

Trabajo de intensificación

Impacto de cultivos de servicio sobre el rendimiento de maíz bajo riego y en seco



Fabricio Romeo

Tutor: Dr. Román Boris Vercellino

Consejeros: Dr. Alejandro Presotto

Dr. Claudio Pandolfo

Dpto. Agronomía, Universidad Nacional del Sur

2023



INDICE

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. MATERIALES Y MÉTODOS	10
2.1. Sitio de estudio	10
2.2. Diseño experimental.....	11
2.3. Determinaciones.....	13
2.3.1. Rendimiento materia seca del cultivo de servicio	13
2.3.2 Infiltración.....	13
2.3.3. Humedad.....	14
2.3.4 Resistencia a la penetración	15
2.3.5. Nitratos a la siembra del maíz.....	16
2.3.6. Rendimiento maíz	17
2.4 Análisis estadístico.....	17
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
3.1 Rendimiento Materia Seca de Cultivos de Servicio.....	18
3.2 Infiltración	19
3.3 Humedad	20
3.3.1 Momento 1: Secado de cultivo de servicio.....	20
3.3.2 Momento 2: Siembra de maíz.....	22
3.4 Resistencia a la penetración.....	24
3.5 Nitrógeno a la siembra de maíz	25
3.6 Rendimiento maíz	26
4. CONCLUSION.....	29
5. BIBLIOGRAFÍA.....	30

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanas por sus valiosos consejos y apoyo durante toda la carrera.

A mis amigos que siempre están cuando mas se los necesita e hicieron más llevadero el proceso.

A mi tutor Boris Vercellino, por su paciencia y dedicación en este trabajo.

A mis consejeros, Alejandro Presotto y Claudio Pandolfo, por sus valiosos aportes.

A El criadero El Cencerro por permitirme realizar este trabajo dentro de su empresa.

A Eduardo de Sa Pereira por su apoyo en las distintas actividades y aportes en el trabajo.

A la Universidad Nacional del Sur por permitirme conocer grandes personas.

RESUMEN

El partido de Coronel Suarez presenta una gran variabilidad climática interanual, alternando periodos con excesos y déficits hídricos que afectan el rendimiento de los cultivos. Una de la secuencia de cultivos más utilizada es la rotación trigo-soja, y la frecuente utilización de soja en la rotación ha conducido a la disminución en los niveles de materia orgánica, incrementando los procesos erosivos asociados a la menor cobertura de suelo y generando pérdida de fertilidad química y física. Ante esta situación, la preservación el suelo ha tomado mayor interés y los cultivos de servicio (CS) son una herramienta adecuada para ello.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inclusión de CS en la rotación trigo-CS-maíz sobre el rendimiento de maíz en dos ambientes hídricos, riego y secano. El ensayo se llevó a cabo en el Establecimiento “Las Praderas”, partido de Coronel Suárez, entre abril de 2021 y mayo de 2022. Se realizó un diseño experimental en parcela dividida con factor principal riego y bloques completos como subparcelas, con tres repeticiones. Los tratamientos fueron: (1) Vicia sin inocular (VS), (2) vicia inoculada (VI), (3) centeno (C), (4) triticale (T), (5) vicia-triticale (V-T), (6) vicia-triticale-rábano (V-T-N), y (7) barbecho químico como testigo (T).

Se evaluó producción de materia seca aérea, contenido de humedad de suelo -en dos momentos (secado de los CS y siembra de maíz) y dos profundidades (0-20 cm y 20-80 cm)-, tasa de infiltración, resistencia a la penetración, contenido de nitratos y, finalmente, rendimiento de maíz en dos condiciones hídricas -riego y secano-. La producción de materia seca varió desde 2000 kg ha⁻¹ para vicia s/inocular hasta >4500 kg ha⁻¹ en centeno. No se encontraron diferencias significativas en el contenido de humedad del perfil de suelo en ninguno de los dos momentos evaluados. El tratamiento vicia-triticale incrementó la tasa de infiltración y la resistencia a la penetración fue mayor en los CS que en el testigo. El nivel de nitratos en suelo no fue afectado, aunque se notó una tendencia a incrementar en el tratamiento con vicia respecto a los demás tratamientos. Finalmente, se observaron diferencias significativas entre ambientes hídricos, pero no entre tratamientos dentro del mismo ambiente hídrico. Previo a maíz, la inclusión de vicia como cultivo de servicio mostró resultados positivos, sin embargo, se requieren futuras evaluaciones para confirmar esta inferencia.

1. INTRODUCCIÓN

La inclusión de la labranza cero (también conocida como “siembra directa”) ha tenido un gran impacto en la producción agropecuaria Argentina. Actualmente, la adopción promedio nacional del sistema de labranza cero se encuentra por encima del 90%. Esta práctica mejora a todo sistema productivo, debido a que incrementa el secuestro de carbono, mejorando la calidad del suelo, con el consecuente incremento y sostenibilidad en los rendimientos de los cultivos (AAPRESID, 2019). Sin embargo, hay algunas regiones del país donde se pueden observar aumento en los procesos de degradación, siendo una de las causas principales la ausencia de gramíneas en la rotación (Rainaud, 2019), y también se han observado problemas vinculados al manejo de malezas debido al aumento de casos de resistencias a herbicidas con diferentes sitios de acción (AAPRESID, 2023).

En los últimos años la siembra directa continua de soja ha predominado en los suelos agrícolas de la región pampeana. La escasez de rastrojo y su rápida descomposición provocan cambios importantes en su cobertura (Espina, 2016). La frecuente utilización de soja en la rotación, afecta la productividad del suelo, provocando disminuciones en los niveles de materia orgánica, la cual tiene un rol fundamental en el aporte de nutrientes y como agente cementante en la estructura y estabilidad edáfica (Echeverría y Sainz Rozas, 2015). Esta disminución del aporte de carbono se agrava por el aumento de procesos erosivos asociados a la menor cobertura de suelo, generando pérdida de fertilidad química y física. Con este panorama, se han comenzado a utilizar mayor cantidad de fertilizantes de síntesis química, especialmente nitrogenados, en los demás cultivos de la rotación. Esto puede provocar efectos negativos sobre el ambiente, como el lavado de nitrógeno hacia las napas y pérdidas gaseosas hacia la atmósfera (Echeverría y Sainz Rozas, 2015).

El partido de Coronel Suárez, ubicado en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, posee una superficie de 540.000 ha, dedicado un 60 % a agricultura y el resto a ganadería. Los principales cultivos sembrados son trigo (109.000 ha), soja (105.000 ha), cebada (56.000 ha), maíz (48.000 ha) y girasol (34.000 ha) (Estadísticas agrícolas 21/22). En este partido, el cultivo de soja pasó a dominar el paisaje como consecuencia de la introducción de los cultivares resistentes a glifosato (tecnología RR) en el año 1997 (Capurro et al., 2012). Como consecuencia de ello, se puede observar una disminución en los niveles de materia orgánica y

aumentos de los procesos erosivos de su monocultivo o alta frecuencia en rotación (por ejemplo, alta frecuencia de trigo/soja) (Sá Pereira et al., 2012).

Ante esta situación, uno de los objetivos que ha tomado mayor interés es el de cuidar y preservar el recurso suelo, tanto en sus propiedades físicas (estructura, textura, aireación) como químicas (contenido de nutrientes, materia orgánica, etc.) (ReTAA, 2021). Los cultivos de servicios (CS, también conocidos como cultivos de cobertura) son una herramienta adecuada para tal objetivo, considerándose una práctica fundamental en la agricultura sostenible (ReTAA, 2021). En un principio, los cultivos de servicio se utilizaron para mitigar problemas de erosión. La masa vegetal producida por estos impide que las gotas de lluvia impactan directamente sobre la superficie del suelo, reduciendo la velocidad de escurrimiento y frenando el arrastre de materiales. También, en zonas donde se combinan suelos frágiles y climas semiáridos las probabilidades de erosión eólica aumentan, y la inclusión de los cultivos de servicio reduce significativamente las pérdidas del recurso suelo. De esta manera, mejoran la conservación, y las condiciones biológicas, físicas y químicas del suelo (Ruffo y Parsons, 2004).

Los cultivos de servicio, cultivados entre la cosecha y la siguiente siembra de cultivos de renta, no son incorporados al suelo (a diferencia de los abonos verdes) o cosechados (Ruffo y Parsons, 2004). Se caracterizan por mejorar la estructura y las propiedades físicas del suelo, por ejemplo, al incrementar la macroporosidad y posibilitar una mayor infiltración del agua de lluvia y una reducción eficiente de la temperatura del mismo con la consecuencia disminución de la evaporación directa de agua (Bertolotto y Marzetti, 2017), secuestro de carbono, servicios de biocontrol y el ciclo de nutrientes (Singer et al., 2007; Johnson et al., 1993; Blanco-Canqui et al., 2011; Poeplau y Don, 2015; Lin, 2011; Strock et al., 2004; Seifert et al., 2018). Además, permiten la incorporación de nutrientes y reducción en el uso de fertilizantes, incrementan la actividad microbiana del suelo, y proporcionan competencia a las malezas, con la consecuente disminución en el uso de herbicidas (El Cencerro, 2021). De esta manera, su uso se enfoca en aprovechar las herramientas naturales para promover una agricultura más sustentable (El Cencerro, 2021).

De acuerdo a los beneficios buscados, se pueden utilizar especies leguminosas, por ejemplo, vicias (*Vicia sativa*, *Vicia villosa*) que poseen capacidad de fijación biológica de nitrógeno, incrementando la disponibilidad de nitrógeno en el cultivo estival (AlltecBio, 2017).

Gramíneas, por ejemplo, cebada (*Hordeum vulgare*), centeno (*Secale cereale*), triticale (x *Triticosecale*) y avena (*Avena sativa*), que aportan abundantes residuos con alta relación C/N que cubren el suelo y permiten una mejor regulación de la temperatura y agua del suelo; o especies de la familia brasicáceas, por ejemplo nabo (*Brassica rapa*), colza (*Brassica napus*) y rábano (*Raphanus sativus*), que tienen la capacidad de reducir la compactación y mejorar la infiltración del suelo debido a las características de sus raíces (AlltecBio, 2017).

