

Rendimiento de la soja (*Glycine max* L.) y propiedades físicoquímicas de un Cambisol sometido a dos sistemas de sucesión de cultivos

Soybean (*Glycine max* L.) Performance and Physicochemical Properties of a Cambisol Under Two Crop Succession Systems

Matthew Giesbrecht¹, Frank Wiebe¹ y Holger Toews¹

¹ Cooperativa Chortitzer Ltda., Departamento Servicio Agropecuario, Sección Producción Vegetal. Loma Plata, Paraguay.

*Autor para correspondencia:

matthewg@chortitzer.com.py

Conflictos de interés:

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Contribución de autores:

Todos los autores realizaron contribuciones sustanciales a la concepción y diseño de este estudio, al análisis e interpretación de los datos, revisión del manuscrito y aprobación de la versión final. Todos los autores asumen la responsabilidad del contenido del manuscrito.

Financiamiento:

Cooperativa Chortitzer Ltda. y Fundación IDEA-GRO

Periodo de publicación:

Julio-Diciembre de 2024

Historial:

Recibido: 28/07/2024;

Aceptado: 24/10/2024

Editor responsable:

Arnaldo Esquivel Fariña
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

Licencia:

Artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons CC-BY 4.0

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dos sistemas de sucesión de cultivos bajo siembra directa (SD) sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, así como en el rendimiento de la soja en un Cambisol. El experimento se llevó a cabo en una finca ubicada en la aldea Paratodo, Pdte. Hayes, Paraguay, utilizando un diseño experimental en franjas con dos Cultivos de Cobertura (CC) como tratamientos: *Megathyrsus maximus* cv. Gatton Panic (Gatton) y una sucesión soja/trigo/soja (Trigo). Las variables evaluadas fueron biomasa aérea (BIOM), humedad gravimétrica (HG), concentración de nitrógeno ($\text{NO}_3\text{-N}$ y $\text{NH}_4\text{-N}$), densidad aparente (DAP), resistencia a la penetración (RP), tasa de infiltración (TI), altura de la planta de soja y rendimiento del cultivo de soja. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza con la prueba de Scott y Knott al 5% de significancia, prueba t para dos muestras con varianzas iguales, y se describieron tendencias mediante regresiones lineales y polinómicas. El tratamiento Gatton mostró una mayor capacidad de retención de HG durante el barbecho y desarrollo del cultivo, con valores medios durante todo el ensayo de 19,2% y 15,4% para Gatton y Trigo respectivamente. Además, Gatton presentó 2,09 veces más BIOM al inicio (11.311 versus 5.390 kg ha^{-1}) y descompuso 1,88 veces más residuo vegetal, registrando una mayor tasa de descomposición diaria en comparación con Trigo, con valores de 12,7 $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y 9,5 $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, respectivamente. La DAP fue un 3% menor en Gatton (1,32 g cm^{-3}) en comparación con Trigo (1,36 g cm^{-3}), que aumentó con la profundidad (25-50 cm). El Trigo registró valores críticos de RP superiores a 3 MPa al momento de la siembra en la profundidad de 5-15 cm y al fin del ensayo en la profundidad de 5-20 cm. La altura de plantas de soja fue un 11,2% mayor con Gatton (99,6 cm versus 89,6 cm), donde también se obtuvo mayor rendimiento de granos (3.336 kg ha^{-1}) comparado con el Trigo (2.929 kg ha^{-1}), con una diferencia de 13,9%. El sistema de producción basado en un CC con *Megathyrsus maximus* cv. Gatton Panic mejora las propiedades físicoquímicas del suelo y aumenta el rendimiento de la soja.

Palabras clave: biomasa, residuos agrícolas, cultivos de cobertura, nitratos, soja

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of two crop succession systems under no-till (NT) on the physical and chemical properties of the soil, as well as soybean yield, in a Cambisol. The experiment was conducted on a farm located in the Paratodo village, Pdte. Hayes, Paraguay, using a strip plot design with two Cover Crops (CC) as treatments: *Megathyrsus maximus* cv. Gatton Panic (Gatton) and a soybean/wheat/soybean succession (Wheat). The variables evaluated were aboveground biomass (BIOM), gravimetric moisture (GM), nitrogen concentration ($\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$), bulk density (BD), penetration resistance (PR), infiltration rate (IR), soybean plant height, and soybean yield (*Glycine max* L.). Data were analyzed using analysis of variance with the Scott y Knott test at 5% significance, a t-test for two samples with equal variances, and trends were described through linear and polynomial regressions. The Gatton treatment demonstrated a greater capacity for retaining GM during the fallow and crop development stages, with average values throughout the trial of 19,2% for Gatton and 15,4% for Wheat. Additionally, Gatton recorded 2,09 times more BIOM at the start (11.311 vs. 5.390 kg ha^{-1}) and decomposed 1,88 times more crop residue, showing a higher daily decomposition rate compared to Wheat, with values of 12,7 $\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ and 9,5 $\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$, respectively. BD was 3% lower in Gatton (1,32 g cm^{-3}) compared to Wheat (1,36 g cm^{-3}), and it increased with soil depth (25–50 cm). Wheat recorded critical PR values exceeding 3 MPa at sowing at depths of 5–15 cm and at the end of the trial at depths of 5–20 cm. Soybean plant height was 11.2% higher with Gatton (99,6 cm vs. 89,6 cm), which also achieved greater grain yield (3.336 kg ha^{-1}) compared to Wheat (2.929 kg ha^{-1}), with a difference of 13,9%. The production system based on a CC with *Megathyrsus maximus* cv. Gatton Panic improves the soil's physicochemical properties and increases soybean yield.

