertinentes para el análisis de los datos relacionados con la humedad en el suelo, se utilizaron los procedimientos que se detallan a continuación (Fernández, 1979). En primer lugar, HG se determinó con la siguiente fórmula:

$$HG (\%) = ((\text{Peso Fresco} - \text{Peso Seco}) / \text{Peso Seco}) * 100$$

A partir de los datos de HG y las características del suelo (porcentaje de MO, arena, arcilla y limo) se calculó el agua disponible (AD) en el suelo en el momento del muestreo, siendo esta la diferencia entre HG y el punto de marchitez permanente (PMP). Cabe aclarar que los datos de % MO, % arena, % arcilla y % limo que nos fueron proporcionados eran datos de las características de cada bloque y para cada profundidad analizada del perfil.

$$PMP = -58,1313 + 0,3718 * (\%MO) + 0,5682 * (\%Arena) + 0,6414 * (\%Limo) + 0,9755 * (\%Arcilla)$$

$$AD (\% \text{peso}) = HG - PMP$$

Una vez calculado el valor de AD a través de la fórmula anterior, el valor se encuentra expresado como porcentaje de peso, pero se buscó llevar dicho valor a milímetros (mm) con el fin de tener datos más fácilmente interpretables. Para ello, y como paso previo, se determinó la densidad aparente (dap) para expresar a el AD como porcentaje de volumen.

$$dap = 3.675 - 0.0531 * (\%MO) - 0.021 * (\%Arena) - 0.0228 * (\%Limo) - 0.0221 * (\%Arcilla)$$

$$AD (\% \text{ vol}) = AD (\% \text{ peso}) * d_{ap}$$

El AD en la unidad de porcentaje de volumen es equivalente a expresarlo como los mm de agua que hay en 10 cm de suelo, con esta relación se calcula el AD mm de un horizonte o perfil dado.

$$AD (\text{mm}) = (AD (\% \text{ vol}) * \text{espesor del horizonte (cm)}) / 10$$

Por último, se utilizó la siguiente ecuación para determinar la capacidad de campo (CC).

$$CC = 21,977 - 0,168 * (\% \text{ Arena}) + 2,601 * (\% \text{ MO}) + 0,127 * (\% \text{ Arcilla})$$

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

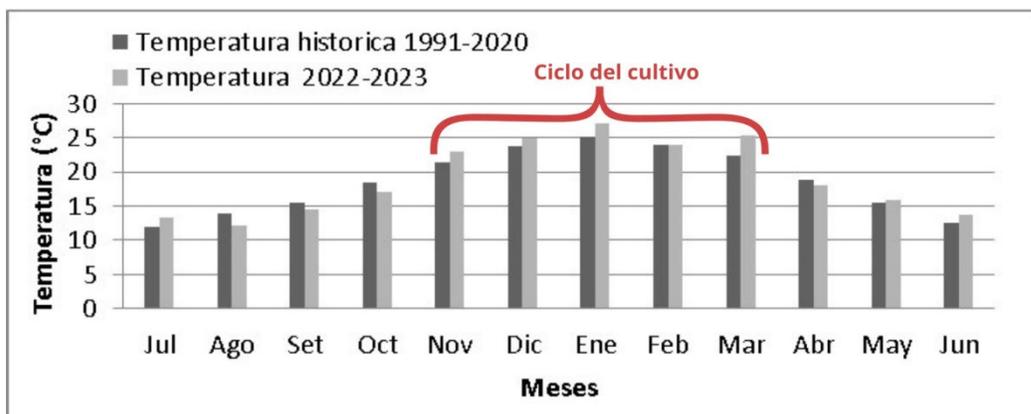
### 4.1 CARACTERIZACION CLIMATICA

#### 4.1.1 Temperatura

En la Figura 3 se presenta la temperatura media mensual del año bajo estudio (julio 2022 a junio 2023), obtenida de los registros de la estación meteorológica de la EEMAC (S. Álvarez, comunicación personal, 15 de marzo, 2024), y la temperatura promedio mensual de una serie histórica de 30 años del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET, s.f.) para el Departamento de Paysandú (1991 a 2020). En dicha figura puede observarse que, durante el ciclo de maíz, la temperatura media mensual durante ese periodo en cuestión (24,9 °C), fue superior a la temperatura media mensual histórica, estando en promedio durante esos meses 1,6 °C por encima (Figura 3), siendo febrero el único mes del ciclo el cual se encuentra por debajo de los datos históricos.

#### **Figura 3**

*Temperaturas mensuales medias en el periodo del experimento en comparación a los datos históricos*



*Nota.* Elaborado en base a datos de climatología 1991-2020 (INUMET, s.f.) y registros de estación meteorológica EEMAC 2022-2023 (S. Álvarez, comunicación personal, 15 de marzo, 2024).

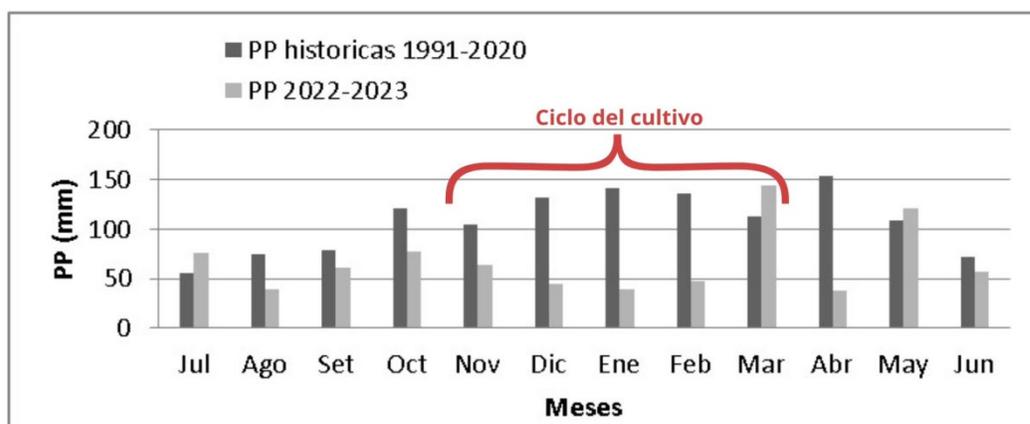
## 4.2 Precipitaciones

Las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo también fueron anormales en comparación con el registro histórico, 1991-2020 (INUMET s.f.) (Figura 4). El régimen de precipitaciones del ejercicio 2022-2023 obtenidos de la estación meteorológica de la EEMAC (S. Álvarez, comunicación personal, 15 de marzo, 2024), fueron inferiores a la media en casi todos los meses, esto se vio especialmente acentuado entre los meses de diciembre de 2022 a febrero de 2023, periodo en el cual se desarrolló el cultivo de maíz. Las precipitaciones ocurridas durante el año del ensayo sumaron 806 mm contrastando con la media histórica para la zona, 1291 mm por año. Durante los meses en los cuales transcurrió el desarrollo del maíz, estuvieron 46% por debajo de la norma.

Para las gramíneas las cuales presentaron el mayor periodo de barbecho (62 días) las precipitaciones alcanzaron los 140 mm y para las leguminosas con 36 días de barbecho, 116 mm, las cuales fueron adecuadas para que el cultivo disponga de una buena oferta hídrica en su primera etapa de crecimiento.

### Figura 4

*Precipitaciones mensuales en el periodo del experimento en comparación a los datos históricos (1991-2020)*



*Nota.* Elaborado en base a datos obtenidos de climatología 1991-2020 (INUMET, s.f.) y registros de estación meteorológica EEMAC 2022-2023 (S. Álvarez, comunicación personal, 15 de marzo, 2024).

### 4.3 EFECTOS DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE EL SUELO

#### 4.3.1 Nitratos en suelo y rastrojo

Al momento de la siembra, la *Vicia villosa* fue el CS que generó la mayor concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo (50 ppm) de 0 a 7,5 cm de profundidad, diferenciándose significativamente de los CS compuestos por avenas puras (promedio de 15 ppm) (Tabla 2). Sin embargo, para dicha profundidad no fue posible detectar diferencias significativas en la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo entre la *Vicia villosa*, con el *Lupinus angustifolius*, el barbecho químico (a su vez estos tampoco se diferenciaron de las avenas puras) ni con sus diferentes mezclas con avena (promedio 30.3 ppm).

El coeficiente de variación de la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en el primer estrato de suelo fue elevado (37,8%), lo que va en detrimento de encontrar mayores diferencias estadísticas. Sin embargo, en términos de magnitud, pudo observarse que las coberturas que incluyeron leguminosas resultaron en una mayor concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo al momento de la siembra que los CS de gramíneas puras.

En la profundidad de 7,5 a 15 cm de suelo, sí existieron diferencias, donde nuevamente la *Vicia villosa* pura fue el CS en el que generó la mayor concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo (17 ppm). Si bien no se diferenció estadísticamente con su mezcla con *Avena strigosa* (13 ppm), sí lo hizo con todos los otros CS y con el barbecho.

**Tabla 2**

N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en suelo, porcentaje, cantidad de nitrógeno, biomasa, y relación C:N del rastrojo a siembra

Especie	N-NO <sub>3</sub> suelo (ppm)		Rastrojo kg MS ha <sup>-1</sup>	N en Rastrojo		
	0-7,5 cm	7,5-15 cm		% N	Kg N ha <sup>-1</sup>	RelC:N
Vicia villosa	50a	17a	5727 a	2,4	137,5 ab	17
Av. Str. + Vicia vil.	41ab	13 ab	7912 a	1,98	156,7 a	21
Av. Byz.+ Vicia vil.	32ab	10 b	5830 a	1,82	106,1 abc	23
Lupinusang.	26ab	8b	9026 a	1,41	127,3 bc	30
Barbecho	22ab	10 b	5187 a	-	-	-
Av. strigosa	17b	7 b	7600 a	0,65	49,4 c	65
Av. byzantina	13b	5b	7685 a	0,95	73bc	44
<b>CV %</b>	<b>37,8</b>	<b>26,1</b>	<b>22,1</b>	-	<b>23,2</b>	-

Nota. CV = Coeficiente de variación; MSD = Mínima diferencia significativa.