En Argentina, la inclusión de los cultivos de servicio en las rotaciones se encuentra en aumento y tiende a seguir incrementando hacia el futuro (Figura 1). En la campaña 2014/15, solo 4% de los productores adoptaron esta práctica, mientras que para la campaña 2019/20, la cantidad de productores que adoptó los cultivos de servicios aumentó a 19% (Figura 1). Avena y vicia son las especies más utilizadas, y en la mayoría de los casos previo a maíz y a soja (CREA, 2017).

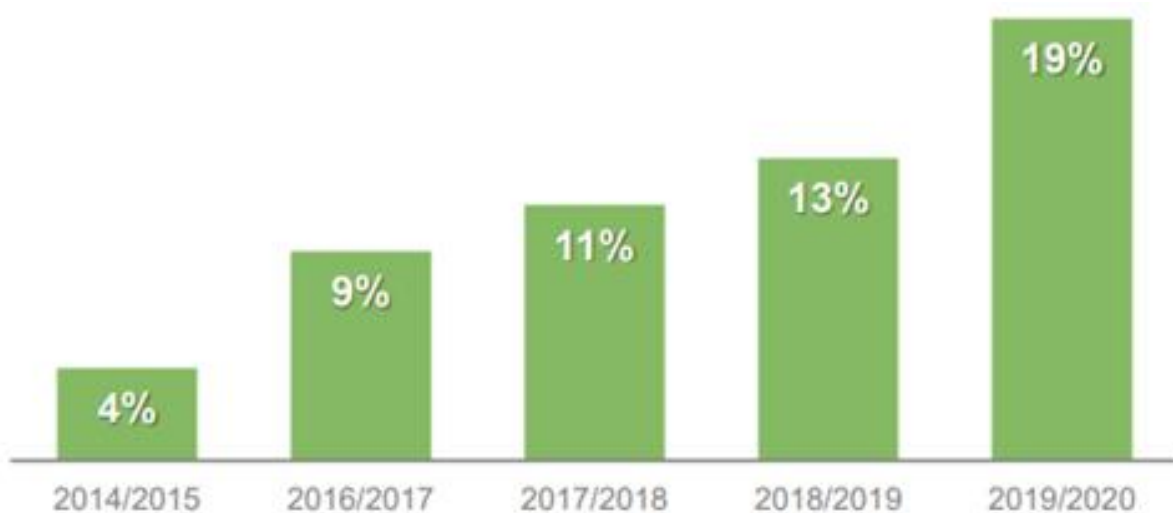


Figura 1. Evolución del porcentaje de productores que realizó cultivos de cobertura en Argentina (ReTAA, 2021).

En Argentina, el maíz ocupa el segundo lugar en superficie sembrada, oscilando entre 9 y 10 millones de ha y el primero en producción, siendo el total de la última campaña (2021/22) de 59 millones de toneladas. Si bien la superficie sembrada aumentó en los últimos años, la producción lo hizo a mayor escala, como consecuencia de las nuevas tecnologías que permiten mayores rendimientos (MAGyP, 2023). Este aumento en los rendimientos conlleva una mayor extracción de nutrientes que pocas veces son recuperados con la fertilización. El balance de carbono también se ve afectado y como consecuencia se producen bajas en los niveles de

materia orgánica. Para poder contrarrestar esta situación y lograr la sustentabilidad del sistema es necesario hacer un mayor aporte de biomasa vegetal (Ruffo y Parsons, 2004).

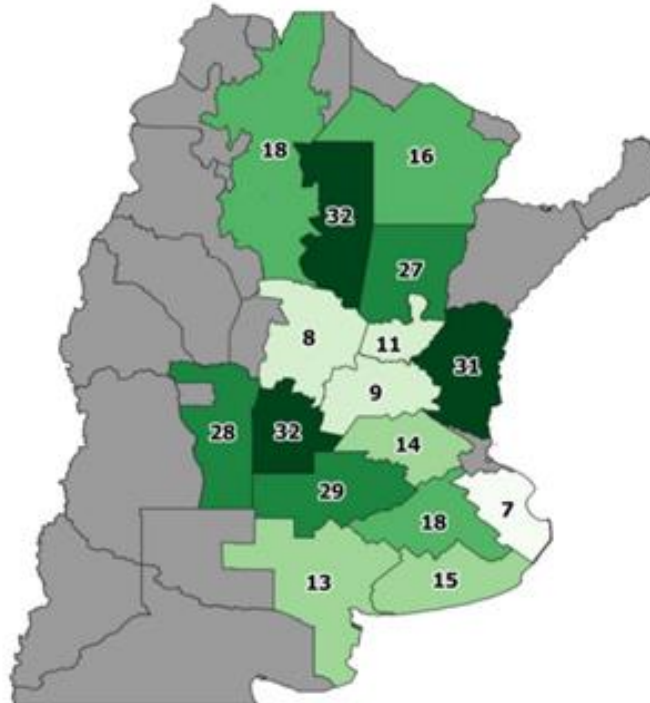


Figura 2. Porcentaje de productores que realizó cultivos de cobertura por regiones. Campaña 2019/20 (ReTAA, 2021).

En el partido de Coronel Suárez, la superficie sembrada de maíz oscila entre 30 y 50 mil ha, con una producción promedio que en los últimos años superó las 200 mil toneladas (MAGyP, 2023). Es una zona donde las precipitaciones no logran cubrir los requerimientos de los cultivos, afectando tanto el rendimiento como la respuesta a la fertilización (Sá Pereira et al., 2015). El principal factor de pérdida de agua es la evaporación directa desde la superficie del suelo, se estima que entre el 50 y 75% del agua de las precipitaciones retorna a la atmósfera sin intervenir en el proceso productivo (Sá Pereira et al., 2015). En general, las precipitaciones ocurridas durante el período de barbecho exceden la capacidad de retención de agua de los suelos, evaporándose, escurriendo o percolando en profundidad, resultando en una baja eficiencia de barbecho (Sá Pereira et al., 2015).

En este contexto, la inclusión de cultivos de servicio que utilicen el excedente hídrico durante el período de barbecho para la producción de biomasa, con el consecuente secuestro de carbono y/o nitrógeno, podría ser una alternativa adecuada en las rotaciones de cultivos en

los sistemas agrícolas del partido de Coronel Suarez (Sá Pereira et al., 2015). Permitiría, además, reducir sustancialmente la erosión, disminuir las pérdidas de nitrógeno y fósforo y mejorar la calidad del suelo y la sostenibilidad del agroecosistema (Kaspar y Singer 2011; Kladvko et al., 2014; Weil y Kremen 2007).

Hipótesis

La inclusión de cultivos de servicio incrementa la tasa de infiltración de agua, el contenido de nitratos y disminuye la resistencia a la penetración, sin afectar el contenido hídrico del suelo. A su vez, los resultados variarán de acuerdo a las especies utilizadas.

El rendimiento del maíz incrementará con la presencia de cultivos de servicio. El incremento dependerá de las especies implantadas.

Objetivo

Evaluar biomasa seca de distintos cultivos de servicio, su efecto sobre la tasa de infiltración, resistencia a la penetración, contenido de nitratos, contenido hídrico del suelo, y finalmente, su impacto en el rendimiento de maíz en dos ambientes hídricos, riego y secano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitio de estudio

El ensayo se llevó a cabo en un lote del establecimiento “Las Praderas” ($37^{\circ}14'44.1''S$, $61^{\circ}57'05.2''W$) (Figura 3 y 4), ubicado a 24 km de Coronel Suárez, Buenos Aires. El clima de la región se puede clasificar como subhúmedo seco, mesotermal (Thornwaite, 1948). La temperatura media anual es de $13,7^{\circ}C$, la temperatura media mínima es de $8,1^{\circ}C$ y la temperatura media máxima es de $22^{\circ}C$. En los meses de enero y julio se registran las temperaturas máximas y mínimas medias mensuales, con valores de $21,6^{\circ}C$ y $6,6^{\circ}C$, respectivamente. El periodo libre de heladas se extiende desde mediados de octubre hasta mediados de abril, y la mayor ocurrencia de heladas se da en los meses de julio y agosto.

La precipitación media anual es de 770 mm, presentando una gran variabilidad interanual, alternando periodos con excesos y déficits hídricos, con valores extremos mínimos y máximos de 441 y 1183, respectivamente. En base a los datos históricos, en el mes de marzo se registran las mayores precipitaciones mientras que a los meses invernales le corresponden los mínimos valores medios de precipitación (IGRM, 2001).

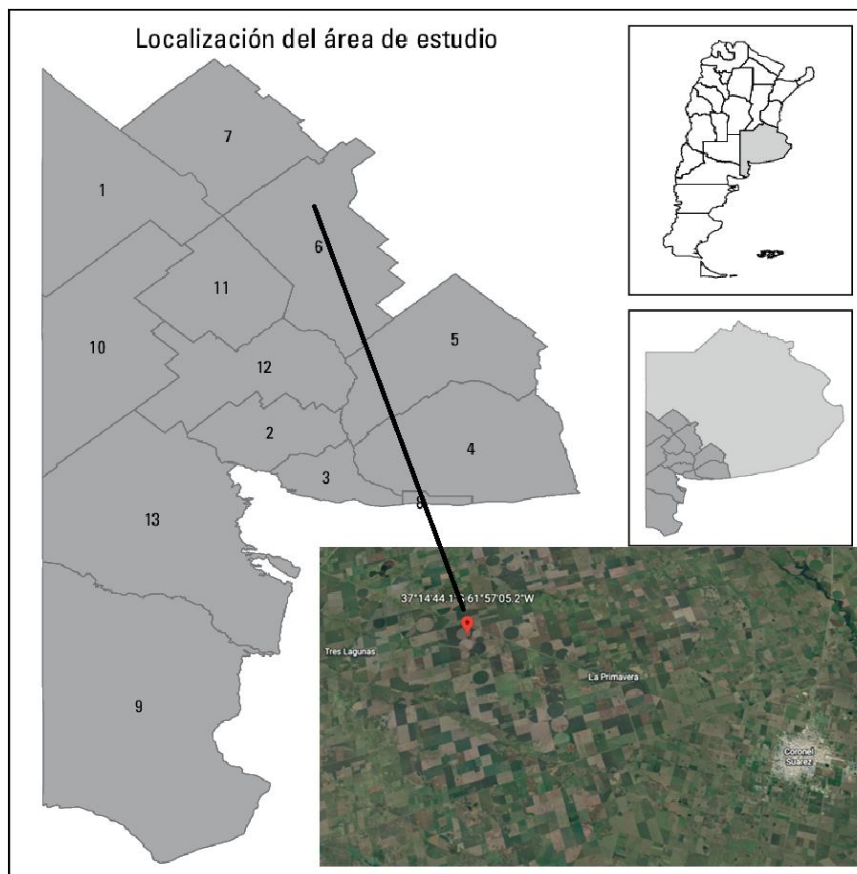


Figura 3. Ubicación geográfica del establecimiento “Las Praderas”