Keywords: biomass, agricultural residues, cover crops, nitrates, soybean

INTRODUCCIÓN

El aumento del área destinada a la agricultura en el Chaco paraguayo, junto con el crecimiento de grandes negocios, ha generado un creciente interés por la adopción de tecnologías adecuadas que promuevan una producción sostenible. Se ha iniciado la incorporación y adopción de tecnologías verdes como la siembra directa en los sistemas de producción, con rotaciones continuas de grano o fibra (solo agricultura) o mixtas (agricultura/ganadería/forestal), esto para obtener mayor incorporación de biomasa para el suelo (Derpsch, Lange, Birbaumer y Moriya, 2010).

Los cultivos de cobertura, frecuentemente usados en los sistemas de producción de soja, son gramíneas anuales o perennes que se destacan por su potencial de generar e incorporar elevadas cantidades de residuos orgánicos al suelo (Koudahe, Allen y Djaman, 2022; Pereira, Galantini y Quiroga, 2017); entre estas se pueden mencionar el sorgo granífero, sudán negro, avena, trigo y pasturas de varios géneros. Los cultivos de cobertura promueven un mayor rendimiento, la estabilidad de los cultivos agrícolas (Gaudin et al., 2015) y la conservación del suelo, especialmente para suelos de textura arenosa (Dos Santos Cordeiro, Echer y Araujo, 2021). Estos cultivos deben reunir características como un crecimiento vigoroso y residuos persistentes que se descomponen lentamente y proporcionan una cobertura sustancial del suelo, pero que pueden eliminarse con facilidad por medios mecánicos, químicos u otros (Koudahe et al., 2022).

Los cultivos de cobertura tienen un efecto positivo sobre las propiedades químicas del suelo que incluyen el carbono orgánico del suelo o materia orgánica, las concentraciones de nutrientes (especialmente nitrógeno), entre otras (Koudahe et al., 2022). La composición bioquímica de cada residuo, en especial su relación C/N y lignina, asume un papel relevante frente a la dinámica del nitrógeno (N) y el carbono (C) en el suelo, así como sobre la disponibilidad de nutrientes para el cultivo siguiente (Bauer y Black, 1994; Pereira et al., 2017).

Los beneficios que tienen los cultivos de cobertura sobre las propiedades físicas del suelo incluyen una densidad aparente reducida, una mayor estabilidad del agua y agregados secos, así como una mayor infiltración de agua y una conductividad hidráulica saturada (Reeves, Rogers, Droppers, Prior y Powell, 1992). Además, contribuyen a reducir la evaporación del agua del suelo con sus residuos adecuados, preservando así la humedad del suelo para el siguiente cultivo (Blanco-Canqui y Ruis, 2020; Sharma et al., 2018).

No obstante, manejos inadecuados del suelo y la falta de cultivos de cobertura conllevan a la reducción de las propiedades físicas del suelo (Bartzen, Hoelscher, Ribeiro y Seidel, 2019), como el aumento de la resistencia a la penetración (RP) debido a la reducción de la porosidad, limitando el crecimiento radicular (Herrick y Jones, 2002; Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2003), lo que afecta al desarrollo de la planta y su producción (Klein y Camara, 2007). La resistencia a la penetración es un buen indicador para localizar rápidamente zonas potenciales de

compactación dentro de un perfil y áreas de compactación dentro de un campo, las que se pueden corroborar con mediciones detalladas de la densidad aparente del suelo (Herrick & Jones, 2002; Koudahe et al., 2022).

La soja (*Glycine max* L.) es uno de los cultivos extensivos más destacados del Paraguay, con éxito de expansión en la región del Chaco paraguayo bajo el principio de siembra directa por medianos y grandes productores (Derpsch et al., 2016). La soja demanda suelos bien drenados, estructurados, con buena retención de agua y materia orgánica. Es una planta de origen tropical con potencial de fijación biológica de nitrógeno (FBN) y requiere de 77-80 Kg ha⁻¹ N para cada tonelada de grano producido (Ohyama et al., 2017; Salvaggiotti et al., 2009; Tamagno et al., 2017; Weber, 1966). Por tanto, para aumentar la resiliencia productiva de la soja ante temperaturas altas y precipitaciones muy variables, que se dan en un clima regional semiárido-subhúmedo con 800-900 mm de precipitaciones anuales y 1.600-1.700 mm de evapotranspiración potencial (Fundación para el Desarrollo Sustentable del Chaco, 2005), tienen que preceder estrategias de manejo como la rotación de cultivos con cultivos de cobertura, fecha de siembra y acumulación de agua en el perfil del suelo (Casali, Herrera y Rubio, 2022).

En los sistemas productivos chaqueños actuales se presentan problemas físicos y químicos del suelo en lotes con alta productividad, principalmente después de periodos prolongados con pluviometría escasa y temperaturas altas (Pérez et al., 2020; Urinovsky Irigoyen, Toledo, Arzuaga, Acosta, & Contreras Leiva, 2021). Entre los problemas físicos se encuentran el sellamiento de la capa superficial, el escurrimiento del agua, una mayor densidad aparente y menor tasa de infiltración llevando finalmente a una acumulación desuniforme y reducida de agua en el perfil del suelo.