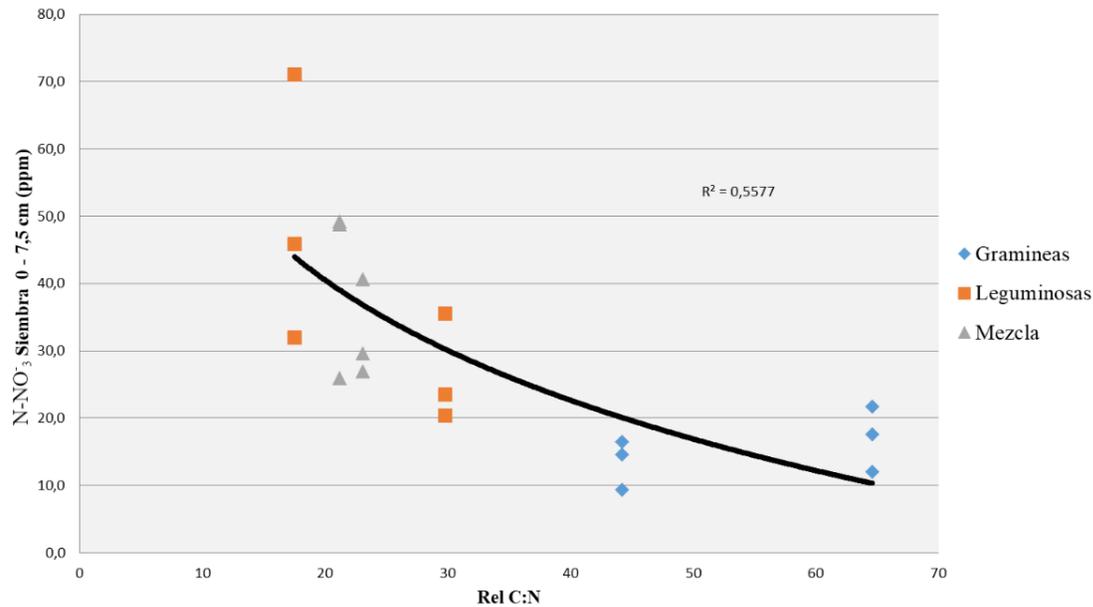
Si bien en otros trabajos se han encontrado diferencias significativas en la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (en el primer estrato), entre la *Vicia villosa* y barbecho (Boccolini et al., 2013), los valores absolutos cuantificados en este experimento, a pesar de no ser significativos, también muestran esta tendencia (22 ppm contra 50 ppm en barbecho y *Vicia villosa* respectivamente). Por otra parte, hay que destacar la buena fertilidad del suelo, ya que el tratamiento bajo barbecho, a pesar de no tener aportes de N por parte de un CS ya sea por FBN en caso de leguminosas o reciclaje de N por parte de las gramíneas, logró acumular valores (22 ppm) similares e incluso superiores a algunos de los tratamientos como el *Lupinus angustifolius* (26 ppm), la *Avena strigosa* y *Avena byzantina* (17 ppm y 13 ppm respectivamente).

La concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en suelo a la siembra presentó una correlación negativa con la relación C/N del rastrojo del CS (Figura 5). Los CS de gramíneas puras fueron los que tuvieron mayor relación C/N en su rastrojo, repercutiendo en menor concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en suelo a siembra. Interpretamos este resultado como el producto de una lenta liberación del nutriente. Es esperable que los CS de leguminosas puras presenten menor relación C/N en su rastrojo, sin embargo, sin tener en cuenta a la *Vicia villosa* los cultivos

mezclas fueron los que obtuvieron menor relación, provocando una mayor concentración de  $N-NO_3^-$  en suelo. Esto depende de la productividad de las especies que componen la mezcla. Cuanto menor sea la relación C/N del rastrojo habrá mayor posibilidad de encontrar niveles altos de  $N-NO_3^-$  a siembra.

### Figura 5

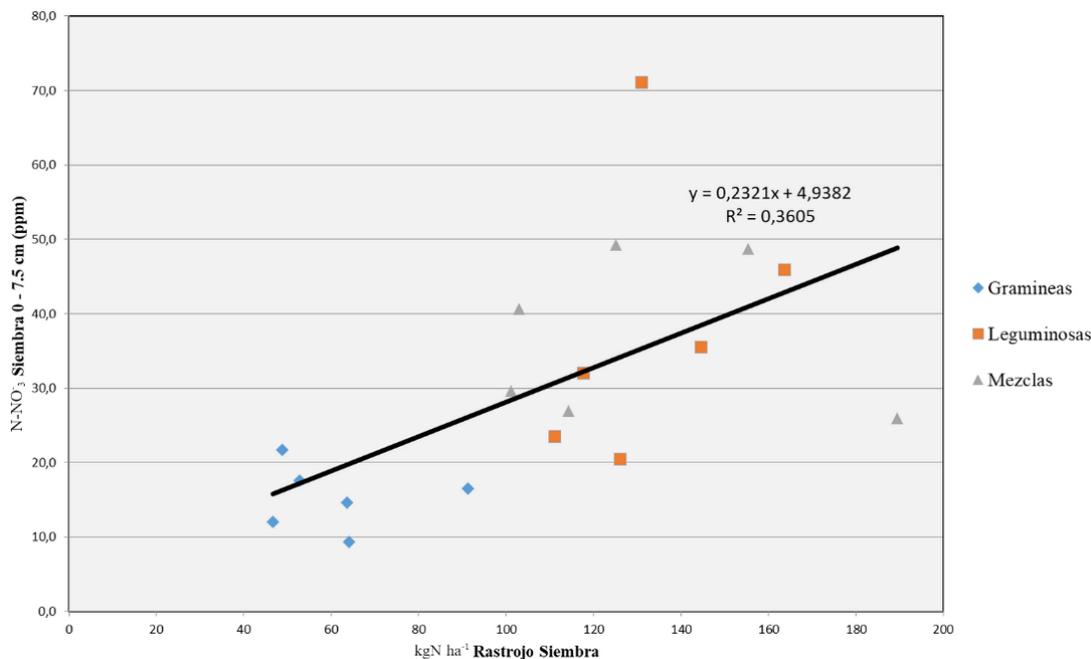
Relación entre  $N-NO_3^-$  a la siembra de maíz (0-7,5 cm) y relación C/N del CS



Esto también se puede ver reflejado en la relación entre  $N-NO_3^-$  a siembra del cultivo de maíz y los kg de N en rastrojo del CS a siembra del cultivo de renta (Figura 6). Los CS compuestos por gramíneas son los que aportaron menor concentración de  $N-NO_3^-$  al suelo para la siembra del cultivo de renta. Por tanto, a mayor concentración de N en rastrojo mayor probabilidad de encontrar  $N-NO_3^-$  en suelo a la siembra del cultivo siguiente.

**Figura 6**

Relación  $N-NO_3$  a la siembra de maíz (0-7,5 cm) y  $kgNha^{-1}$  del rastrojo de cada CS



En cuanto a la cantidad de rastrojo encontrado al momento de la siembra, V6 y en prefloración, los diferentes CS y el barbecho químico no se diferenciaron estadísticamente entre sí, en ninguno de esos tres momentos (Tabla 2, 3 y 4).

La falta de diferencias en la cantidad de rastrojo dejada por los diferentes tratamientos no coincide con lo mencionado por Salvagiotti et al. (2013), quienes remarcan que es esperable encontrar una mayor cantidad de rastrojo en CS de gramíneas tanto puras como en mezclas, dada su alta producción de biomasa. Una de las causas de esto es que como se mencionó en materiales y métodos, las leguminosas fueron suprimidas 27 días después que las gramíneas, permitiendo mayor crecimiento y generación de biomasa. Una función de los CS es el control de la erosión, con relación a esto Álvarez et al. (2023) establecen que a modo general para que un CS sea eficiente a la hora de mantener el suelo cubierto con el fin de reducir el riesgo de erosión, su producción durante todo el ciclo debe rondar las 4 Mg MS  $ha^{-1}$ . En este sentido, en la Tabla 2 se puede observar que a la siembra del maíz todos los tratamientos presentaron valores superiores al objetivo planteado.

A diferencia con la siembra, en V6 ya no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en la concentración de N-NO<sub>3</sub> en suelo de 0-7,5 cm de profundidad (Tabla 3), presentando un coeficiente de variación elevado (36.2%). De todas formas, se puede distinguir una tendencia a que los tratamientos que mejor se comportaron son los que incluyen leguminosa, destacándose las mezclas de *Vicia villosa* + *Avena strigosa* con 55 ppm y la *Vicia villosa* + *Avena byzantina* con 49 ppm. Sin embargo, de 7,5 a 15 cm, la *Vicia villosa* pura y sus mezclas presentaron diferencias significativas resultando las mayores concentraciones de N-NO<sub>3</sub> en suelo (promedio 16,7 ppm; sin diferencias entre ellas), diferenciándose estadísticamente de las avenas puras (promedio 6,5 ppm; sin diferencias entre ellas) que presentaron las menores concentraciones. En tanto el *Lupinus angustifolius* y el barbecho químico quedaron con concentraciones intermedias (11 ppm), sin diferenciarse entre sí, ni con los otros tratamientos.