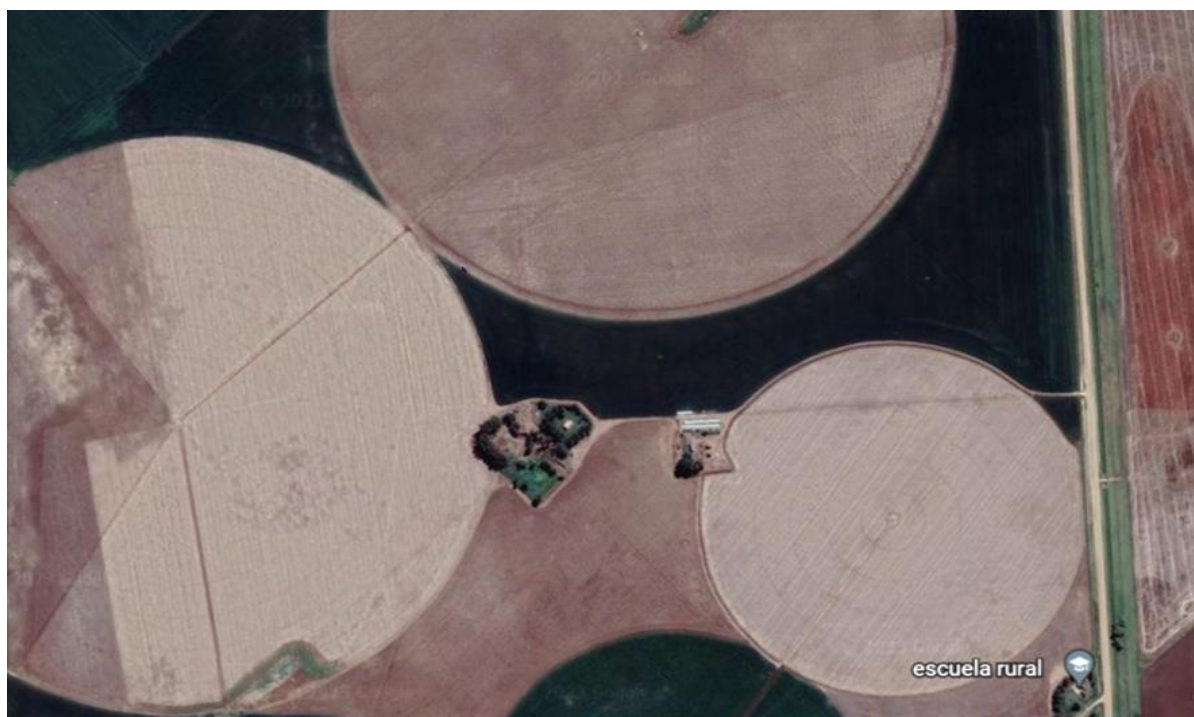


Figura 4. Ubicación del lote dentro del establecimiento “Las Praderas”

En cuanto al suelo, de acuerdo al *Soil Taxonomy* pertenece al gran grupo de los Argiúdoles, con una textura franca (34% A, 47% L y 20% a). Los valores de densidad aparente van de 1,28 g cm⁻² en los primeros 20 cm del perfil hasta 1,37 g cm⁻² a los 100 cm de profundidad y la capacidad de agua útil es de 175 mm. Las determinaciones químicas arrojaron un resultado de MO de 3,68% y un pH de 6,6.

2.2. Diseño experimental.

Se realizó un diseño experimental constituido con parcela dividida con factor principal riego y bloques completos como subparcelas, con tres repeticiones. Se utilizaron los siguientes tratamientos como cultivos de servicio: (1) Vicia sin inocular (VS), (2) vicia inoculada (VI), (3) Centeno (C), (4) triticale (T), (5) vicia-triticale (V-T), (6) vicia-triticale-rábano (V-T-N) y (7) barbecho químico como tratamiento testigo (T), en el cual no se sembró ningún cultivo de servicio y solo se dejó el rastrojo del cultivo antecesor (trigo) (Figura 5). El riego se implementó luego de la siembra del cultivo de maíz; por lo tanto, la única determinación que incluye el factor hídrico (con y sin riego) es el rendimiento de maíz.



Figura 5. Puntos georeferenciados del ensayo.

En el lote se realiza siembra directa desde el año 1996 y se incorporó un equipo de riego en el año 2004. Se mantiene una rotación de cultivos trigo-maíz-soja, siendo el trigo el cultivo antecesor en este caso. Sobre el rastrojo de trigo cosechado, en diciembre de 2020, se realizó un barbecho con glifosato 62% (Sulfosato, $1,8 \text{ L h}^{-1}$) y 2,4-D (Jaspek ME, $0,7 \text{ L ha}^{-1}$) para controlar las malezas presentes en el lote, previo a la iniciación del experimento.

La siembra de los cultivos de servicio se realizó el 6 de abril de 2021, acompañado con la fertilización de 50 kg de fosfato diamónico (DAP). Las dimensiones de las parcelas fueron de 7 x 200 m. en todos los tratamientos, excepto vicia sin inocular, que por falta de espacio, se estableció de 3,5 x 200 m.

Las densidades y variedades de las especies fueron las siguientes: V (*Vicia villosa* Ascasubi INTA, 20 kg ha^{-1}), C (Centeno Emilio INTA, 60 kg ha^{-1}), T (Triticale, 75 kg ha^{-1}), V-T (20 kg ha^{-1} de cada una), V-T-N (20 kg ha^{-1} para vicia y triticale y 3 kg ha^{-1} de rábano CCS 779).

Los cultivos de servicio fueron terminados químicamente el 3 de septiembre, mediante la utilización de glifosato 62% (Sulfosato, 2 L ha^{-1}) y fluroxypyr 48% (Starane Xtra, $0,4 \text{ L ha}^{-1}$) para las gramíneas con o sin vicia y glifosato 62% (Sulfosato, 2 L ha^{-1}) y 2,4-D 30 % (Jaspek Me, $0,8 \text{ L ha}^{-1}$) para el tratamiento que contenía rábano.

El maíz fue sembrado el 8 de octubre a una densidad de 82.000 plantas ha⁻¹ en toda la superficie donde previamente estaban los tratamientos, con una distancia entre hileras de 0,52 m. El material utilizado fue el híbrido Sursem 6620 de ciclo intermedio y buen comportamiento sanitario, principalmente a enfermedades de espiga. Se realizó una fertilización a la siembra con 120 kg ha⁻¹ de DAP y durante en el desarrollo del cultivo se aplicaron 300 kg ha⁻¹ de UREA. Se realizó una aplicación pre-emergente de atrazina 50 % (Atrazina Zamba, 3 L ha⁻¹) + S-metolacloro 96 % (Dual Gold, 1 L ha⁻¹) + glifosato 62% (Sulfosato, 2 L ha⁻¹) para el control de malezas. La cosecha se realizó el 10 de mayo de 2022.

2.3. Determinaciones

2.3.1. Rendimiento materia seca del cultivo de servicio

Al momento de secado de los cultivos de servicio, previo a la aplicación de herbicidas, se determinó la biomasa aérea tomando tres repeticiones de 0,25 m² por parcela. Se realizaron cortes al ras del suelo, y las muestras fueron secadas a 40°C de temperatura hasta peso constante, y pesadas para determinar la materia seca aérea.

2.3.2 Infiltración

Luego del secado de los cultivos de servicio, se determinó la infiltración en los distintos tratamientos mediante el método del anillo simple (Horton, 1940). Consiste en clavar los anillos (cilindro metálico de 21 cm de diámetro, 12 cm de alto y 4,1 mm de espesor) en el suelo, luego invertir sobre el soporte la botella medidora, y transcurrido el primer minuto se realizó la primera lectura, luego a los 3,6 y 10 minutos. Posteriormente, se tomó una lectura cada 5 minutos. Se midió cuántos milímetros han ingresado al perfil del suelo en cada tiempo, hasta llegar a una hora, donde se alcanza la infiltración básica o establecida y se da por finalizada la determinación (Figura 6). Posteriormente, se realizaron los cálculos correspondientes y se obtuvieron las curvas de infiltración (Eiza y Carfagno, 2018). El cálculo para determinar la infiltración básica es el siguiente:

$$I_{tiempo} = IB + (Ii - Ib)^{-kt}$$

Donde I_{tiempo} es la tasa de infiltración en función del tiempo, Ib es el valor de equilibrio de infiltración, Ii es el valor de infiltración a $t=0$, K es valor de caída de la infiltración, y t es tiempo de medición.



Figura 6. Infiltrómetro de anillo simple para la determinación de infiltración.

2.3.3. Humedad

Se determinó la humedad del suelo utilizando un barreno para el muestreo en dos momentos, al secado de los cultivos de servicio y a la siembra del maíz con el objetivo de estimar el consumo hídrico de los cultivos de servicio y la disponibilidad hídrica para el cultivo.

Para ello, se tomaron muestras a dos profundidades, 0-20 cm y 20-80 cm, y a su vez, tres repeticiones de cada una en los 7 tratamientos. Las muestras tomadas se pesaron húmedas y luego fueron secadas en estufa hasta peso constante a 105-110 °C (aproximadamente 24-48 h) (Figura 7). El contenido de humedad se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$Hg (\%) = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Donde Hg es el porcentaje de humedad gravimétrica en base a masa de suelo seco, Mh es el peso de la muestra húmeda y Ms es el peso de la muestra seca.

$$Hv (\%) = Hg \times \frac{\delta ap}{\delta agua}$$

$$Lam (mm) = \frac{Hv \times e}{100} = \frac{Hg \times \delta ap \times P}{100}$$

Donde Hv es el porcentaje de humedad volumétrica en base a volumen de suelo seco, δap es la densidad aparente del suelo, $\delta agua$ es la densidad del agua, P es el espesor en mm de la capa de suelo, e es 200 y 600, y Lam es la lámina de agua de suelo expresada en mm.