Los sistemas de producción con cultivos de cobertura que aportan alta cantidad de biomasa tardan en descomponerse, y, por ende, las bacterias requieren altos contenidos de nitrógeno para su descomposición, y esto puede llevar a un déficit de nitrógeno para la planta (Paul y Clark, 1996) o bajar significativamente la cantidad de N en el suelo, condicionando los rendimientos del cultivo de renta en sucesión (Abdalla et al., 2019). Por eso, es importante cuantificar la oferta de nitrógeno (en forma de nitratos y amonio) que brinda cada sistema de producción de biomasa seca antes de la siembra para saber si se encuentran en proporciones adecuadas para el cultivo de referencia (Aluko et al, 2023).

Esta investigación fue realizada debido a la necesidad de contar con informaciones y adopción de métodos de recuperación y uso sostenible del suelo en los sistemas productivos del Chaco central. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dos sistemas de sucesión de cultivos bajo siembra directa (SD) sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, así como en el rendimiento de la soja en un Cambisol. Se planteó la hipótesis de que la siembra directa sobre pastura de *Megathyrsus maximus* cv. Gatton Panic mejoraría las propiedades físicoquímicas del suelo y el rendimiento del cultivo de soja, en comparación con una sucesión intensiva de soja-trigo-soja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar y características

El ensayo fue realizado en la localidad de Paratodo, Pte. Hayes, en una parcela denominada Chacra 7 en los lotes A y B (de 52 hectáreas), situada a 10 kilómetros hacia el sur de la aldea Blumenfeld (23°22'16,87" S y 59°41'27,28" O). El ensayo principal con la toma de datos tuvo una duración de 18,2 meses, desde de julio 2021 a diciembre 2022.

La evapotranspiración potencial (ETO) promedio anual de la zona es de 1.650 mm y una pluviometría de 820 mm. El suelo es del tipo Cambisol, fértil, con un pH de 6,47 en agua, capacidad de intercambio catiónico de 14,83 meq100 g⁻¹, materia orgánica de 2,6% y con un nivel de fósforo de 150,55 ppm. El suelo no mostró indicadores superficiales de salinidad y su porcentaje de sodio intercambiable (PSI) es <2%. Posee una textura limo-arcillosa y no presenta limitaciones en nutrientes.

Las condiciones meteorológicas registradas durante el ensayo fueron recolectadas por una estación meteorológica cercana y datos de precipitaciones fueron anotados manualmente (Figura 1).

Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental empleado fue de franjas divididas, donde las franjas correspondieron a los tratamientos y las divisiones a las repeticiones. Fueron evaluados dos tratamientos: cobertura bianual a base de pastura de *Megathyrsus maximus* cv. Gatton Panic (Gatton) y cobertura anual de rotación soja-trigo-soja (Trigo). Las franjas tuvieron una dimensión de 28 m de ancho y 700 m de largo (19.600 m²) y dividieron en 4 repeticiones de 28 x

175 m (4.900 m²) de área útil de medición. Para los datos de productividad de la soja se tomaron ocho repeticiones, dos repeticiones por división.

Manejo y variables

El manejo del área correspondiente al Gatton previo al estudio fue a partir de la siembra, realizada en septiembre de 2018 (18/09/2018); la primera actividad productiva fue la cosecha de semillas el 19/12/2018 y una segunda cosecha el 29/03/2019, y posterior corte de biomasa para la elaboración de heno (10/07/2019). En el año 2020 se volvió a realizar la cosecha de semillas y corte de biomasa para la elaboración de heno (20/01/2020 y 20/04/2020, respectivamente). El rebrote posterior fue desecado para aprovechar los residuos vegetales, en mayo del año 2021 (18/05/2021), y con esta desecación comenzó el barbecho químico para el Gatton.

El Trigo tuvo un proceso de agricultura continua bajo siembra directa de rotación soja-trigo-soja. La siembra de cultivo de renta soja en estudio fue el 04/02/2022 y su cosecha se realizó el 01/06/2022 (Figura 2).

El inicio de las evaluaciones físicas y químicas del suelo fue el 14/07/2021 (INI), dos meses después de la desecación del Gatton el 18/05/2021 (tiempo cero) y la siembra del Trigo (20/05/2021). Las variables mensuales medidas desde el tiempo cero hasta el final del estudio fueron: residuos vegetales de los CC (BIOM), humedad gravimétrica (HG), nitrógeno (N) de nitratos (NO₃-N) y amonio (NH₄-N) del suelo.

Las variables medidas al momento de la siembra del cultivo principal, el 15/02/2022 (INIS), y al final del barbecho químico posterior al cultivo de soja, el 28/12/2022 (FIN), fueron: densidad aparente (DAP), resistencia a