**Tabla 3**

N-NO<sub>3</sub> en suelo, porcentaje, cantidad de nitrógeno, biomasa, y relación C:N del rastrojo a V6

Especie	N-NO <sub>3</sub> suelo (ppm)		Rastrojo kg MS ha <sup>-1</sup>	N en Rastrojo		
	0-7,5 cm	7,5-15 cm		% N	Kg N ha <sup>-1</sup>	RelC:N
<i>Vicia villosa</i>	47a	19a	6758 a	2,2	112,9 ab	25
Av. Str. + <i>Vicia vil.</i>	55 a	16a	8182 a	2,31	189,0 a	18
Av. Byz. + <i>Vicia vil.</i>	49a	15 a	7868 a	2,43	191,2 a	17
<i>Lupinusang.</i>	38a	11 ab	7411 a	0,96	71,1 b	44
Barbecho	36a	11 ab	5211 a	-	-	-
Av. strigosa	16a	6 b	7571 a	0,63	47,7 b	67
Av. byzantina	12 a	7 b	6044 a	1,01	61 b	42
<b>CV%</b>	<b>36,2</b>	<b>22,7</b>	<b>23,36</b>	-	<b>25</b>	-

*Nota.* CV = Coeficiente de variación; MSD = Mínima diferencia significativa.

Con respecto a la concentración de N en el rastrojo se encontró significancia, siendo las mezclas las que presentaron los mejores valores, no diferenciándose estadísticamente de la *Vicia villosa*, la cual tampoco se diferencia de los otros tratamientos. Los resultados son coincidentes con lo mencionado por Cazorla et al., (2013), quienes afirman que los CS compuestos por gramíneas puras generan una disminución de los contenidos de  $N-NO_3^-$  producto de la inmovilización. Como fue resaltado en la bibliografía (Perdomo & Barbazán, 2008), el punto donde se comienza a dar la inmovilización neta se encuentra en valores superiores a 33/1 de la relación C/N. En este sentido, se puede afirmar que en V6 existió inmovilización de N en los tratamientos de avena pura, dado su alta relación C/N, 67/1 en el caso de *Avena strigosa*, 42/1 para la *Avena byzantina*, lo mismo ocurrió con el *Lupinus angustifolius* el cual presentó valores de 44/1. Por su parte con los otros tratamientos y dada su menor relación C/N se dio un equilibrio entre la mineralización y la inmovilización al encontrarse con valores entre 15-25/1.

A su vez, también se puede distinguir que la cantidad de  $N-NO_3^-$  en el suelo, disminuyó con profundidad de muestreo e incrementó con el transcurso del tiempo. Este incremento lo atribuimos a la liberación de N desde los rastrojos, pero también como resultado de la baja demanda y absorción de N por parte del cultivo de maíz. Bajo condiciones de escasas precipitaciones el crecimiento se vio reducido, acumulándose progresivamente en el suelo.

Es de interés agronómico no solo la producción de MS sino también la composición de la misma, más precisamente la concentración de N, ya que luego de suprimir el cultivo, las leguminosas liberan N al suelo con una tasa mayor que las gramíneas (Gill & Vear, 1965). A su vez las gramíneas aportan estructura al suelo, pero seguramente, dada su alta relación C:N, inmovilicen N cuando se durante el proceso de descomposición (Griffin & Hesterman, 1991; Reeves et al., 1993). En este sentido, la principal variable que explica las diferencias en la concentración de N presente en los rastrojos es la presencia de leguminosas. Para el caso de las gramíneas son estas las que contienen menor contenido de N y los aportes del rastrojo de estos tratamientos es el N propio del sistema, que está en reciclaje. Los CS evaluados fueron capaces de reciclar  $48 \text{ kgNha}^{-1}$  para *Avena strigosa* y  $61 \text{ kgNha}^{-1}$  ha para

*Avena byzantina*. Esta menor oferta de N y de más lenta liberación, en comparación con las leguminosas, dificulta las pérdidas por lixiviación ante la ocurrencia de precipitaciones.

Por otro lado, no se evidenció que el efecto residual de un CS provoque una menor disponibilidad de  $N-NO_3^-$  a siembra del cultivo de renta, ya que no hubo diferencias entre barbecho y el resto de los tratamientos. Se puede distinguir una tendencia hacia los tratamientos que contienen leguminosas, siendo estos desde el primer momento de muestreo hasta la madurez los que presentaron el mayor aumento de los  $N-NO_3^-$  en el suelo. Sin embargo, al final del ciclo del cultivo (Tabla 4) no se puede establecer que CS obtuvo mayor concentración de  $N-NO_3^-$  en suelo ya que no existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $p \leq 0.05$ ). En promedio y a las dos profundidades, los  $N-NO_3^-$  aumentaron un 20% desde siembra a V6 y casi un 30% desde V6 hasta madurez.

Con el correr de los años y con un sistema de agricultura continua en mayor o menor medida se va extrayendo N, y disminuyendo entonces su pool en el suelo. Aquí es donde se marca la ventaja de la leguminosa como CS en un esquema de agricultura continua. La tendencia, en los datos obtenidos, marca que los CS de leguminosas tanto en mezcla como pura obtuvieron las mayores concentraciones de N en rastrojo superando el 2%. Cuanto mayor sea el aporte de este nutriente y menor sea la relación C/N, el nivel de N en suelo será mayor y de más rápida liberación al sistema.

#### **Tabla 4**

*$N-NO_3^-$  según estrato de suelo a madurez y biomasa de rastrojo en prefloración*

Etapa	Madurez		Prefloracion
	N-NO <sub>3</sub> suelo (ppm)		Rastrojo
Especie	0-7,5 cm	7,5-15 cm	kg MS ha <sup>-1</sup>
Vicia villosa	75a	26a	5648 a
Av. str. + Vicia vil.	70a	22a	8108 a
Av. byz. + Vicia vil.	55a	15 a	5997 a
Lupinus ang.	60 a	23a	6964 a
Barbecho	52a	26 a	3145a
Av. strigosa	15 a	5 a	6822 a
Av. byzantina	16a	6 a	5228a
<b>CV%</b>	<b>46,1</b>	<b>46,1</b>	-

*Nota.* CV = Coeficiente de variación; MSD = Mínima diferencia significativa.

Como fue evaluado por Rimsky-Korsakov et al. (2015), es esperable que los CS que contienen leguminosa resulten en una mayor disponibilidad de N-NO<sub>3</sub> en suelo, pero esto en el ensayo sólo es observable en la etapa de siembra para ambas profundidades y en V6 solo en el rango de 7,5-15 cm. Como ya fue mencionado una de las posibles causas de que no exista significancia puede ser el elevado coeficiente de variación que presentó el experimento, el cual puede provenir de una mala implantación del cultivo de maíz, falta de agua u otro factor externo. Independientemente de la fecha de muestreo, para la mayoría de las mediciones el rastrojo de las gramíneas puras son los que presentaron menor concentración de N-NO<sub>3</sub> en el suelo, y a su vez es donde se puede esperar según Cazorla et al., (2013), mayor respuesta a la fertilización. Este problema puede ser solucionado, como menciona Gliessman (2002), con la inclusión de leguminosas ya que las mismas producen gracias a la FBN un aumento en la concentración de N-NO<sub>3</sub> del suelo que podrá ser utilizado por el próximo cultivo. En este aspecto, los CS que incluyen leguminosas fueron en varias ocasiones las que presentaron mayores concentraciones de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, explicado porque se descomponen más rápido en comparación con las gramíneas, a causa de la menor relación C/N de las primeras. Por último, para la madurez del maíz no existieron diferencias entre tratamientos para ningún estrato del suelo.

Otro de los objetivos de los CS, además de disminuir las pérdidas de suelo por erosión, es absorber el N del suelo (o fijarlo a través de FBN) para dejarlo disponible al cultivo de renta. Para ello es importante sincronizar la oferta de N por parte del CS, a través de la degradación de su rastrojo, con la demanda del cultivo sucesor. La concentración de  $\text{N-NO}_3^-$ , al momento de la siembra, fue superior al nivel crítico para el maíz (14-15 ppm) para todos los tratamientos con excepción de la *Avena byzantina*, la cual reflejó una concentración de 13 ppm. Es por esta razón que el cultivo de maíz no debería presentar mayores limitantes en términos de la nutrición nitrogenada. Sin embargo, como fue mencionado en la bibliografía, los excesos de nitrógeno (como en el caso de los tratamientos que presentaron leguminosas) combinados con las escasas precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo pueden aumentar los riesgos de lixiviación ante la posible ocurrencia de precipitaciones (Serra & Del Campo, 2017). Como se puede observar (Tabla 4 y Figura 4). Estas condiciones fueron las que se presentaron en este experimento, donde se hallaron, producto de la baja absorción por parte del cultivo, altos valores de  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo que fueron consecuencia de una baja tasa de crecimiento causada por las grandes limitantes hídricas y que se vio acompañado por altas precipitaciones al final del desarrollo del cultivo, período que además coincide naturalmente con bajos valores de absorción por parte del cultivo. Es por lo que la elección de la especie como CS cumple un rol fundamental a la hora de evaluar los servicios ecosistémicos. Por ejemplo, en un año con primavera-verano secos la mejor opción será elegir un CS gramínea para lograr una rápida producción de biomasa y que su rastrojo permanezca en el tiempo (alta relación C/N) para conservar el agua acumulada y controlar la erosión a la vez que disminuye las pérdidas de N por lixiviación. El tiempo de barbecho debe ser largo y encontrarse entre 20 a 40 días (Álvarez et al., 2023).

#### 4.3.2 Resistencia a la penetración

Al momento de la siembra del maíz, los tratamientos no se diferenciaron significativamente ( $p > 0.05$ ) en resistencia a la penetración (RP) a ninguna de las profundidades evaluadas (Tabla 5).