Figura 7. Muestreo de humedad de suelo mediante uso de barreno.

2.3.4 Resistencia a la penetración

Una vez que los cultivos de servicio fueron secados, se determinó la resistencia a la penetración utilizando un penetrómetro de golpes (Figura 8). El método consiste en sostener el penetrómetro de manera perpendicular a la superficie del suelo, colocar la pesa en el nivel más alto y dejarla caer. Se anota el número de impactos que se requieren para empujar el cono a una distancia pre-establecida dentro del suelo (Figura 8) (Castellanos-Navarrete et al., 2013). La resistencia a la penetración se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$R = \frac{N \times M \times g \times SD}{A \times PD}$$

Donde R es la resistencia a la penetración (Pa), N es el número de impactos, M es la masa de la pesa (5 kg), g es la gravedad = 9.81 ms^{-2} , SD es la distancia que se desliza el martillo (m), A es el área de la superficie del cono (m^2) y PD es la distancia de penetración (m)



Figura 8. Muestreo de resistencia a la penetración con un penetrómetro.

Se tomó un promedio de la resistencia a la penetración de todos los tratamientos y se utilizó un valor único, comparándolo con el testigo.

2.3.5. Nitratos a la siembra del maíz

Se tomaron muestras en 4 de los 7 tratamientos: testigo, vicia inoculada, vicia-triticale y centeno. De ellos, el testigo se utilizó para determinar el contenido de N en el suelo en situación de barbecho químico, el centeno para determinar el contenido de N en situación de consumo por el cultivo de servicio, vicia para determinar la máxima fijación de N por el cultivo de servicio y vicia-triticale muestra una situación intermedia de fijación de N por parte de la vicia y consumo de N por parte de la gramínea. El muestreo se realizó en los primeros 60 cm del perfil y se llevaron a laboratorio para determinar nitratos (ppm) utilizando el método de ácido cromotrópico. Luego se determinó el nitrógeno total mediante Kjeldahl.

2.3.6. Rendimiento maíz

Para la determinación del rendimiento del maíz se cosecharon espigas en 3 metros lineales de hilera en 5 tratamientos bajo riego (testigo - vicia con fertilización - centeno - vicia+triticale - vicia+triticale+rábano) y en 2 en seco (testigo y vicia), no se pudieron cosechar todos los tratamientos por irregularidades en la siembra del maíz, donde no quedaron correctamente delimitadas las parcelas. Las espigas fueron trilladas manualmente y los granos fueron pesados para determinar rendimiento. Además, se determinó la humedad de las muestras, y se utilizó el valor de humedad de 14,5 % para corregir el rendimiento, de manera de obtener un rendimiento estimativo por hectárea con la misma humedad para todos los tratamientos.

2.4 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con el software Infostat, utilizando Análisis de la Varianza (ANOVA), y las comparaciones de medias se realizaron a través del test LSD de Fisher, con un nivel de significancia de 0,05.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Rendimiento Materia Seca de Cultivos de Servicio

Se observaron diferencias significativas ($F_{5/17} = 7,35$; $P = 0,0023$) en la producción de materia seca entre los tratamientos (Figura 9). El centeno presentó la mayor producción de materia seca con $4520 \text{ kg MS ha}^{-1}$ y se diferenció estadísticamente de todos los tratamientos. Triticale y vicia-triticalesiguieron al centeno en orden de producción de materia seca, diferenciándose únicamente con el tratamiento de menor producción de materia seca, vicia s/inocular. Los tratamientos vicia inoculada y vicia-triticales-rábano, no se diferenciaron estadísticamente ni con vicia+triticales y triticales, ni con vicia sin inocular.

La mayor producción de las gramíneas se puede explicar por su alta relación C/N con respecto a las leguminosas (Sainju et al., 1998). A su vez, el crecimiento de la vicia es lento en etapas iniciales y se acelera en la primavera con el aumento de las temperaturas, momento en el cual se produjo la interrupción de los cultivos de servicio (Sainju et al., 1998).

Por otro lado, no se encontró diferencias significativas debido a la inoculación en vicia, ello posiblemente esté asociado al número de muestras evaluadas. Sin embargo, la vicia inoculada produjo 33.3 % más materia seca respecto a la vicia sin inocular. Este aumento coincide con la información brindada en los ensayos de AAPRESID, donde muestran que la inoculación en vicia incrementa la producción de biomasa vegetal en aproximadamente 30% (AAPRESID, 2022).

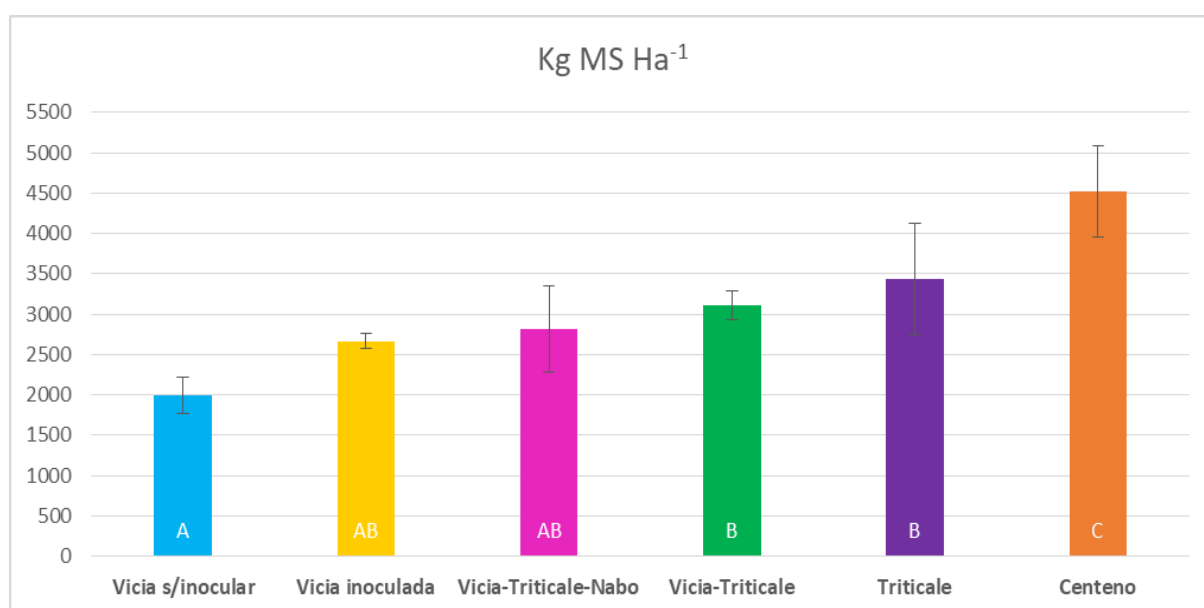


Figura 9. Producción materia seca (MS) aérea en los tratamientos evaluados.

3.2 Infiltración

La evaluación de infiltración se realizó en los tratamientos vicia inoculada, centeno, triticale, vicia+triticale y testigo. Luego de las mediciones mediante el infiltrómetro de anillo simple y sus posteriores cálculos, se observó que el tratamiento vicia-triticale arrojó un valor de infiltración final superior al resto de los tratamientos, $247,6 \text{ mm h}^{-1}$, diferenciándose significativamente ($F_{6/16} = 4,93$; $P = 0,0139$) de testigo, centeno y vicia, excepto de triticale (146 mm h^{-1}), que mostró valores intermedios a vicia+triticale y el resto de los tratamientos. El resto de los tratamientos mencionados (testigo, centeno y vicia) no se diferenciaron significativamente entre sí, como se puede observar en la Figura 10.

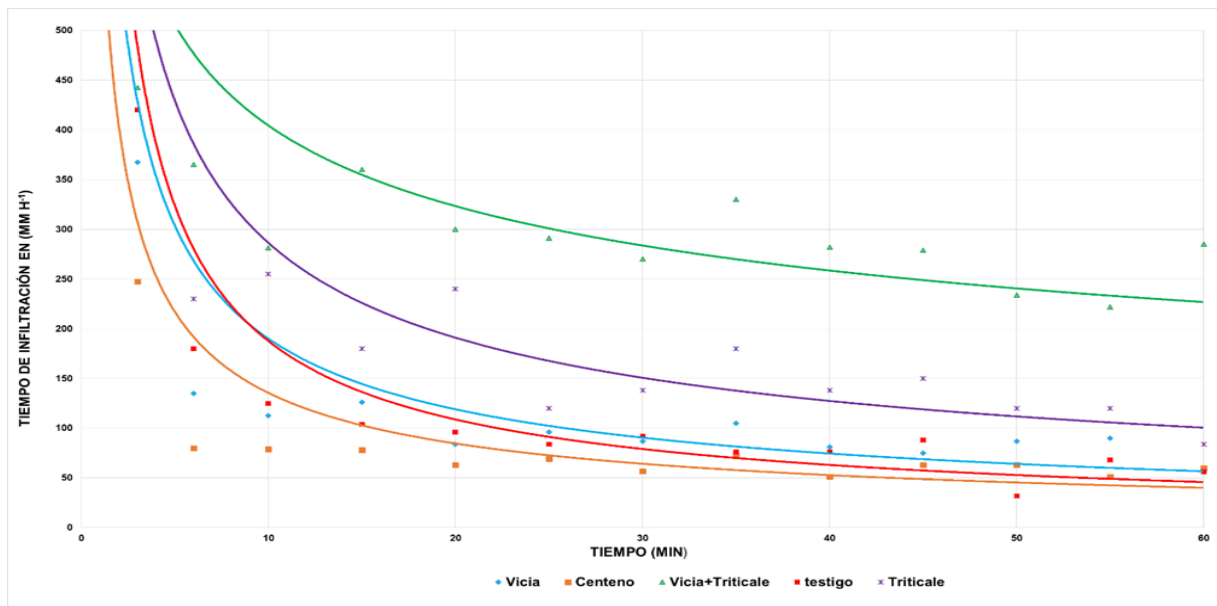


Figura 10. Infiltración instantánea en función del tiempo en mm/h de los tratamientos evaluados.