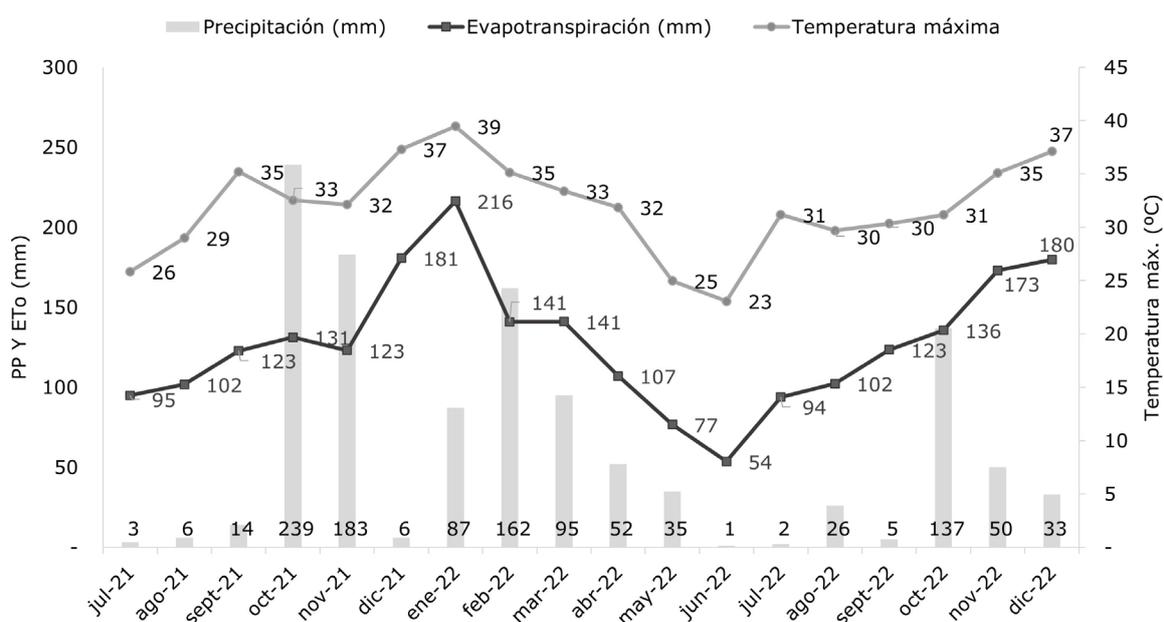


Figura 1. Datos de la estación meteorológica de Paratodo desde julio 2021 hasta diciembre de 2022 de la evapotranspiración potencial (ETO) mensual y temperatura máxima promedio mensual; datos de precipitaciones fueron recolectadas in situ, Paratodo, 2022.

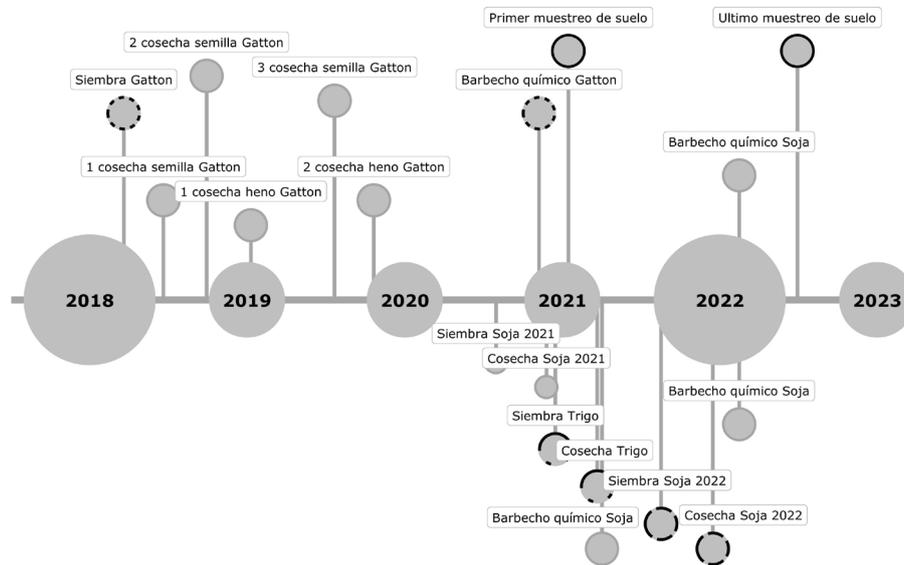


Figura 2. Línea de tiempo del estudio de sistemas de producción de siembra directa y sus efectos sobre las características fisicoquímicas de un Cambisol, Paratodo, 2018-2022.

la penetración (RP) y tasa de infiltración del suelo (TI). Las variables de producción del cultivo de soja evaluadas fueron: altura de la planta, cantidad de nudos por planta, cantidad de frutos por planta y rendimiento por hectárea del cultivo.

La humedad gravimétrica (HG) se determinó mediante el análisis de muestras compuestas, cada una formada por dos submuestras de suelo extraídas de la superficie útil por repetición. Las muestras fueron colectadas con una barrena cilíndrica de 20 mm de diámetro a dos profundidades: 0-50 y 50-100 cm. Las muestras se almacenaron en recipientes herméticos y luego se secaron en estufa a 65 °C durante 72 horas hasta obtener peso constante. El porcentaje de humedad gravimétrica se calculó mediante la ecuación 1:

$$\% \text{ HG} = (\text{Peso del agua} / \text{Peso del suelo seco}) \times 100$$

Los residuos vegetales colectados del suelo de una superficie de 1 m² por tratamiento y repetición fueron tamizados a 2 mm y secados a 65 °C durante 72 horas; estos datos fueron extrapolados a kilogramos por hectárea de masa seca.

Para la determinación del nitrógeno en forma de nitratos (NO₃-N) y amonio (NH₄-N), se extrajeron muestras de suelo a una profundidad de 0-60 cm en cada una de las cuatro repeticiones. Las muestras fueron selladas herméticamente y transportadas bajo temperatura controlada. El análisis se realizó dentro de las 24 horas posteriores a la extracción mediante electrodos selectivos de iones (ESI), siguiendo la metodología estándar de Pronova GmbH, en el Laboratorio del Departamento de Producción Vegetal (DEPROVE) del Servicio Agropecuario de la Cooperativa Chortitzer Ltda. Los resultados se expresaron en partes por millón (ppm) de la solución de suelo.