**Tabla 5**

*Resistencia a la penetración para cada tratamiento de CS en distintas profundidades a siembra (kPa)*

Especie/Profundidad	0- 7,5 cm	7,5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm
Vicia villosa	822 a	848 a	977 a	1314 a
Av. str. + Vicia vil.	703 a	779 a	883 a	1083 a
Av. byz. + Vicia vil.	793 a	1069 a	1424 a	1673 a
Lupinus ang.	690 a	793 a	923 a	1103 a
Barbecho	734 a	867 a	980 a	1147 a
Av. strigosa	756 a	924 a	790 a	868 a
Av. byzantina	676 a	770 a	863 a	1041 a

En contraposición con lo anterior hubiese sido esperable, como mencionan Álvarez et al. (2020), que las gramíneas dada la mayor producción de biomasa radicular con raíces fibrosas y ampliamente ramificadas presenten los menores valores de resistencia a la penetración. Siendo estas las más utilizadas cuando el objetivo es la descompactación del suelo.

En modo general, la tabla muestra que para la mayoría de los tratamientos y profundidades de muestreo no se superó el valor establecido por Etchegoimberry (2019), de 1300 kPa para los primeros 30 cm del perfil, a partir del cual se comienza a observar una reducción en el crecimiento radicular. Por lo tanto, se puede inferir que esta propiedad no fue una limitante para el cultivo de maíz. A pesar de que *Avena byzantina* + *Vicia villosa* superaron el umbral anterior, lo hace por debajo de los 30 cm, y además no llegan a valores estrictamente limitantes para el crecimiento radicular (2100 kPa) (Threadgill, 1982).

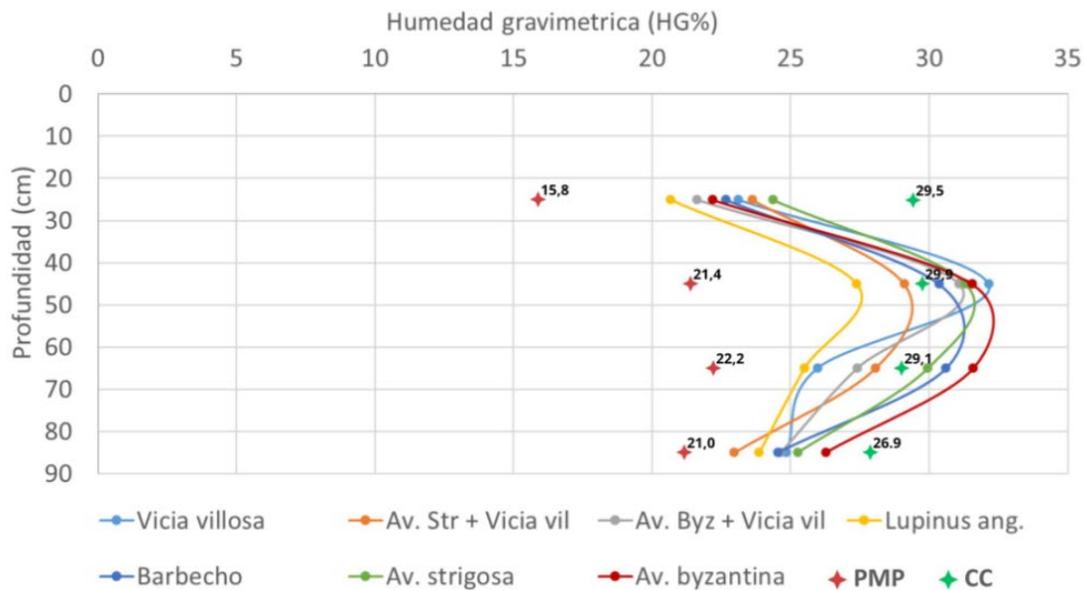
### 4.3.3 Contenido de agua en el suelo

Tanto a la siembra del maíz, como a V6, los CS no generaron diferencias significativas en el contenido de humedad del suelo (HG), en ninguna de las profundidades evaluadas (Figura 7).

Las precipitaciones ocurridas durante los 30 días de barbecho (Figura 4) fueron menores a las del promedio histórico, pero lograron recargar el perfil del suelo (Figuras 7 y 8). Todos los manejos obtuvieron contenidos HG por encima del PMP.

#### **Figura 7**

*Humedad gravimétrica (%) a distintas profundidades en el momento de siembra*

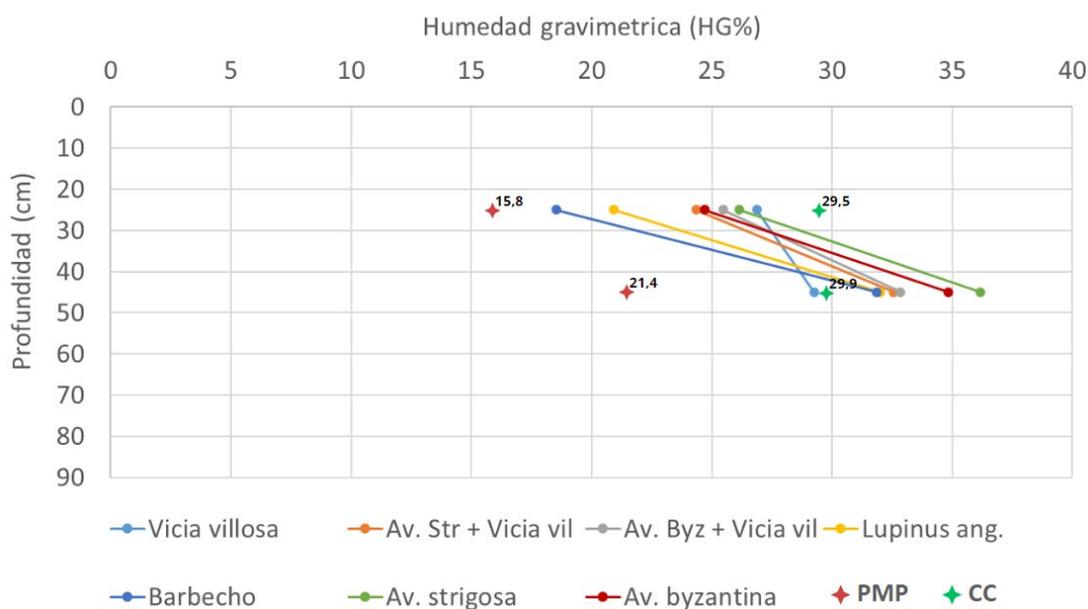


Al momento de la siembra, el menor contenido de HG se dio en los primeros 25 cm del suelo (Figura 7), pudiendo estar explicado por una mayor evaporación en relación con estratos más profundos. Aun así, el primer estrato de profundidad presentó (promedio de todos los tratamientos) un 61% del máximo contenido de agua disponible capaz de almacenar el suelo en esos centímetros. Ya entre los 25 y 65 cm, en términos generales, el contenido de HG bajo los diferentes CS se aproxima a la capacidad de campo, aproximándose así al 100% de agua disponible.

Considerando que las características del suelo son similares para todos los tratamientos, las diferencias en cuanto a HG y agua disponible en los diferentes estratos de profundidad del suelo deberían estar dadas por el consumo de agua realizado previamente por los CS y/o las características de su rastrojo, que podrían afectar diferencialmente la evaporación en superficie. Sin embargo, como ya fue mencionado, los tratamientos no generaron diferencias en contenido de agua, lo que puede estar explicado por las precipitaciones ocurridas en los 30 días anteriores a la siembra del maíz (133 mm), lo que habría recargado de agua al perfil del suelo y homogeneizado la misma bajo los diferentes tratamientos. Según Ernst y Bentancur (2004), si dichas precipitaciones no hubiesen ocurrido tan cercanas a la fecha de siembra, hubiese sido esperable encontrar un barbecho con mayor porcentaje de humedad debido a la inexistencia de un CS que haya consumido el agua durante el invierno.

### Figura 8

*Humedad gravimétrica (%) a distintas profundidades en la etapa de V6*



En V6, los primeros 25 cm de suelo presentaban (en promedio de todos los tratamientos) un 74% del máximo del agua disponible para ese estrato (Figura 8). Comparando con los niveles de HG encontrados a la siembra, en la mayoría de los tratamientos se mantuvo o se aumentó el contenido de HG del suelo. Ya en el siguiente

estrato, el contenido de agua, en términos promedios fue mayor a la capacidad de campo, indicando un alto contenido de agua en el suelo (todos los microporos llenos de agua).

Cuando se analizó el promedio de todos los tratamientos para las mismas profundidades (0-25 cm y 25-45 cm) desde siembra (Tabla 5) a V6 (Tabla 6), se puede observar que el AD del suelo aumentó un 16%. Esto puede deberse al efecto conjunto entre el efecto cobertura, el cual pudo haber evitado las pérdidas de agua por evaporación y las precipitaciones ocurridas en dicho periodo (50mm), pudieron hacer una recarga del perfil, y compensar las pérdidas de agua por evapotranspiración por parte del cultivo de maíz. Esta hipótesis puede apoyarse en lo mencionado por Pacheco Seguí et al. (2011), y que se ajusta a lo observado en el ensayo donde el comportamiento del barbecho en V6, a pesar de no ser significativo presentó el menor contenido de AD (8.8 mm) y HG (Figura 8) en superficie explicado por la mayor tasa de evaporación que sufrió el tratamiento producto de no haber tenido un CS que aportase rastrojos en superficie y demostrando de cierta forma la contribución de la cobertura en el control de la evaporación (Tabla 6).

Como se puede contemplar (Tabla 5 y 6) tampoco existieron diferencias en el AD en el suelo tanto para el muestreo en la siembra como en el estadio V6.