La evaluación de la infiltración nos permite inferir que el único tratamiento que mejoró las condiciones físicas del suelo fue vicia-triticale, lo que permitió aumentar los mm h^{-1} infiltrados con respecto al testigo. Lamentablemente se perdió la oportunidad de realizar la evaluación de infiltración en el tratamiento vicia+triticale+rábano, el cual, debido a la naturaleza de la especie *R. sativus*, podría haber conducido al incremento de la tasa de infiltración.

Si bien es un parámetro que requiere varios ciclos productivos para poder observar diferencias, estos resultados siguen la misma tendencia que en ensayos realizados por Rillo et

al. (2018), donde se realizó la evaluación de la tasa de infiltración luego de 10 años consecutivos de inclusión de cultivos de servicio en la rotación, resultando en incrementos en esta condición (Rilo et al., 2018).

El resultado final de infiltración de centeno y vicia fueron similares al testigo, con una leve tendencia superior por parte de la vicia, lo cual podría estar dado por su sistema radicular pivotante. Diferente fue el resultado de vicia-triticale donde se pudo observar una diferencia significativa, posiblemente por presentar un buen desarrollo radicular, tanto fasciculado como pivotante.

3.3 Humedad

3.3.1 Momento 1: Secado de cultivo de servicio

Posterior al secado de los cultivos de servicio se observó que, en la primera profundidad evaluada (0-20 cm) no se encontraron diferencias significativas ($F_{6/20} = 1,48$; $P = 0,25$) entre tratamientos (Figura 11). Centeno junto con vicia+triticale+rábano, vicia s/inocular y triticale superaron el valor de lámina media (mm) del testigo. La ausencia de diferencias significativas entre tratamientos puede ser debido a que la evaporación del suelo en el tratamiento testigo fue compensada con el consumo hídrico de los cultivos de servicio, independientemente de la especie implantada, los cuales generaron una biomasa suficiente para aumentar el espesor de cobertura sobre el suelo y así evitar la evaporación directa desde el mismo (Miranda et al., 2012).

Para la profundidad 20-80 cm el testigo arrojó el valor más alto de lámina (102,63 mm) aunque no se diferenció significativamente ($F_{6/20} = 2,51$; $P = 0,0730$) del resto de los tratamientos, resaltando a vicia s/inocular (97 mm) y centeno (97,75 mm) como los que más se aproximaron a los valores del testigo (Figura 12). En este caso, a pesar de que no hubo diferencias estadísticas el resultado fue el esperado, donde el testigo arrojó valores superiores a los demás tratamientos. A una mayor profundidad evaluada es más notorio el consumo hídrico de los cultivos de servicio con respecto a los primeros centímetros del perfil.

En la totalidad del perfil (0-80 cm) no se observaron diferencias entre tratamientos ($F_{6/20} = 2,57$; $P = 0,0686$) (Figura 13). Se puede considerar una probabilidad de error mayor y afirmar que hubieron diferencias significativas con un $p < 0,1$. La tendencia de estos resultados nos indica que, en aquellos tratamientos con cultivo de servicio el contenido hídrico en superficie

es mayor con respecto al testigo, ya que evitan la evaporación directa del agua, en cambio, en profundidad sucede lo contrario como consecuencia del consumo hídrico por parte de las raíces.



Figura 11. Contenido hídrico expresado en lámina (mm) al momento del secado de los CS, en los primeros 20 cm del perfil de suelo.

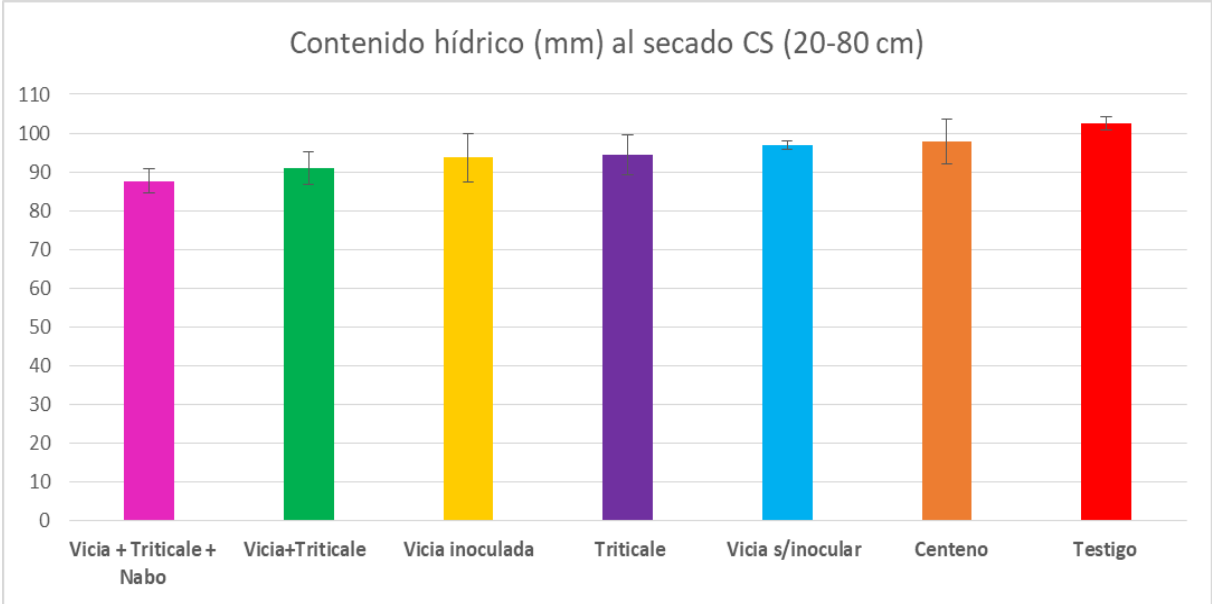


Figura 12. Contenido hídrico expresado en lámina (mm) al momento del secado de los CC, en la profundidad 20-80 cm del perfil del suelo.

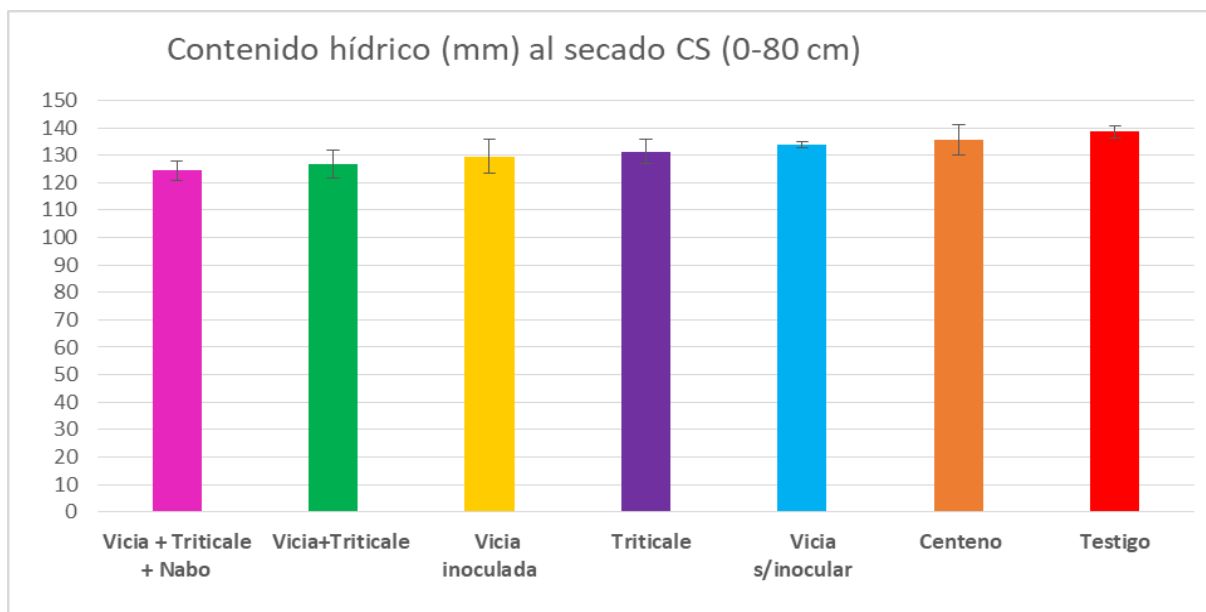


Figura 13. Contenido hídrico expresado en lámina (mm) al momento del secado de los CC, en la totalidad del perfil (0-80 cm).

3.3.2 Momento 2: Siembra de maíz

La evaluación se realizó en los tratamientos vicia s/inocular, centeno, vicia+triticale y testigo. Al momento de la siembra del maíz, hubo diferencias significativas ($F_{3/11} = 4,09$; $P = 0,0493$) en los primeros 20 cm del perfil del suelo, donde Centeno (38,35 mm) y Vicia s/inocular (38,52 mm) se diferenciaron del testigo (33,69 mm) como se puede observar en la Figura 14.

Por otra parte, en la profundidad 20-80 cm no se encontraron diferencias significativas ($F_{3/11} = 3,27$; $P = 0,0802$), el testigo mostró el mayor contenido hídrico (107,27 mm) centeno fue el menor, mientras que vicia + triticale y vicia s/inocular arrojaron valores intermedios (Figura 15). Se puede considerar una mayor probabilidad de error y decir que fueron significativas con un $p < 0,1$.

Cuando se analizó el perfil completo (0-80 cm) (Figura 16) no se observan diferencias significativas ($F_{3/11} = 0,84$; $P = 0,5074$), pero se da una tendencia donde el testigo y la vicia sin inocular tienen un contenido hídrico mayor con respecto al centeno y vicia-triticale.

Como se mencionó anteriormente para la humedad al momento del secado de los cultivos de servicio, en este caso se da una dinámica similar donde en los primeros centímetros del perfil del suelo (0-20 cm) se puede observar un menor contenido hídrico en el testigo con respecto a otros tratamientos, esto se debe a la incidencia directa de la radiación solar sobre el suelo en barbecho que provoca una mayor evaporación (Fernández et al., 2012).

En cambio, a una mayor profundidad (20-80 cm), el impacto de la evaporación no tiene tal efecto como si el consumo hídrico de los cultivos de servicio, donde se puede apreciar sin ser significativo, que el testigo presenta un mayor contenido de agua.