La densidad aparente del suelo (DAP) se determinó utilizando un cilindro de volumen conocido y 20 mm de diámetro. Las muestras fueron extraídas a dos profundidades: 0-25 y 25-50 cm, secadas en estufa a 65

°C durante 72 horas hasta peso constante. El cálculo se realizó mediante la ecuación 2:

$$\text{DAP} = \text{Peso del suelo seco} / \text{Volumen del cilindro}$$

La resistencia a la penetración (RP) se determinó en las cuatro repeticiones por tratamiento mediante un penetrómetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf, con la masa impactadora de 4 kg regulada a 0,40 m de altura. La transformación de la cantidad de impactos por decímetro a megapascales (MPa) se realizó a través de la ecuación matemática (Ecuación 3) planteada por Stolf et al. (2014) donde RP es la resistencia a la penetración y N es la cantidad de impactos por decímetros:

$$RP \text{ (MPa)} = 0,56 + 0,689 \times N$$

Los resultados se expresaron en intervalos de 5 cm hasta los 70 cm de profundidad.

La tasa de infiltración (TI) se midió mediante infiltrómetros-permeámetros de disco, localizadas en el suelo en cada tratamiento y repetición. Las lecturas se registraron en intervalos de un minuto durante los primeros 10 minutos, cada 5 minutos entre los 10 y 30 minutos, y cada 10 minutos desde los 30 hasta los 120 minutos. La tasa de infiltración representa la relación entre la infiltración y el tiempo parcial, y se calculó mediante la ecuación 4:

$$TI = (L_2 - L_1) \times f / (t_2 - t_1)$$

donde: L = lectura del infiltrómetro, f = factor de calibración (0,1292) y t = tiempo parcial

La infiltración básica se determinó como el promedio de las últimas tres mediciones.

Los parámetros morfológicos y de productividad de la soja fueron evaluados en microparcels de 4,5 m² en ocho repeticiones (dos repeticiones por división) por tratamiento mediante cosecha manual. El material empleado fue la

variedad DM 8277 IPRO STS con grupo de madurez 8.2. Los parámetros biométricos (altura, número de nudos y frutos de la planta de soja) se midieron en tres plantas seguidas con competencia completa; el promedio de las 3 plantas correspondió al valor de cada una de las repeticiones. La densidad poblacional se determinó considerando todas las plantas de cada microparcela. El rendimiento se estimó a partir del peso de los granos obtenidos de las plantas cosechadas en las microparcelas de cada repetición, utilizando una trilladora estática experimental.

Análisis estadísticos

Los datos del ensayo se analizaron mediante análisis de varianza (ANAVA). Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, se aplicó la prueba de Scott y Knott al 5% de probabilidad de error. Para describir las tendencias de los datos se utilizaron regresiones lineales y polinómicas. Las variables de rendimiento de soja se analizaron mediante la prueba t para dos muestras con varianzas iguales, con un nivel de significancia del 5%.

RESULTADOS Y DISCUSION

Agua gravimétrica

La Figura 3 muestra la precipitación acumulada y la humedad gravimétrica (HG) de las evaluaciones realizadas a dos profundidades del suelo (0-50 y 50-100 cm). Se registró una mayor HG media general para el Gatton durante el ensayo con 19,2%, mientras que para Trigo fue 15,4%. Esto representa una HG general 26,7% superior en el tratamiento Gatton respecto al Trigo. Se observó una relación directa entre las precipitaciones acumuladas y la dinámica de la HG del suelo.

La HG del tratamiento Gatton mostró una proporción alta en los dos estratos (0-50 cm: 20-24% y 50-100 cm: 23-26%) durante el periodo desde el barbecho (18/05/2021) hasta la siembra del cultivo de soja (29/01/2022), sin

verse afectada significativamente por las precipitaciones, que aportaron 563 mm durante este periodo. Esta conservación de humedad se debió a la práctica de barbecho químico y la buena cobertura del suelo, que redujeron la evapotranspiración, como lo mencionan Bristow (1988) y los autores Golik, Chamorro, Bezus, Pellegrini y Voisin (2022) en sus estudios.

En contraparte, el tratamiento Trigo mostró una disminución en el contenido de humedad entre julio y agosto de 2021 (de 16% a 11-13%), atribuida principalmente al consumo del cultivo de cobertura (trigo) hasta su cosecha (20/09/2021), lo que demostró un alto potencial de flujo transpiratorio (Lu et al., 2000). Este comportamiento representó un costo hídrico alto en comparación con el tratamiento Gatton, lo que impactó en el rendimiento del cultivo sucesor (Fernández, Quiroga y Noellemeyer, 2012; Nielsen y Vigil, 2005). El uso de agua del perfil por el cultivo de trigo se observó hasta octubre de 2021.

Después de la cosecha del cultivo de cobertura, el trigo presentó un incremento drástico de la HG debido a las lluvias subsecuentes en el periodo de barbecho para el cultivo sucesor, con una acumulación de 521 mm (septiembre de 2021 a febrero de 2022), pero no alcanzó los valores de humedad del suelo que tuvo el tratamiento con Gatton. Savabi y Stott (1994) encontraron una significativa mayor intercepción de la precipitación por los residuos de trigo en comparación con maíz y soja, lo que lleva a una alta eficiencia de acumulación de agua en el perfil. Este comportamiento se observó en el tratamiento trigo; sin embargo, no igualó los valores del cultivo de cobertura Gatton.