**Tabla 6***Agua disponible en suelo según profundidad a la siembra*

Especie	0-25 cm	25-45 cm	45-65 cm	65-85 cm	0-85 cm
Vicia villosa	23,7 a	29,1 a	10,3 a	11 a	74,1 a
Av.str.+Vicia vil.	23,9 a	20,8 a	16,2 a	5,6 a	66,5 a
Av.Byz.+Vicia vil.	18,9 a	26,2 a	14,3 a	10,4 a	69,8 a
Lupinus ang.	15,8 a	16,2 a	9,0 a	8,2 a	49,2 a
Barbecho	22,2 a	24,2 a	23,2 a	10,1 a	79,7 a
Av. strigosa	26 a	29,1 a	20,8 a	10,8 a	86,7 a
Av. Bizantina	20,7 a	27,5 a	25,9 a	15,0 a	89,1 a
<b>CV</b>	<b>30,1</b>	<b>32,7</b>	<b>52,4</b>	<b>82</b>	<b>---</b>

*Nota.* CV = Coeficiente de variación.

**Tabla 7***Agua disponible en suelo según profundidad a V6*

Especie	0-25 cm	25-45 cm	0-45 cm
Vicia villosa	36,0 a	21,2 a	57,2 a
Av. str. + Vicia vil.	27,7 a	30,2 a	57,9 a
Av. byz. + Vicia vil.	31,4 a	31,0 a	62,4 a
Lupinus ang.	16,7 a	28,7 a	45,4 a
Barbecho	8,8 a	28,3 a	37,1 a
Av. strigosa	35,3 a	33,4 a	68,7 a
Av. byzantina	28,9 a	36,4 a	65,3 a
<b>CV</b>	<b>66</b>	<b>48</b>	<b>---</b>

*Nota.* CV = Coeficiente de variación.

El agua disponible del suelo en un momento dado depende de factores intrínsecos al mismo, como la textura, el contenido de MO y la profundidad de enraizamiento, pero también intervienen factores climáticos como las precipitaciones y la demanda atmosférica entre otros. La disponibilidad está determinada entonces, por el balance final entre el agua que efectivamente es captada por el suelo proveniente de las precipitaciones, y el agua que es evaporada desde el suelo y transpirada por la cobertura vegetal (Letey, 1985).

El contenido de agua que presentó el suelo entre las etapas de siembra y V6 no parece haber resultado en una limitante para el desarrollo del maíz, siendo posterior a este periodo donde el déficit hídrico afectó realmente el ciclo del cultivo. Si bien el maíz es sensible al déficit hídrico en estado vegetativo, superado el estrés, la planta puede recuperar área foliar antes de llegar al periodo crítico (floración) y así lograr altas tasas de crecimiento (Abrecht & Carberry, 1993; Eck, 1986; Griffin & Hesterman, 1991; Stegman, 1982). El rendimiento se ve afectado de forma más grave si sucede en etapas reproductivas (Payero et al., 2009 como se cita en Giménez, 2017) registrando pérdidas de hasta un 50% (Andrade & Gardiol, 1995, como se cita en Giménez, 2017). Según información reportada por diversos autores, el consumo potencial de agua en maíz puede variar entre 500 a 800 mm (Çakir, 2004; Giménez & García Petillo, 2011; Otegui, 1992 como se cita en Giménez, 2017). Suponiendo que todo el perfil a la siembra se encontraba a CC (103 mm de AD) y que de todas las precipitaciones ocurridas durante el ciclo (200 mm), el 100% fue capaz de infiltrar en el suelo, el cultivo habría tenido disponible 303 mm de agua para llevar a cabo su desarrollo, valor muy por debajo del mínimo (500 mm) necesario para poder tener un desarrollo adecuado. En adición a esto las lluvias registradas entre prefloración y floración (periodo crítico) rondaron los 40 mm.

#### 4.4 EFECTO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE MAÍZ

Se encontraron diferencias significativas entre CS para implantación, altura de planta y SPAD en prefloración y floración. No hubo diferencias significativas para el efecto fertilización sobre ninguna de las variables cuantificadas (Tabla 8).

**Tabla 8**

*Resumen de significancia según efecto cultivo de cobertura, efecto fertilización e interacción*

Medición	Etapa	Efecto CS	Efecto N	Interacción CS/N
Implantación	V6	*	---	---
SPAD	V6	ns	ns	ns
SPAD	Prefloración	*	ns	ns
Altura	Prefloración	*	ns	ns
SPAD	Floración	*	ns	ns
Altura	Floración	*	ns	ns
Largo de Marlo	Madurez	ns	---	---

*Nota.* \* = Significativo, ns = No Significativo, --- = No se tomaron datos diferenciando fertilización.

Una de las posibles causas de que no exista un efecto de la fertilización, es que el contenido de  $N-NO_3^-$  en suelo ya era elevado (por encima del nivel crítico), lo que determinó que el N no fuese una limitante para el cultivo. Por lo cual las variaciones en la dosis de N no expresaron cambios en los resultados de las mediciones. Dicho esto, a continuación, se analizaron promedios de las distintas coberturas sin discriminar por dosis de fertilizante ya que no existieron diferencias.

**Tabla 9**

*Resumen de mediciones realizadas sobre el cultivo de maíz sin discriminar por dosis de fertilización*

Medición Unidad Especie/Etapa	Implantación pl/ha	SPAD			Altura		Largo de marlo
		Unidades de SPAD			m		cm
		V6	Prefloración	Floración	Prefloración	Floración	Madurez
Vicia	26709 <b>b</b>	57,6 <b>a</b>	37,09 <b>ab</b>	38,50 <b>abc</b>	1,32 <b>ab</b>	1,31 <b>ab</b>	6,39 <b>a</b>
Av. Strigosa+Vicia	28846 <b>b</b>	56,33 <b>a</b>	39,84 <b>ab</b>	42,23 <b>a</b>	1,50 <b>a</b>	1,50 <b>a</b>	7,63 <b>a</b>
Av. Bizantina+Vicia	30983 <b>ab</b>	56,03 <b>a</b>	44,12 <b>a</b>	41,65 <b>ab</b>	1,34 <b>ab</b>	1,44 <b>a</b>	9,07 <b>a</b>
Lupino	39529 <b>ab</b>	55,49 <b>a</b>	35,73 <b>b</b>	34,15 <b>c</b>	1,21 <b>b</b>	1,11 <b>b</b>	5,85 <b>a</b>
Barbecho	29915 <b>ab</b>	54,73 <b>a</b>	41,80 <b>ab</b>	40,31 <b>ab</b>	1,36 <b>ab</b>	1,41 <b>a</b>	9,37 <b>a</b>
Av. Strigosa	52350 <b>a</b>	53,27 <b>a</b>	35,91 <b>b</b>	36,64 <b>bc</b>	1,37 <b>ab</b>	1,47 <b>a</b>	10,12 <b>a</b>
Av. Bizantina	43803 <b>ab</b>	53,33 <b>a</b>	39,80 <b>ab</b>	36,70 <b>bc</b>	1,38 <b>ab</b>	1,50 <b>a</b>	9,84 <b>a</b>

#### 4.4.1 Implantación

En promedio la población lograda fue de 36000 pl ha<sup>-1</sup> sin embargo la población objetivo fue de 55000 pl ha<sup>-1</sup>. Por otro lado, no se pudo distinguir una tendencia clara entre la variable y el CS (leguminosa o gramínea). Los peores tratamientos fueron los de *Vicia villosa* pura y su mezcla con *Avena strigosa* (Tabla 9). Es esperable que luego de CS compuestos por gramíneas resulten en una menor implantación del cultivo de renta por su alta producción de biomasa, lo que dificulta el correcto crecimiento inicial y su alta relación C/N que repercute en una lenta degradación de su rastrojo en el periodo supresión del CS y siembra cultivo de renta. Sin embargo, no cuantificamos este efecto, la *Avena strigosa* pura corresponde a una de las mejores implantaciones (52350 pl ha<sup>-1</sup>).

#### 4.4.2 SPAD

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de cobertura para V6, pero sí en la etapa de prefloración y floración (Tabla 9). En cuanto a los tratamientos de fertilización, no se encontró ninguna correlación entre el aumento en las dosis y las unidades de SPAD. El promedio de todos los CS para 0 kg N ha<sup>-1</sup> fue de 38,1, para 40 kg N ha<sup>-1</sup> fue de 39 y para 80 kg N ha<sup>-1</sup> fue de 39,7 unidades de SPAD, resultando no significativo, es por esto que se puede afirmar que no existió un efecto fertilización. Así mismo existió un efecto CS antecesor, donde el *lupinus angustifolius* logró los peores resultados, y que las mezclas (*Avena byzantina* + *Vicia villosa* y *Avena strigosa* + *Vicia villosa*) fueron las que mejor se comportaron en los tratamientos que fueron fertilizados.

La medición de clorofila o SPAD (Soil Plant Analysis Development) da un gran aporte acerca del estado nutricional del cultivo. Su valor se basa en la diferencia entre luz roja y luz infrarroja a través de la hoja y puede estar afectado por factores como: año, etapa de desarrollo del cultivo, posición de la hoja, entre otros (Yuan et al., 2016). Es esperable encontrar valores altos de SPAD en los tratamientos fertilizados en comparación a los no fertilizados ya que está altamente correlacionado con la concentración foliar de N (Turner & Jund, s.f., como se cita en Pocojeski et al., 2012). La misma tendencia se debería encontrar en los CS con antecesor leguminosa.

#### 4.4.3 Altura de plantas

Según Otegui (2023), la altura máxima de planta (entrenudos completamente alargados) y el índice de área foliar máximo se logra alrededor de floración. Esto coincide con lo muestreado ya que en promedio los tratamientos no varían de gran manera su altura desde prefloración a floración. Solo en los fertilizados con 80 kg N ha<sup>-1</sup>, la altura aumentó 10 cm en promedio, pero no es significativo.

Tanto en floración como en prefloración se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 9). No hay una tendencia clara hacia cuál tratamiento se comportó con mayor altura, pero si se puede decir que el antecesor *Lupinus angustifolius* no tuvo un buen comportamiento en prefloración y bajo todas las dosis en floración. A pesar de

que no sucede en este ensayo, es esperable encontrar mayores alturas de plantas a medida que aumenta la dosis de N.