En el perfil completo (0-80 cm) se da una dinámica similar a la segunda profundidad evaluada con la tendencia del testigo a presentar un mayor contenido hídrico.

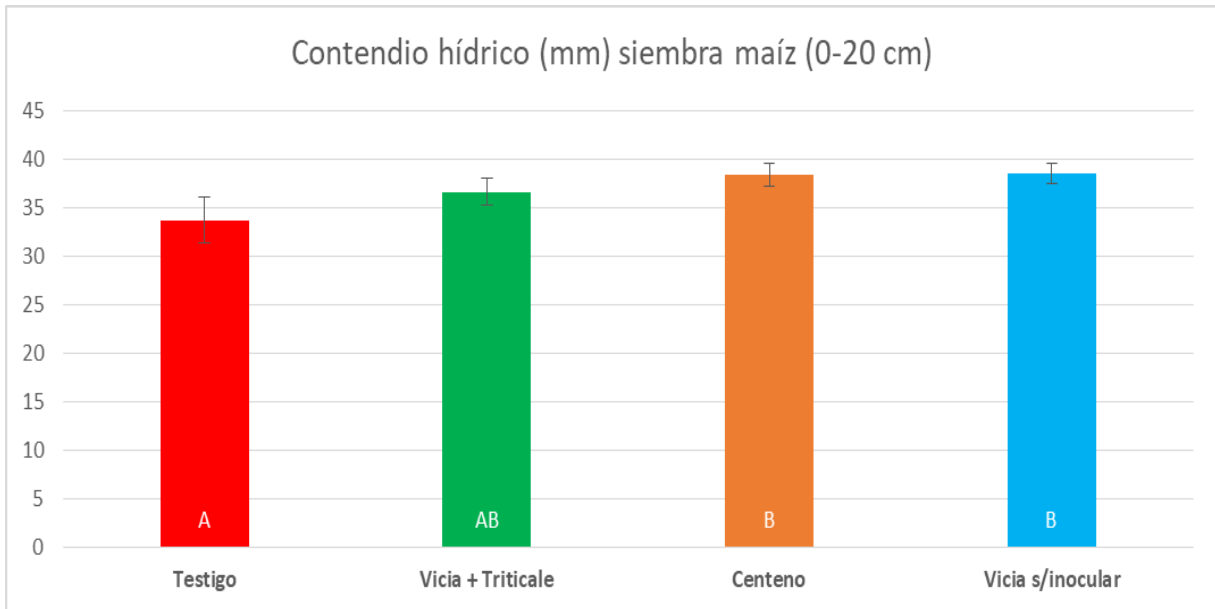


Figura 14. Contenido hídrico expresado en lámina (mm) a la siembra del maíz para la profundidad 0-20 cm.

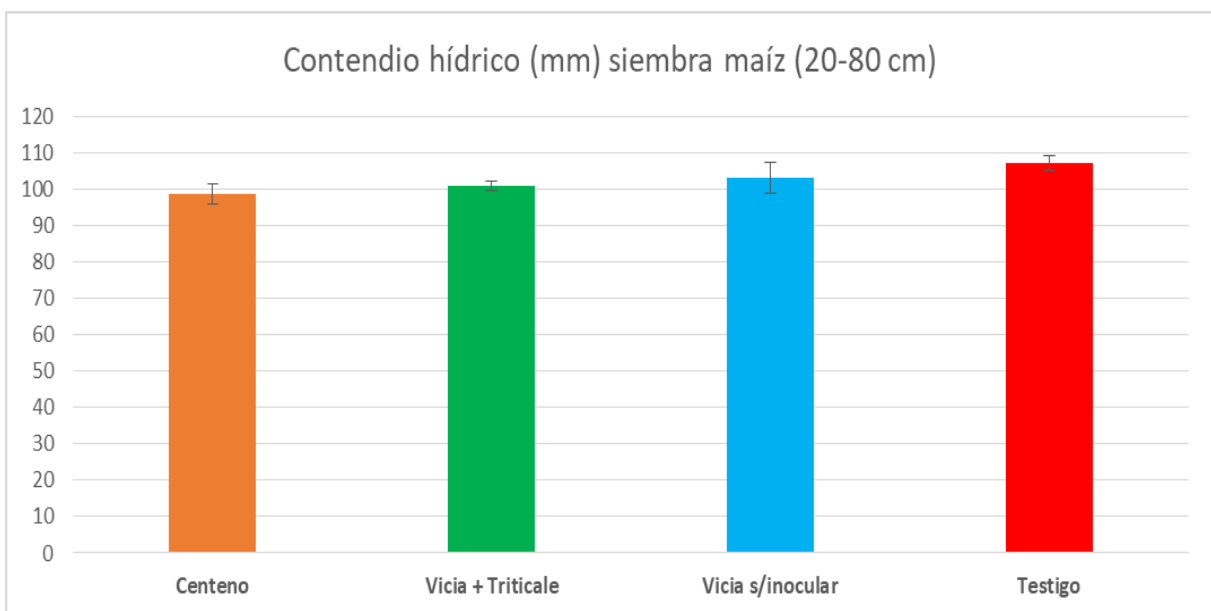


Figura 15. Contenido hídrico expresado en lámina (mm) a la siembra del maíz para la profundidad 20-80 cm.

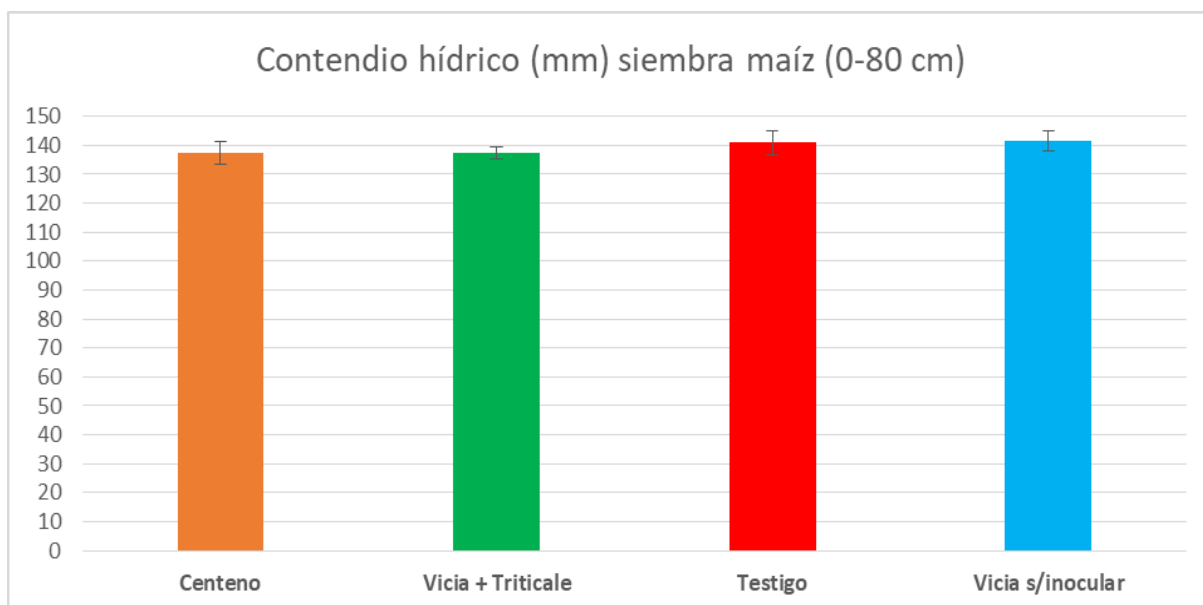


Figura 16. Contenido hídrico expresado en lamina (mm) a la siembra de maíz para la totalidad del perfil (0-80 cm).

3.4 Resistencia a la penetración

En base a los muestreos realizados se puede observar en la Figura 17 la tendencia a disminuir la resistencia a la penetración que hay por parte de los cultivos de servicio con respecto al testigo. Debido a que la humedad del suelo al momento del muestreo tiene grandes implicancias en los resultados de la determinación de resistencia a la penetración (Castiglioni et al., 2016), el muestreo se realizó el mismo día que se determinó la humedad al momento del secado de los cultivos de servicio, y en base a los datos mostrados previamente en la Figura 13 se puede observar que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo. Por lo tanto, se puede afirmar que las diferencias en la resistencia a la penetración se deben exclusivamente a las propiedades ejercidas sobre el suelo por parte de los cultivos de servicio.

Debido a la biomasa radical producida por los cultivos de servicio se produce una mejor distribución de los agregados del suelo, favoreciendo al incremento de los macro y mesoporos, y de esta manera reduciendo la resistencia a la penetración (Castiglioni et al., 2016). Esto podría favorecer a una mayor exploración de la raíces y como consecuencia un incremento en el desarrollo del cultivo posterior. A su vez, también mejoraría la capacidad de infiltración de agua en el perfil, evitando así pérdidas por superficie y una potencial erosión de suelo.

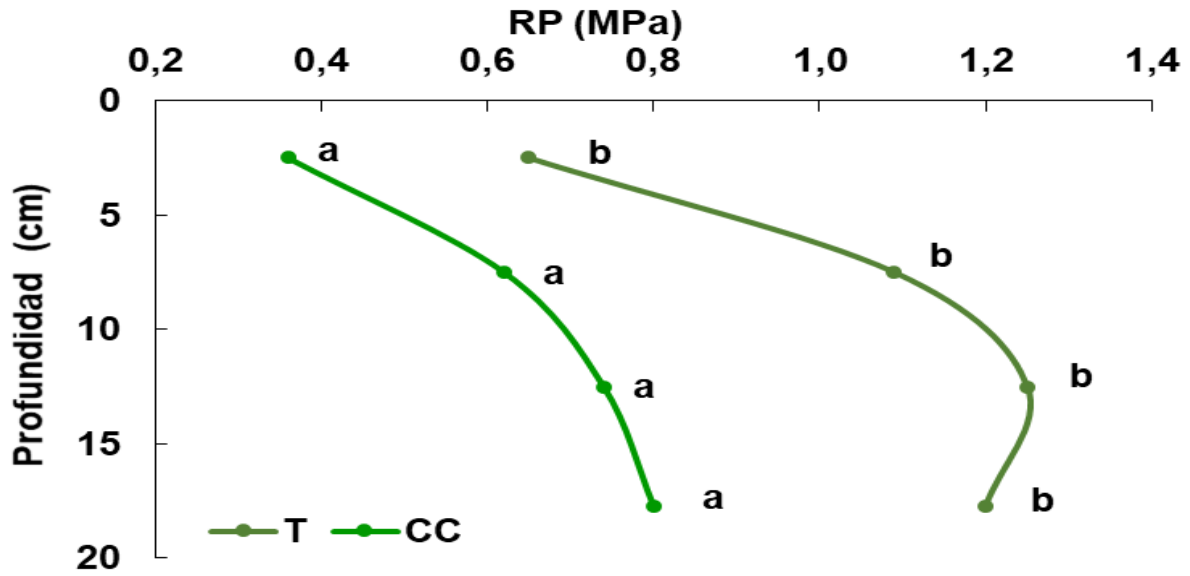


Figura 17. Resistencia a la penetración (MPa) en función de la profundidad. Comparando un promedio de todos los CC y el Testigo.