A partir de febrero, como indica la Figura 3, se observó una disminución en la humedad en ambos tratamientos y estratos, atribuida al consumo hídrico de la soja en crecimiento.

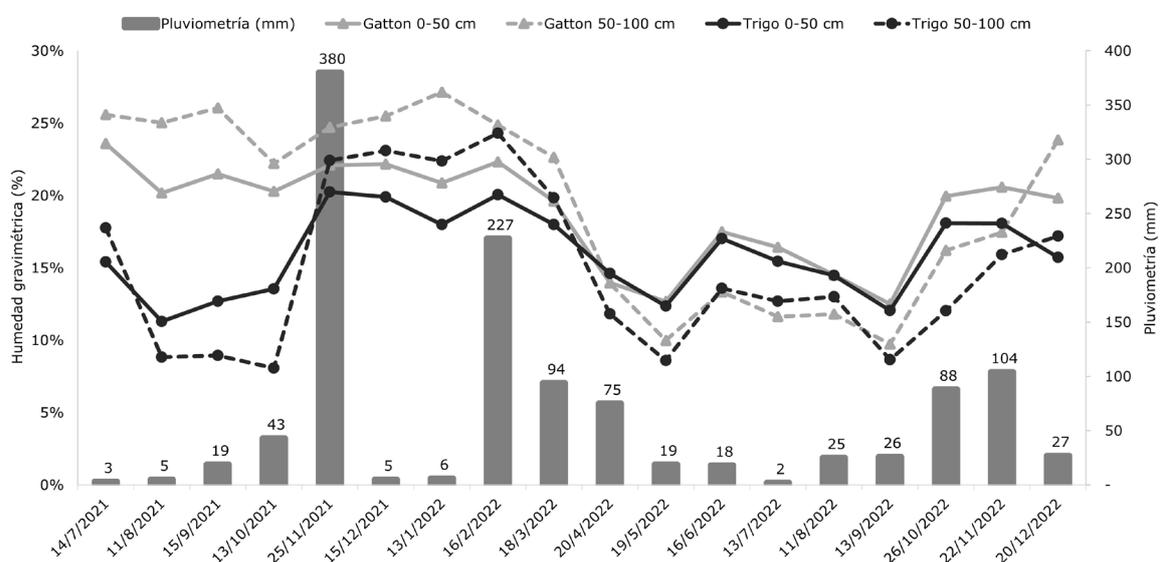


Figura 3. Humedad gravimétrica en dos estratos de dos sistemas de producción durante un periodo de 1,5 años, Paratodo, 2022.



El cultivo recibió durante su ciclo una precipitación total acumulada de 346 mm y, como no tuvo impacto sobre la HG, se infiere que fue inferior a su demanda e incluso utilizó la humedad remanente del perfil del suelo, con un marcado impacto en el estrato de 50-100 cm de profundidad.

Posterior a la cosecha del cultivo de renta, se inició el barbecho químico para el cultivo sucesor 2023 y se observó un incremento medio de la humedad del 30,4% en Gatton y 48,7% en Trigo (Figura 3), debido a la recarga hídrica por las precipitaciones y la suspensión total de la transpiración. Posteriormente, se registró una disminución en la HG durante la temporada seca por falta de precipitaciones y mayor evaporación. Durante el período de barbecho del cultivo sucesor 2022 hasta las precipitaciones de primavera, la HG se igualó entre los dos tratamientos y en las dos profundidades evaluadas. A partir de octubre de 2022, se observó un aumento de la HG en ambos tratamientos y estratos en respuesta a las precipitaciones, donde el tratamiento Gatton presentó valores superiores en un 25% respecto al Trigo.

Se observó una tendencia en el contenido de HG entre los dos estratos del mismo tratamiento: cuando hubo un cultivo establecido, el estrato de 50-100 cm presentó menor HG que el estrato de 0-50 cm; sin embargo, cuando se iniciaron las prácticas de barbecho químico, el estrato más profundo comenzó a acumular agua y superó la HG del estrato superficial. Por otro lado, el efecto de las precipitaciones mayores a 100 mm durante los barbechos químicos se observó en el estrato más profundo hasta durante dos muestreos consecutivos, lo que indica la importancia de mantener un barbecho de mayor duración (Quiroga et al., 2005).

Biomasa aérea

Según los datos obtenidos y presentados en la Figura 4, la biomasa de Gatton se descompuso en un 72,37%, mientras que la del Trigo alcanzó un 80,98%. Al inicio del estudio (INI), el tratamiento Gatton presentó 2,09

veces más biomasa que el Trigo, con valores de 11.311 kg MS ha⁻¹ frente a 5.390 kg MS ha⁻¹. Esto resultó en una descomposición de 8.186 y 4.365 kg MS ha⁻¹ para Gatton y Trigo, respectivamente, con una tasa de descomposición 1,88 veces mayor para el Gatton.

Niveles altos de biomasa pueden conducir a tasas de descomposición más rápidas según indican McClelland, Paustian y Schipanski (2021); sin embargo, en esta investigación, el Trigo presentó menor cantidad de biomasa pero una descomposición superior en términos porcentuales (11,9%). Según la ecuación obtenida en la regresión (Figura 4), el Gatton aportó 87,54% más de biomasa al suelo y mayor material descompuesto (12,7 y 9,5 kg ha⁻¹ día⁻¹ para Gatton y Trigo, respectivamente).