#### 4.4.4 Largo de la espiga

No existieron diferencias significativas en cuanto al largo de espiga entre los tratamientos (Tabla 9).

## 5 CONCLUSIONES

Las características climáticas del año fueron, con temperaturas levemente por encima de la media histórica y precipitaciones muy por debajo de la media histórica durante todo el ciclo del cultivo, no permitieron el normal desarrollo del cultivo de maíz, provocando una alta variabilidad en los resultados y generando pérdida total del rendimiento en grano.

Se encontraron diferencias significativas en implantación de maíz a pesar de no haber diferencias en biomasa de rastrojo de las coberturas, resultando la misma muy errática entre los tratamientos.

En los niveles de  $N-NO_3$  en el suelo al momento de la siembra del cultivo de maíz difirieron entre CS, lográndose los mayores aportes por leguminosas puras, seguido por las mezclas de gramíneas y leguminosas y los menores aportes de los CS gramíneas.

La medición de la concentración de N en rastrojo evidenció diferencias significativas tanto en siembra como en V6. Los tratamientos que presentaron menor % de N fueron los que presentaron mayor relación C/N en su rastrojo a siembra (CS gramíneas puras). La *Avena strigosa* presentó una relación C/N de 65 en siembra y 67 V6, a su vez la *Avena byzantina* una relación de 44 en siembra y 42 en V6. Sin embargo, *Vicia villosa* pura tuvo una relación de 17 en siembra y 25 en V6.

En cuanto a HG y resistencia a la penetración del suelo y la respuesta del cultivo de maíz al CS y a la fertilización nitrogenada, no fue posible obtener conclusiones relevantes, ya que quedaron condicionadas por las condiciones climáticas de la zafra en evaluación. No obstante, se destaca que, con 130 mm de lluvia durante el período de barbecho (30 días), se logró recargar el perfil del suelo de manera independiente del CS utilizado.

En síntesis, en un año donde el nitrógeno no fue un problema y las mayores limitantes se vieron marcadas por las condiciones climáticas, el manejo diferencial en la fecha de supresión de los CS fue el factor que determinó las mayores diferencias entre los resultados. Este mayor tiempo de barbecho, permitió por un lado mayor tiempo de recarga del perfil y por otro menor consumo de agua por parte del CS. Por último, el historial de chacra, el cual

viene de años de pasturas y posterior cultivo de soja, en adición al año seco que provocó un aumento en la concentración de nitratos en suelo, provocaron el efecto de enmascarar los beneficios que podrían haber aportado las leguminosas en un año promedio.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Abrecht, D. G., & Carberry, P. S. (1993). The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Research*, 31(1-2), 55-69. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90050-W](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90050-W)
- Ahunchain Crusich, J., Felló Rivero, L., & Soba Bentancur, M. (2022). *Cobertura del suelo, captura y uso de la radiación y el agua, por vicia y centeno como antecesores de soja* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/32807>
- Allen, G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO.
- Altamirano, A., Da Silva, H., Duran, A., Echeverría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol. 1. Clasificación de suelos del Uruguay*. MGAP.
- Álvarez, C., Fernández, R., Rillo, S. N., Frasier, I., & Quiroga, A. R. (2020). ¿Cuándo, para qué y cómo usamos un cultivo de cobertura? En J. Cruz & J. A. Garay (Eds.), *Cultivos de cobertura en San Luis* (pp. 1-7). INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/8600>
- Álvarez, S., Siri-Prieto, G., Rey, L., Abbate, S., Ernst, O., Piñeiro, G., & Dabalá, L. (2023). *Agricultura: Diversidad planificada*. INIA; AUSID; Facultad de Agronomía.
- Arza, A., Costa, L., González, H., & Moreira, F. (2022). *Efecto de niveles creciente de inclusión de grano de lupino (Lupinus angustifolius) en dietas de terminación sobre la performance a corral y a la faena de novillos Hereford* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/36536>
- Bacigaluppo, S., Enrico, J. M., Estancich, E. P., García, A. V., Kehoe, E., Lago, M. E., & Salvagiotti, F. (2020). La intensificación sustentable de la producción, los servicios ecosistémicos y los cultivos de cobertura. *Para Mejorar la Producción*, (59), 179-192. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/8562>

- Barbazán, M., Ferrando, M., & Zamalvide, J. P. (2002). Acumulación de materia seca y nitrógeno en gramíneas anuales invernales usada como cultivo de cobertura vegetal en viñedos. *Agrociencia (Uruguay)*, 6(1), 10-19.  
<https://doi.org/10.31285/AGRO.06.1351>
- Basanta, M., Perrone, J., & Giordano, E. (2016). Evaluación de especies de cultivos de cobertura en INTA Rafaela: Resultados 2015. En Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Ed.), *Información Técnica de trigo y otros cultivos de invierno: Campaña 2016* (pp. 75-82). <http://hdl.handle.net/20.500.12123/3347>
- Bass, S., Dalal-Clayton, B., & Pretty, J. (1995). *Participation in strategies for sustainable development*. Environmental Planning Group. <https://www.environmental-mainstreaming.org/nssd/pdf/IIED08.pdf>
- Benavides, E., Morales, L., & Navia, J. (2015). Propiedades físicas y contenido de materia orgánica en diferentes usos del suelo en Samaniego, Colombia. *Revista Agroforestería Neotropical*, 1(5), 27-41.  
<https://revistas.ut.edu.co/index.php/agroforesteria/article/view/916/713>
- Bertolotto, M., & Marzetti, M. (2017). *Cultivos de cobertura: Bases para su manejo en sistema de producción*. Aapresid. [https://issuu.com/aapresid/docs/aap-original\\_cultivos\\_de\\_cobertura](https://issuu.com/aapresid/docs/aap-original_cultivos_de_cobertura)
- Boccolini, M., Aimetta, B., Cazorla, C., & Conde, B. (2013). Efecto del residuo de vicia (*Vicia sativa* L.) sobre el potencial de nitrificación del suelo. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 83-87). INTA.  
[https://www.researchgate.net/publication/380889553\\_Contribuciones\\_de\\_los\\_cultivos\\_de\\_cobertura\\_a\\_la\\_sostenibilidad\\_de\\_los\\_sistemas\\_de\\_produccion](https://www.researchgate.net/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion)
- Borrajo, C., Barebera, P., Bendersky, D., Pizzio, R., Ramírez, M., Maidana, C., Zapata, P., Ramírez, R., & Fernández, R. (2011). *Verdeos de invierno en Corrientes*. INTA.
- Çakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89, 1-16.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>

- Campiglia, E., Mancinelli, R., & Radicetti, E. (2011). Influence of no-tillage and organic mulching on tomato (*Solanum Lycopersicum L.*) production and nitrogen use in the mediterranean environment of central Italy. *Scientia Horticulturae*, 130(3), 588-598. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.08.012>
- Cano, P., Cabrini, S., Fillat, F., Peper, A., & Poggio, S. (2020, 31 de agosto). *Evaluación económica-ambiental de alternativas para intensificar y diversificar las rotaciones agrícolas en el norte de la provincia de Buenos Aires* [Contribución]. 51° Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Agraria (AAEA), Buenos Aires. [https://www.researchgate.net/publication/348409478\\_Evaluacion\\_economica-ambiental\\_de\\_alternativas\\_para\\_intensificar\\_y\\_diversificar\\_las\\_rotaciones\\_agricolas\\_en\\_el\\_norte\\_de\\_la\\_provincia\\_de\\_Buenos\\_Aires](https://www.researchgate.net/publication/348409478_Evaluacion_economica-ambiental_de_alternativas_para_intensificar_y_diversificar_las_rotaciones_agricolas_en_el_norte_de_la_provincia_de_Buenos_Aires)
- Capurro, J. (2018). *Efecto de un cultivo de cobertura sobre propiedades edáficas y uso del agua en ambientes con erosión hídrica y monocultivos de soja, en el sur de la provincia de Santa Fe* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Rosario]. RepHip UNR. <http://hdl.handle.net/2133/17761>
- Carámbula, M. (2007). *Verdeos de invierno*. Hemisferio Sur.
- Carfagno, P., Eiza, M., Babinec, F., & Quiroga, A. (2013). Inclusión de cultivos de cobertura en la dinámica hídrica de hapludoles y haplustoles del oeste de la provincia de Buenos Aires y noreste de La Pampa. 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. 36-49). INTA.
- Cazorla, D., Baigorria, T., Lardone, A., Bojanich, M., Aimetta, B., & Vilches, D. (2013). Antecedentes del maíz: ¿Barbecho o cultivos de cobertura? 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. 181-185). INTA.
- Cerón Rincón, L. E., & Aristizábal Gutiérrez, F. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/32889>

- Chapagain, T., Lee, E. A., & Raizada, M. N. (2020). The potential of multi-species mixtures to diversify cover crop benefits. *Sustainability*, 12(5), Artículo e2058. <https://doi.org/10.3390/su12052058>
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero Gutiérrez, A., Reynero, M., Diez, A., Bergesio, L., Cantero, J., Nuñez, C., Amuchástegui, A., Degioanni, A. (2012). *Erosión hídrica: Principios y técnicas de manejo*. Universidad Nacional de Río Cuarto. <https://es.slideshare.net/slideshow/erosion-hidrica-cisneros-9789876880244/38474072>
- De Falco, P. (2017). *Evaluación del efecto de los cultivos de cobertura sobre la fauna edáfica, la biomasa y la actividad microbiana y los servicios ecosistémicos asociados que sustentan la productividad del monocultivo de soja* [Disertación doctoral, Universidad Nacional de Luján]. REDIUNLu. <http://ri.unlu.edu.ar/xmlui/handle/rediunlu/1912>
- De Sá Pereira, E. (2013). *Los cultivos de cobertura y la productividad del maíz en siembra directa: Dinámica del nitrógeno, agua y fracciones orgánicas del suelo* [Disertación doctoral, Universidad Nacional del Sur]. INTA Digital. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/5895>
- De Sá Pereira, E. Galantini, J., & Quiroga, A. (2013). Sistemas de cultivos de cobertura de suelo de otoño-invierno: Sus efectos sobre la disponibilidad de agua. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 76-82). INTA.
- Eck, H. V. (1986). Effects of water deficit on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. *Agronomy Journal*, 78(6), 1035-1040. <https://doi.org/10.2134/agronj1986.00021962007800060020x>
- Ernst, O., & Bentancur, O. (2004). Efecto del laboreo sub-superficial y manejo del barbecho químico sobre la disponibilidad de N-NO<sub>3</sub> en el suelo y rendimiento de maíz en siembra directa después de avena pastoreada. *Agrociencia (Uruguay)*, 8(1), 29-40. <https://doi.org/10.31285/AGRO.08.1026>