3.5 Nitrógeno a la siembra de maíz

La evaluación se realizó en los tratamientos vicia s/inocular, centeno, vicia+triticale y testigo. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas ($F_{3/11} = 1,48$; $P = 0,2921$) entre los tratamientos (Figura 18). Sin embargo, se puede apreciar una tendencia hacia la disminución del contenido de nitrógeno en aquellos tratamientos que presentaron una gramínea pura o consociada, por consumo del nutriente y/o su posterior inmovilización (Cazorla et al., 2011). Lo contrario sucede con Vicia, donde el resultado muestra una tendencia en incremento de nitrógeno con respecto al testigo por su capacidad de fijación biológica y posterior descomposición de sus residuos (Cazorla et al., 2011). No se encontraron diferencias posiblemente por la amplia variabilidad de los datos. Se recomienda tomar una mayor cantidad de muestras o muestras compuestas

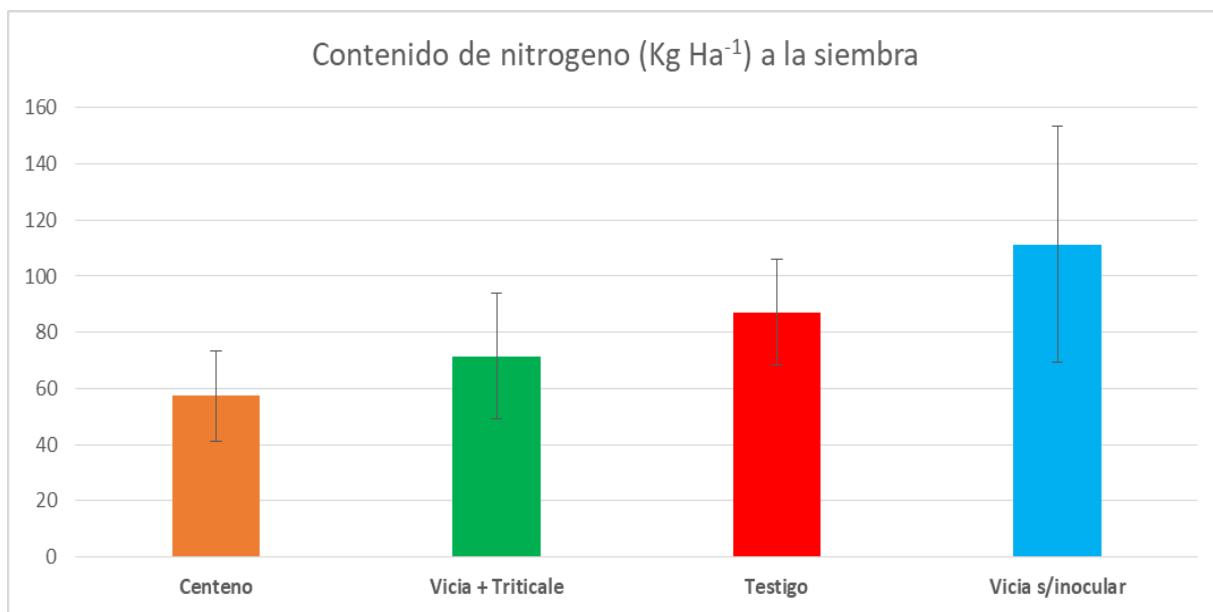


Figura 18. Contenido de nitrógeno (kg/ha) de cuatro tratamiento a la siembra de maíz.

3.6 Rendimiento maíz

La evaluación se realizó en los tratamientos vicia s/ inocular, centeno, vicia+triticale+rábano, vicia+triticale y testigo. Los resultados del análisis estadístico mostraron diferencias significativas ($F_{1/20} = 11,83$; $P = 0,0040$) en el efecto hídrico (con y sin riego). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes cultivos de servicio y el testigo dentro de cada ambiente hídrico ($F_{4/20} = 2,80$; $P = 0,0674$), ni interacción cultivo de servicio por riego ($F_{1/20} = 0,01$; $P = 0,9359$) (Figura 19).

A pesar de ello, en ambos ambientes hídricos se observó una tendencia al aumento del rendimiento cuando se utiliza como antecesor un cultivo de servicio, independientemente cual sea la especie. Esta tendencia es aún más notoria en seco. Se recomienda aumentar el número de parcelas o realizar bloques, de esta manera se puede reducir el error y tener un dato más certero en futuras evaluaciones. Realizar el ensayo en otros ambientes también sería una buena opción para enriquecer el trabajo.

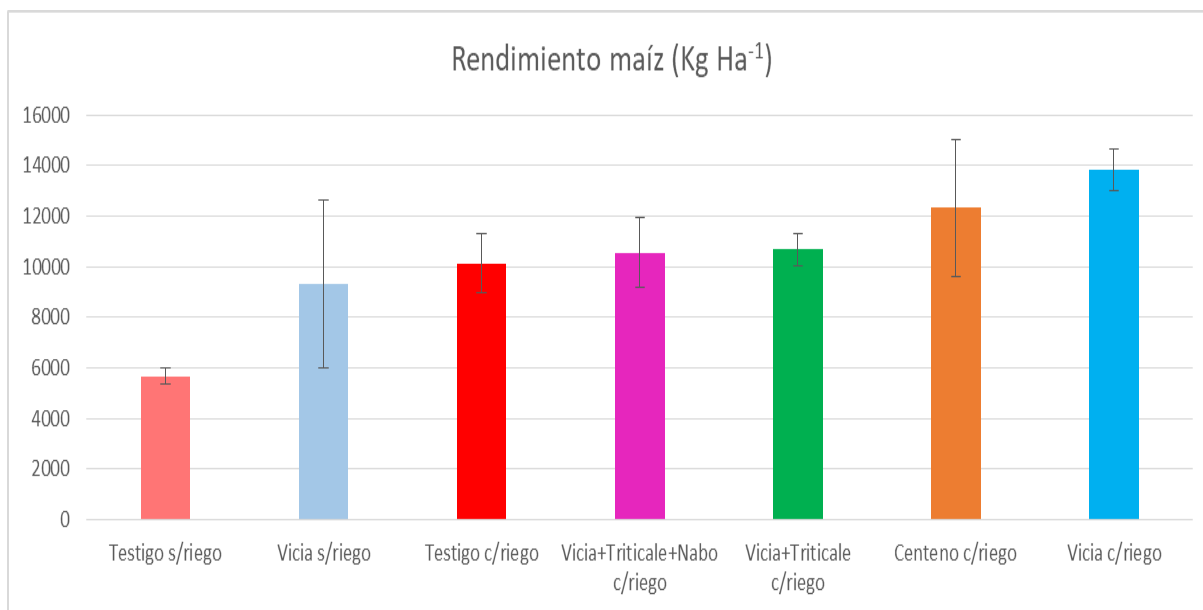


Figura 19. Rendimiento (kg ha⁻¹) de maíz en secano (dos tratamientos) y bajo riego (cinco tratamientos).

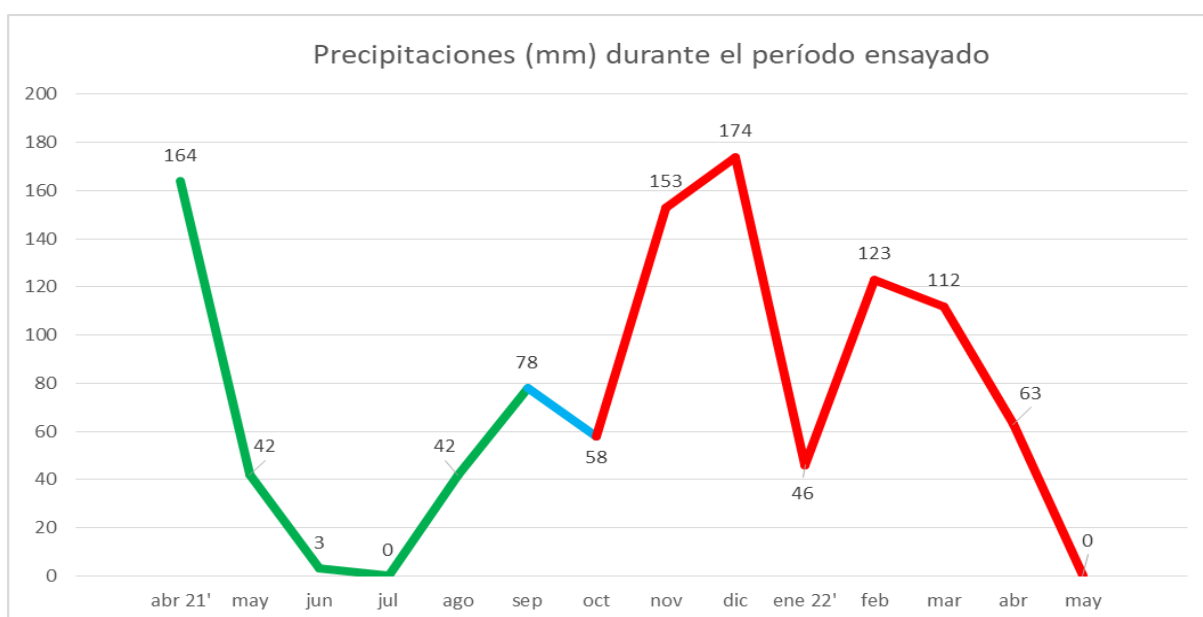


Figura 20. Precipitaciones (mm) durante el periodo ensayado. CS (verde), secado-siembr maíz (celeste) y maíz (rojo).