Kamkar, Akbari, Teixeira da Silva y Movahedi Naeini (2014) encontraron que la relación C/N de los residuos de trigo supera los valores de 60:1, lo cual se puede confirmar por las experiencias locales, y dado que la relación C/N de sus residuos sobrepasa el umbral de 50:1, también presenta elevados contenidos de ligninas y lípidos (Ibáñez, 2006). Este mismo autor afirma que la actividad biológica del suelo en estas condiciones es muy escasa, lo que puede explicar la tasa de descomposición más lenta del trigo en el presente ensayo.

Con respecto a los residuos del Gatton, que presentan una relación C/N cercana a valores de 35:1 según ensayos locales recientes, se obtuvieron tasas de descomposición más aceleradas que las del trigo, como se observó en este ensayo. Ibáñez (2006) concluye que la relación C/N de los residuos vegetales no lignificados fluctúa entre 30:1 y 50:1.

En la Figura 4 se observa que, en los primeros muestreos, hasta los 50 días después del inicio (DDI), se produjo una acelerada descomposición del Gatton; posteriormente, la tasa de descomposición se fue asemejando a la del trigo, lo que se ve expresado en las ecuaciones presentadas. El aumento en noviembre de 2021 (134 DDI) se atribuye a los

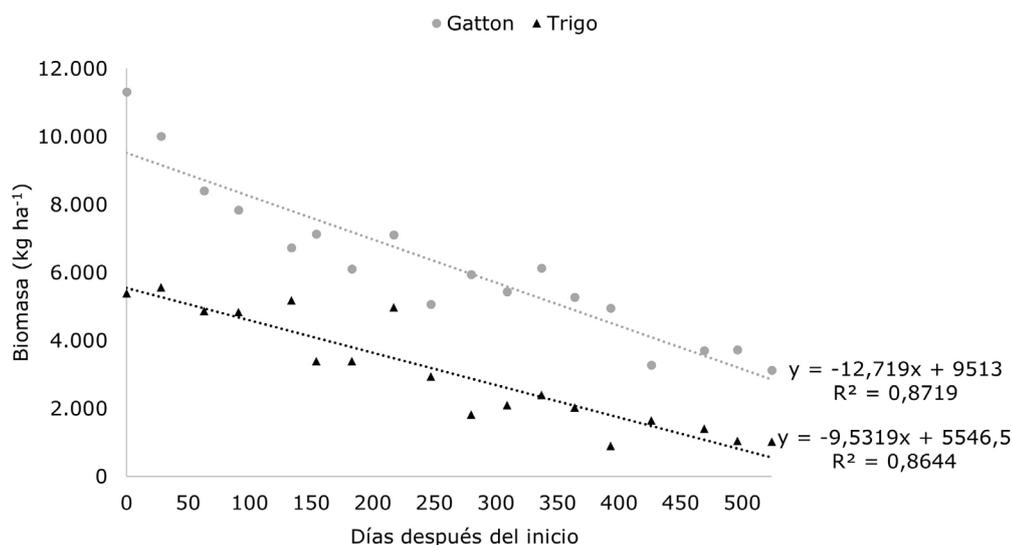


Figura 4. Descomposición de la biomasa aérea de dos sistemas de producción durante un periodo de 1,5 años, Paratodo - 2022.

eventos postcosecha del cultivo de cobertura trigo, donde ocurrió un aporte de residuos vegetales. Por otra parte, el incremento en biomasa a los 337 DDI se atribuye a los restos de soja que permanecieron en la parcela posterior a la cosecha. Se debe tener en cuenta que la relación C/N de las leguminosas es más baja, alrededor de 8:1 (Ward, 2022), lo cual conduce a una descomposición más rápida en ambos cultivos de cobertura.

Nitratos del suelo

En la Figura 5 se observa el contenido de N ($\text{NO}_3\text{-N}$ y $\text{NH}_4\text{-N}$) del suelo en función a las precipitaciones, encontrándose una fuerte dependencia, principalmente en periodos secos con temperaturas altas seguidos por periodos de precipitaciones, aunque sean bajas. Las concentraciones de N en general se mantuvieron entre 18 y 74 ppm, valores relativamente mayores en comparación con resultados de otros estudios (Mazzilli, Ernst, Sastre y Terra, 2015; Sawchik, 2001).

No se observaron diferencias estadísticas en el contenido de N en el suelo entre la práctica del barbecho con Gatton y el cultivo de trigo. La cantidad de nitrógeno disponible fue suficiente para cubrir los requerimientos de los cultivos, debido a la incorporación de residuos vegetales acumulados a lo largo de varios años de sucesión. Esto resultó en una disponibilidad de nitrógeno que no mostró variaciones significativas en el perfil del suelo entre 0 y 60 cm de profundidad.

El primer aumento a altas concentraciones de N (55 ppm para Gatton y 50 ppm para Trigo) se observó en el muestreo del 13/10/2021, cuando las precipitaciones primaverales comenzaron a acumularse (380 mm), con una subsecuente disminución en el siguiente muestreo. Como no hubo diferencia entre los tratamientos antes y después del muestreo del 13/10/2021, se estima que el

N fue de origen orgánico y provenía de los residuos de cultivos anteriores, activados por la humedad.