- Etchegoimberry, P. (2019). *Identificación de factores limitantes del rendimiento de una secuencia de cultivos* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31559>
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Bailey, B. A. (2005). Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(19-20), 2733-2757. <https://doi.org/10.1080/00103620500303939>
- Fernández, C. J. (1979). Estimaciones de densidad aparente, retención de agua a tensiones de  $-1/3$  y  $-25$  bar y agua disponible en el suelo a partir de la composición granulométrica y porcentaje de materia orgánica. En C. J. Fernández (Coord.), *2da. Reunión Técnica de la Facultad de Agronomía* (p. S2). Universidad de la República.
- Fernández, R., Quiroga, A., & Noellemeyer, E. (2012). Cultivo de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semiárida pampeana? *Ciencia del Suelo*, 30(2), 137-150. [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672012000200001](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672012000200001)
- 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>
- Floss, E. (2000). Benefícios da biomassa de aveia ao sistema de semeaduradireta. *Plantio Direto*, (57), 25-29. <https://rpdsys.s3.amazonaws.com/edicoes/119/S7dFPtofDJSEWMKTyosSGI5C2XXG3E413s2iEF9k.pdf>
- Franzluebbers, A. J., Sawchik, J., & Taboada, M. A. (2014). Agronomic and environmental impacts of pasture crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190(1), 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.017>

- Garba, I., Bell, L., & 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>
- Gauna, V. (2020). *Incorporación de cultivos de cobertura como herramienta para controlar los problemas de erosión de los suelos* [Trabajo final de grado, Universidad Empresarial Siglo 21]. Universidad Siglo 21.  
<https://repositorio.21.edu.ar/handle/ues21/18473>
- Giacomini, S., Aita, C., Chiapinotto, I., Hübner, A., Marques, M., & Cadore, F. (2004). Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto: Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28(4), 751-762. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000400015>
- Gil, A., & González, E. (2008). La agricultura de conservación: Una vía hacia el desarrollo sostenible. En *Agricultura Familiar en España* (pp. 142-152). UPA.  
[https://www.upa.es/anuario\\_2008/pag\\_142-152\\_ribes.pdf](https://www.upa.es/anuario_2008/pag_142-152_ribes.pdf)
- Gill, N., & Vear, C. (1965). *Botánica agrícola*. Acribia.
- Giménez, L. (2017). *Deficiencias hídricas en distintas etapas fenológicas de maíz y soja y evaluación del modelo Aquacorp* [Disertación doctoral, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29819>
- Giménez, L., & García Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 100-08. <https://doi.org/10.31285/AGRO.15.598>
- Gliessman, S. R. (2002). *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.  
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9149>
- Griffin, T. S., & Hesterman, O. (1991). Potato response to legume and fertilizer nitrogen sources. *Agronomy Journal*, 83(6), 1004-1012.  
<https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300060016x>

- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Hayatsu, M., Tago, K., & Saito, M. (2008). Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54(1), 33-45. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00195.x>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria & Instituto Nacional de Semilla. (2023). *Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de especies forrajeras: Anuales, Bianuales y Perennes: Periodo 2022*. [https://inia.org.uy/convenio\\_inase\\_inia/Evaluacion\\_EF/Ano2023/PubForrajerasPeriodo2023.pdf](https://inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_EF/Ano2023/PubForrajerasPeriodo2023.pdf)
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (s.f.). *Tablas estadísticas*. <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>
- Klotz, M. G., & Stain, L. Y. (2008). Nitrifier genomics and evolution of the nitrogen cycle. *FEMS Microbiological Letters*, 278(2), 146-156. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00970.x>
- León, O., Silva, P., & Acevedo, E. (2001). *Respuesta a la inoculación en dos especies de lupino (Lupinus albus L. y Lupinus angustifolius L.)* [Trabajo final de grado]. Universidad de Chile.
- Letey, J. (1985). Relationship between soil properties and crop production. En B. A. Stewart (Ed.), *Advances in Soil Science* (pp. 277-294). Springer-Verlag. [https://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.quoos.com.br/downloads/Relationship\\_between\\_soil\\_physical.pdf](https://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.quoos.com.br/downloads/Relationship_between_soil_physical.pdf)
- Ley n° 15.239: *Declaración de interés nacional: Uso y conservación de los suelos y de las aguas superficiales destinados a fines agropecuarios*. (1981). IMPO. <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/15239-1981>

- Mailhos, A., & Ramos, M. (2017). *Efecto del cultivo cobertura con y sin pastoreo sobre las propiedades físicas del suelo y rendimiento de la soja posterior* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/18659>
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*, (43), 63-84.  
<https://doi.org/10.14198/INGEO2007.43.04>
- Mera, M. (2016). Especies de Lupino y su utilización. En M. Mera (Ed.), *Lupino dulce y amargo producción en Chile* (pp. 7-26). INIA.  
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/31836>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2009). *Anuario estadístico agropecuario 2009*. MGAP.  
[https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Documentos%20compartidos/Anuario2009/anuario2009\\_0.zip](https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Documentos%20compartidos/Anuario2009/anuario2009_0.zip)
- Otegui, M. (2023). Desarrollo del cultivo. En F. Andrade, A. Cirilo, S. Uhart, & M. Otegui (Eds.), *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 51-70). Maizar.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12123/14738>
- Pacheco Seguí, J., Gomes de Andrade, J., Carlesso, R., & Trois, C. (2011). Pérdidas de agua por evaporación en maíz con siembra convencional y directa para diferentes niveles de cobertura muerta: I. Resultados experimentales. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2), 60-64.  
<https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/96>
- Pedrozo, F., Radiccioni, J., & Sommer, I. (2018). *Evaluación de distintas alternativas de verdeos de invierno* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/28691>
- Perdomo, C., & Barbazán, M. (2015). *Nitrógeno*. Universidad de la República

- Pocojeski, E., Souza da Silva, L., Da Cas Bundt, A., Marchesan, E., Rabaioli Camargo, E., & Bueno Scivittaro, W. (2012). Estimativa do teor de nitrogênio em arroz irrigado com o clorofilômetro e a cartela de cores: Nitrogen content estimative in flooded rice by using of chlorophyll meter and color chart. *Ciencia Rural*, 42(11), 1982-1988. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000087>
- Ramírez Ceballos, M. (2023). *Trigo (Triticum Aestivum) como cultivo de cobertura para control de malezas* [Trabajo final de grado]. Universidad de Caldas.
- Reeves, D. W., Wood, C. W., & Touchton, J. T. (1993). Timing nitrogen applications for corn in a winter legume conservation tillage system. *Agronomy Journal*, 85(1), 98-106. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500010020x>
- Renzi, J. (2020). *Caracterización agroecológica de poblaciones naturales de Vicia villosa Roth (Fabaceae) de Argentina* [Disertación doctoral]. Universidad Nacional del Sur.
- Restovich, S. B. (2023). *Los cultivos de cobertura y sus beneficios en la producción de alimentos*. INTA.
- Restovich, S. B., & Andriulo, A. E. (2013). Cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: Biomasa aérea, captura de nitrógeno, consumo de agua y efecto sobre el rendimiento en grano. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 29-35). INTA.
- 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. <http://hdl.handle.net/10919/69924>
- Ridley, N. (2013). Cultivos de cobertura en el sur de Santa Fe: Efectos sobre la eficiencia de barbecho y la porosidad del suelo. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 7-15). INTA.  
[https://repo.unlpam.edu.ar/bitstream/handle/unlpam/89/1\\_alvcon779.pdf?sequence=1#page=8](https://repo.unlpam.edu.ar/bitstream/handle/unlpam/89/1_alvcon779.pdf?sequence=1#page=8)

- Rillo, S., Álvarez, C., Bagnato, R., & Noellemeyer, E. (2013). Cultivos de cobertura: Gramíneas y leguminosas en el centro oeste de la provincia de buenos aires. 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. 58-68). INTA. [https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Quiroga-2/publication/380889553\\_Contribuciones\\_de\\_los\\_cultivos\\_de\\_cobertura\\_a\\_la\\_sostenibilidad\\_de\\_los\\_sistemas\\_de\\_produccion/links/66534e17bc86444c7201af26/Contribuciones-de-los-cultivos-de-cobertura-a-la-sostenibilidad-de-los-sistemas-de-produccion.pdf#page=59](https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Quiroga-2/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion/links/66534e17bc86444c7201af26/Contribuciones-de-los-cultivos-de-cobertura-a-la-sostenibilidad-de-los-sistemas-de-produccion.pdf#page=59)
- Rimsky-Korsakov, H., Álvarez, C., & Lavado, R. S. (2015). Cover crops in the agricultural systems of the Argentine pampas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(6), 134A-140A. <https://www.jswconline.org/content/70/6/134A>
- Rimsky-Korsakov, H., Álvarez, C., & Lavado, R. S. (2016). Cultivos de cobertura invernales en la región pampeana argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, (21), 2-6. <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/issue/IA-LACS-2016-1>
- Rimsky-Korsakov, H., Zubillaga, M. S., Landriscini, M. R., & Lavado, R. S. (2013). Utilización de un cultivo de cobertura luego de maíz, para recuperar nitratos residuales susceptibles de lixiviarse. 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. 69-75). INTA. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/151007>
- Romano Rumbo, B. (2022). *Efecto de distintos antecedentes invernales sobre la mineralización de N in situ y la performance en rendimiento y N absorbido sobre cultivo siguiente de maíz* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/39902>
- Ruffo, M. L., & Bollero, G. A. (2003). Modeling rye and hairy vetch residue decomposition as a function of degree-days and decomposition-days. *Agronomy Journal*, 95(4), 900-907. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.9000>