Las precipitaciones registradas durante el periodo de CS fueron de 303 mm, mientras las ocurridas durante el ciclo del maíz fue de 729 mm. En el intervalo entre el secado de los CS y la siembra del cultivo las lluvias fueron de 81 mm.

En general fue un año con precipitaciones superiores a la media histórica (770 mm) (IGRM, 2001), lo cual permitió que el suelo no presente un bajo contenido hídrico en ningún momento, principalmente al momento del secado de los CS.

La inclusión de cultivos de servicio produjo aportes considerables de biomasa aérea, la cual conlleva un costo hídrico que, en este caso, se pudieron remediar con las precipitaciones ocurridas desde el secado hasta la siembra de maíz (81 mm). Además, incluir cultivos de servicio entre los cultivos de renta favorece la descompactación del suelo y mejora la distribución de sus agregados, efecto que tiende a reducir la resistencia a la penetración y a aumentar la infiltración en el perfil (Rilo et al., 2018).

Gracias a la descomposición de sus residuos que tienden a realizar un aporte considerable de nitrógeno, en ambos sistemas se puede apreciar la tendencia en el incremento de rendimiento con la vicia como cultivo de cobertura (Cazorla et al., 2011).

Los resultados de humedad, tanto al momento del secado como a la siembra del maíz, nos demuestran que al no haber diferencias significativas en los tratamientos con el testigo, es factible la implementación de esta herramienta.

En base a los resultados se considera a la vicia como el mejor antecesor al maíz, tanto en un sistema de secano como bajo riego.

4. CONCLUSION

La producción de biomasa de los cultivos de servicio varió según las especies implantadas, siendo las gramíneas las que mayor volumen aportaron.

La infiltración es un parámetro que puede ser mejorado con la inclusión de cultivos de servicio en la rotación, como quedó demostrado con el tratamiento vicia-triticales. También se produce una descompactación del suelo, lo cual se vio reflejado en una menor resistencia a la penetración.

En el sistema bajo riego si bien no hubo diferencias significativas entre el testigo y los demás tratamientos, se puede observar una tendencia en aumento de rendimiento principalmente con la vicia, tendencia que en seco fue aún más marcada. Este aumento pudo deberse por la fertilización nitrogenada que recibió el cultivo sin discriminación entre tratamientos, sumado al aporte del nutriente por medio de la fijación biológica.

Además de no sufrir una depresión de rendimiento del maíz, la inclusión de cultivos de servicio a la secuencia de cultivos sería una alternativa eficiente en el sudoeste bonaerense para la generación de biomasa y aporte de nutrientes, lo cual contribuye a la sustentabilidad del sistema a largo plazo. Su costo hídrico no afecta al cultivo posterior siempre y cuando se maneje adecuadamente la fecha de secado.

5. BIBLIOGRAFÍA

- AAPRESID. 2019. Evolucion siembra directa en Argentina. Disponible en:
<https://www.aapresid.org.ar/blog/evolucion-de-siembra-directa-en-argentina-campana-2018-19/>
- AAPRESID. 2022. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. *Por que deberías inocular tus vicias*. Disponible en:
https://biblioguias.ucm.es/trabajosacademicos/citas-referencias?gclid=EAlaIqObChMI746O_qjr_QIV6yIMCh3E6gH7EAAYASAAEgKuAvD_BwE
- AAPRESID. 2023 *Malezas*. Disponible en: <https://www.aapresid.org.ar/rem/malezas>
- Blanco-Canqui, H., Claassen M.M., Mikha M.M., Presley D.M., 2011. Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 1471–1482 .
- Brihet J., Gayo S., Regueiro D. 2021. Cultivos de cobertura, *ReTAA*. 42.
- Cambio climático Coronel Suárez. 2023. Meteoblue. Disponible en:
https://www.meteoblue.com/es/climate-change/coronel-su%c3%a1rez_argentina_3860164
- Capurro J., Dickie M. J., Surjack J., Monti J., Ninfi D., Zazzarini A., Tosi E., Andriani J., Gonzalez M. C. 2012. Cultivos de cobertura en el sur de la provincia de Santa Fe. En: Álvarez, C., Quiroga, A., Santos, D., Bodrero M. (Eds.) *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. 1° ed. La Pampa: Ediciones INTA. p. 92-104.
- Castellanos-Navarrete A., Chocobar A., Cox S., Fonteyne R.A., Govaerts B., Jespers N., Kienle F., Sayre K. D. y Verhulst N. 2013. *Resistencia a la penetración*. México. Cimmyt.
- Castiglioni M., Navarro Padilla R., Eiza M., Romaniuk R., Beltran M., Mousegne F. 2016. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUAS. RIEGO Y DRENAJE. *Ciencia del suelo*, 34(2) 263-278.
- Cazorla C., Baigorria T., Bojanich A., Lardone A., Aimetta M., Vilches V., 2011. *Antecedentes de maíz: barbecho o cultivos de cobertura?*. E.E.A Marcos Juarez. INTA.
- Criadero el Cencerro 2021 Cultivos de servicio. Disponible en:
<https://www.elcencerro.com/cultivo-de-servicios>.

- Cultivos de cobertura: qué, cómo y por qué 2017. *Alltecbio*. Disponible en:
<https://alltecbio.com/cultivos-de-cobertura-que-como-y-por-que/>
- Echeverría H.E., Sainz Rosas H. 2015. Nitrógeno. En: Echeverría H.E.; García F.O. (eds.) *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. 2ª ed. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 189-228
- Eiza M. y Carfagno P. 2018 Medición de la infiltración en el suelo. Infiltrómetro de anillo simple y simulador de lluvias, Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos, Anguil, La Pampa, INTA, 25.36.
- Espina H. 2016. La rotación de cultivos es necesaria para conservar los suelos. Disponible en:
<https://intainforma.inta.gob.ar/la-rotacion-de-cultivos-es-necesaria-paraconservar-los-suelos/>. Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2020.
- . Estadísticas agrícolas 21/22. Municipalidad Coronel Suárez. 2023. Disponible en:
<https://www.coronelsuarez.gob.ar/wp-content/uploads/2023/02/Estimaciones2021-2022.pdf>
- Fernandez R., Quiroga A., Noellemeyer E. 2012. Cultivos de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semirárida pampeana?. *Ciencia del suelo*, 30(2) 137-150.
- IGRM. 2021. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Carta de Línea de Base Ambiental 3763-IV CORONEL SUÁREZ. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina.
- Johnson G. A., 1993. Cover crop management and weed control in corn (*Zea mays*). *Weed Technol.* 7, 425–430.
- Kaspar T. C., and Singer J. W. 2011. The use of cover crops to manage soil. Pages 321-337 in: *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture*. J. Hatfield and T. Sauer, eds. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Kladivko E., Kaspar T., Jaynes D., Malone R., Singer J., Morin X., and Searchinger, T. 2014. Cover crops in the upper Midwest USA: Potential adoption and reduction of nitrate leaching in the Mississippi River Basin. *J. Soil Water Conserv.* 69:279-291.
- Lin B. B. 2011. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience* 61, 183–193.

- Miranda W., Scianca C., Barraco M., Álvarez C., Lardone A., 2012. Cultivos de cobertura: dinámica del agua luego de dos momentos de secado. *XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata. INTA.
- Poeplau C. & Don A. 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—a meta-analysis. *Agr. Ecosyst. Environ.* 200, 33–41 .
- Quiroga A., Fernandez R., Álvarez C. 2018. *Análisis y evaluación de propiedades físico hídricas de los suelos. Estación Experimental Agropecuaria Anguil*. INTA
- Rainaud M. 2019. Informe de evolución de Siembra Directa en Argentina. Campaña 2018/19. Asociación Argentina de Productores de Siembra Directa (Aapresid).
- Rillo S., Alvarez C., Quiroga A., Noellemeyer E., Díaz Zorita M y Frasier. 2018. CAMBIOS EN LOS CONTENIDOS DE CARBONO E INFILTRACIÓN POR LA INCLUSIÓN DE CULTIVOS DE COBERTURA. *Congreso Argentino de la ciencia del suelo*. Tucumán. INTA.
- Ruffo M. L & Parsons A. T; 2004 Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas *Informes agronómicos del cono sur*. 21
- Sainju U.M., Singh B.P. & Whitehead W.F. 1998. Cover crop root distribution and its effects on soil nitrogen cycling. *Agron. J.* 90: 511-518.
- Sá Pereira E., Galantini J., Quiroga A. 2012. Sistemas de cultivos de cobertura de suelo de otoño invierno: sus efectos sobre la disponibilidad de. En: Álvarez C., Quiroga A., Santos D., Bodrero M. (Eds.) *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. 1° ed. La Pampa: Ediciones INTA. p. 76-82.
- Sá Pereira E., Vechi G., Ibarra C., Pedelaborde J.M. 2015. Cultivos de cobertura de invierno como alternativa a barbechos de larga duración en el sudoeste de Buenos Aires. Buenos Aires. *Red de innovadores*. 22. 100-109.
- Seifert C. A., Azzari G., Lobell D.B., 2018 Satellite detection of cover crops and their effects on crop yield in the Midwestern United States. *Environ. Res. Lett.* 13, 064033.
- Singer J. W., 2007 Are cover crops being used in the US corn belt? *J. Soil Water Conserv.* 62, 353–358.
- Strock J. S., Porter P.M., Russelle M.P. 2004 Cover cropping to reduce nitrate loss through subsurface drainage in the northern US Corn Belt. *J. Environ. Qual.* 33, 1010–1016.

- MAGyP. 2023. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Subsecretaría de Agricultura, Dirección Nacional de Agricultura, Dirección de Estimaciones Agrícolas. *Estimaciones agrícolas*. En línea. Disponible en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> (último acceso 17 de marzo de 2023)
- Thorntwaite C.W. 1984. An approach toward a rational classification of climate. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2307/210739>
- Weil R., and Kremen A. 2007. Thinking across and beyond disciplines to make cover crops pay. *J. Sci. Food Agric.* 87:551-557.