- Ruffo, M. L., & Parsons, A. (2004). Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (21), 13-15.  
[http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/B7943BF2B6036328852579990060EBB9/\\$FILE/Cultivo%20Cobertura-Matias%20Ruffo.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/B7943BF2B6036328852579990060EBB9/$FILE/Cultivo%20Cobertura-Matias%20Ruffo.pdf)
- Ruiz, M., Kent, F., & Fontana, L. (2019). Vicias. En F. S. Kent (Ed.), *Forrajeras cultivadas anuales y perenes más difundidas en la provincia de La Pampa* (pp. 65-68). INTA.  
[https://www.researchgate.net/publication/337948538\\_Forrajeras\\_cultivadas\\_anuales\\_y\\_perennes\\_mas\\_difundidas\\_en\\_la\\_provincia\\_de\\_La\\_Pampa](https://www.researchgate.net/publication/337948538_Forrajeras_cultivadas_anuales_y_perennes_mas_difundidas_en_la_provincia_de_La_Pampa)
- Sadras, V. O., O'Leary, G. J., & Roget, D. K. (2005). Crop responses to compacted soil: Capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*, 91(2-3), 131-148. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.06.011>
- 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. Bordero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 88-91). INTA.  
[https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Quiroga-2/publication/380889553\\_Contribuciones\\_de\\_los\\_cultivos\\_de\\_cobertura\\_a\\_la\\_sostenibilidad\\_de\\_los\\_sistemas\\_de\\_produccion/links/66534e17bc86444c7201af26/Contribuciones-de-los-cultivos-de-cobertura-a-la-sostenibilidad-de-los-sistemas-de-produccion.pdf#page=89](https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Quiroga-2/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion/links/66534e17bc86444c7201af26/Contribuciones-de-los-cultivos-de-cobertura-a-la-sostenibilidad-de-los-sistemas-de-produccion.pdf#page=89)
- Sarrantonio, M., & Gallandt, E. (2003). The role of cover crops in North American cropping systems. *Journal of Crop Production*, 8(1-2), 53-74.  
[https://doi.org/10.1300/J144v08n01\\_04](https://doi.org/10.1300/J144v08n01_04)

- Sawchik, J., Siri, G., Ayala, W., Barrios, E., Bustamante, M., Ceriani, R., Gutiérrez, F., Mosqueira, J., Otaño, C., Pérez, M., Piñeiro, G., Pinto, P., Terra, J., & Zarza, R. (2015). El sistema agrícola bajo amenaza: ¿Qué aportan los cultivos de cobertura y/o las pasturas cortas? En A. Ribeiro & M. Barbazán (Eds.), *IV Simposio Nacional de Agricultura: Buscando el camino de la intensificación sostenible* (pp. 149-168). Universidad de la República. [https://www.researchgate.net/profile/Jose-Terra/publication/283582178\\_El\\_sistema\\_agricola\\_bajo\\_amenaza\\_que\\_aportan\\_los\\_cultivos\\_de\\_cobertura\\_yo\\_las\\_pasturas\\_cortas/links/5640f69708ae24cd3e40ce97/El-sistema-agricola-bajo-amenaza-que-aportan-los-cultivos-de-cobertura-y-o-las-pasturas-cortas.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jose-Terra/publication/283582178_El_sistema_agricola_bajo_amenaza_que_aportan_los_cultivos_de_cobertura_yo_las_pasturas_cortas/links/5640f69708ae24cd3e40ce97/El-sistema-agricola-bajo-amenaza-que-aportan-los-cultivos-de-cobertura-y-o-las-pasturas-cortas.pdf)
- Scianca, C. (2010). *Cultivos de cobertura en molisoles de la región pampeana: Producción de materia seca, eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno e incidencia sobre el cultivo de soja* [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Sur]. RID-UNS. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2118>
- Serra, M. H., & Del Campo, N. O. (2017). *Rendimiento y composición proteica del grano de trigo, *Triticumaestivum* L, en función de la disponibilidad de agua y nitrógeno* [Trabajo final de grado, Universidad Nacional de La Pampa]. UNLPam. <https://repo.unlpam.edu.ar/handle/unlpam/1630>
- Siri-Prieto, G., & Ernst, O. (2011). Raigrás como cultivo de cobertura: Efecto del largo del período de barbecho sobre la disponibilidad de agua, el riesgo de erosión y el rendimiento de la soja. *Cangüé*, (31), 18-27. <https://www.unicampo.com.uy/img/raigras.pdf>
- Stegman, E.C. (1982). Corn grain yield as influenced by timing of evapotranspiration. *Irrigation Science*, 3(1), 75-87. <https://doi.org/10.1007/BF00264851>
- Threadgill, E. (1982). Residual tillage effects as determined by cone index. *Transactions of the ASAE*, 25(4), 859-867. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33627>

- Torres, J., Gutierrez, J. A., & Beltrán, H. A. (2017). Compactación, una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Ciencias Agropecuarias*, 3(3), 18-22.  
[https://revistas.ucundinamarca.edu.co/index.php/Ciencias\\_agropecuarias/article/view/225/131](https://revistas.ucundinamarca.edu.co/index.php/Ciencias_agropecuarias/article/view/225/131)
- Urrutia Ochoa, C. A. (2022). *Eficiencia del uso del agua en la producción vegetal* [Trabajo final de grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. DSpace.  
<http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13340>
- Vanzolini, J. I., Galantini, J., & Agamennoni, R. (2013). Cultivos de cobertura de *Vicia villosa* Roth. en el valle bonaerense del Río Colorado. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bordero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 21-28). INTA.  
[https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Quiroga-2/publication/380889553\\_Contribuciones\\_de\\_los\\_cultivos\\_de\\_cobertura\\_a\\_la\\_sostenibilidad\\_de\\_los\\_sistemas\\_de\\_produccion/links/66534e17bc86444c7201af26/Contribuciones-de-los-cultivos-de-cobertura-a-la-sostenibilidad-de-los-sistemas-de-produccion.pdf#page=22](https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Quiroga-2/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion/links/66534e17bc86444c7201af26/Contribuciones-de-los-cultivos-de-cobertura-a-la-sostenibilidad-de-los-sistemas-de-produccion.pdf#page=22)
- Vanzolini, J. I., Galantini, J., Agamennoni, R., Martínez, J. M., & Reinoso, O. (2010, 31 de mayo-4 de junio). *Efectos del momento de secado de un cultivo de cobertura de *Vicia villosa* Roth sobre su acumulación de biomasa y su contenido de N* [Contribución]. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario.  
[https://www.researchgate.net/profile/Juan-Ignacio-Vanzolini/publication/327077190\\_EFECTOS\\_DEL\\_MOMENTO\\_DE\\_SECADO\\_DE\\_UN\\_CULTIVO\\_DE\\_COBERTURA\\_DE\\_Vicia\\_villosa\\_Roth\\_SOBRE\\_SU\\_ACUMULACION\\_DE\\_BIOMASA\\_Y\\_SU\\_CONTENIDO\\_DE\\_N/links/5b76fbb9a6fdcc5f8b4da9a4/EFECTOS-DEL-MOMENTO-DE-SECADO-DE-UN-CULTIVO-DE-COBERTURA-DE-Vicia-villosa-Roth-SOBRE-SU-ACUMULACION-DE-BIOMASA-Y-SU-CONTENIDO-DE-N.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Juan-Ignacio-Vanzolini/publication/327077190_EFECTOS_DEL_MOMENTO_DE_SECADO_DE_UN_CULTIVO_DE_COBERTURA_DE_Vicia_villosa_Roth_SOBRE_SU_ACUMULACION_DE_BIOMASA_Y_SU_CONTENIDO_DE_N/links/5b76fbb9a6fdcc5f8b4da9a4/EFECTOS-DEL-MOMENTO-DE-SECADO-DE-UN-CULTIVO-DE-COBERTURA-DE-Vicia-villosa-Roth-SOBRE-SU-ACUMULACION-DE-BIOMASA-Y-SU-CONTENIDO-DE-N.pdf)

- Wendling, M., Charles, R., Herrera, J., Amossé, C., Jeangros, B., Walter, A., & Büchi, L. (2019). Effect of species identity and diversity on biomass production and its stability in cover crop mixtures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 281, 81-91.  
[https://gala.gre.ac.uk/id/eprint/24086/8/24086%20BUCHI\\_Species\\_Identity\\_Biomass\\_Crop\\_Mixtures\\_%28AAM%29\\_2019.pdf](https://gala.gre.ac.uk/id/eprint/24086/8/24086%20BUCHI_Species_Identity_Biomass_Crop_Mixtures_%28AAM%29_2019.pdf)
- Yuan, Z., Cao, Q., Zhang, K., Ata-Ui-Karim, S., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Liu, X. (2016). Optimal leaf positions for SPAD meter measurement in rice. *Frontiers in Plant Science*, 7, Artículo e719. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00719>
- Zotarelli, L., Avila, L., Scholberg, J. M. S., & Alves, B. J. R. (2009). Benefits of vetch and rye cover crops to sweet corn under no-tillage. *Agronomy Journal*, 101(2), 252-260.  
<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0033x>