La disminución de la concentración en el muestreo posterior fue efecto de desnitrificación, volatilización o lixiviado por las precipitaciones de 380 mm a capas más profundas (Beltran, Galantini, Tognetti y Barraco, 2022; Willumsen y Thorup-Kristensen, 2001). Puede haber una correlación entre cantidad de nitratos y cantidad de HG en función a la tasa de desnitrificación en situaciones de capacidad de campo (Picone, Videla y García, 1997), aunque suelos secos y calcáreos presentan mayor tendencia a la volatilización. Por otro lado, si el perfil del suelo supera la capacidad de campo, está expuesto a la lixiviación de nitratos. En este caso, los cultivos de cobertura tienen la ventaja de absorber los nitratos, con la consecuente retención de nitrógeno en su biomasa, que luego estará disponible para el cultivo sucesor (Fernández et al., 2012).

Se observó otro incremento en las concentraciones de N (42 ppm para Gatton y 38 ppm para Trigo) el 16/02/2022, provocado por las precipitaciones y una ligera aireación del suelo debido al proceso de siembra. A partir de esta fecha, los valores de N se redujeron gradualmente, efecto atribuido al consumo del cultivo de soja, a pesar de ser una planta con potencial de fijación biológica de nitrógeno (FBN).

El muestreo del 16/06/2022 mostró los valores más bajos de N (18 ppm para Gatton y 22 ppm para Trigo), seguidos por un incremento en el siguiente muestreo con los valores más altos del estudio (74 ppm para Gatton y 61 ppm para Trigo). Estos altos valores son atribuidos a la mineralización de la biomasa del cultivo de soja con una relación C/N baja (Fernández et al., 2012). Si bien este comportamiento no estuvo en función de las precipitaciones, las anteriores habrían activado dicha descomposición. Scagnozzi, Saviozzi, Levi-Minzi y Riffaldi (1997) detectaron en su

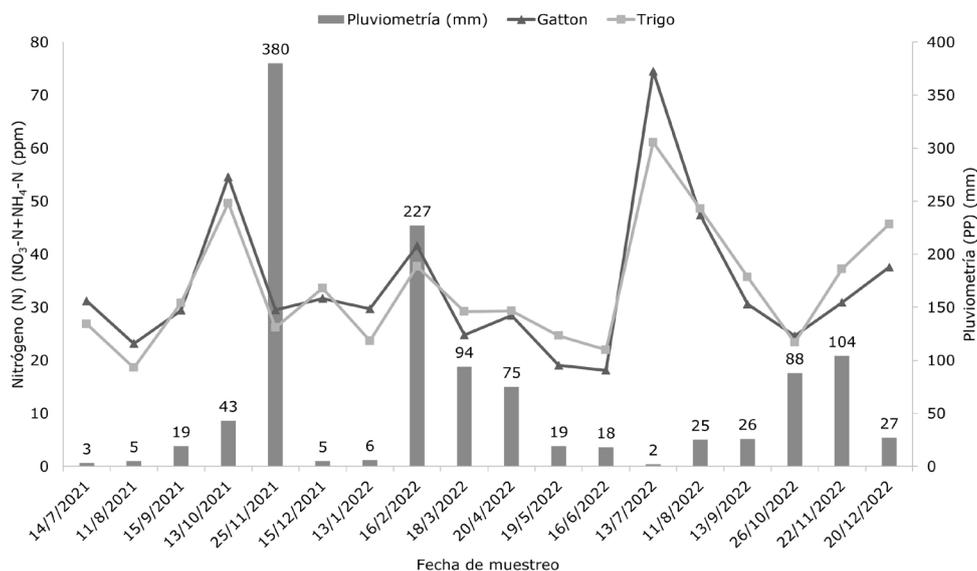


Figura 5. Suma de Nitrógeno (N) en forma de Nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) y Amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$) del suelo en ppm a una profundidad 0-60 cm y pluviometría acumulada entre las fechas de medición en dos sistemas de sucesión durante un periodo de 1,5 años, Paratodo, 2022.

estudio la liberación de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el suelo después de 60 días de la cosecha a base de residuos de soja, lo que coincide con los resultados obtenidos.

Se observó también una disminución gradual de la concentración de N durante el barbecho químico, hasta la fecha del 26/10/2022, cuando las precipitaciones primaverales reactivaron un aumento del N en el suelo, alcanzando altos valores al final del estudio (38 ppm para Gatton y 46 ppm para Trigo), aunque no fueron estadísticamente significativos entre tratamientos. Wood et al. (1991) demostraron un mayor agotamiento de $\text{NO}_3\text{-N}$ en sistemas de producción perennes con pasturas, debido a su consumo y retención en su biomasa, en comparación con sistemas de producción con rotaciones intensivas que devuelven el $\text{NO}_3\text{-N}$ al suelo en el estrato superior por los residuos vegetales, lo cual podría explicar la diferencia observada entre tratamientos.

Densidad aparente

Los resultados de los tratamientos (Figura 6) muestran diferencias significativas entre las fechas de muestreo INIS y FIN, no así entre profundidades y tratamientos. Los valores para ambos cultivos de cobertura en INIS estuvieron ligeramente encima de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, y para FIN la DAP se redujo significativamente hasta aproximadamente $1,2 \text{ g cm}^{-3}$.

Los resultados de análisis del suelo mostraron una textura promedio franco-arcillosa con 47 % de arcilla, con texturas muy distintas entre repeticiones, desde un suelo franco (33% de arcilla) hasta arcilloso (65% de arcilla). Los valores DAP para estas texturas deberían oscilar entre $1,1$ a $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ en condiciones óptimas de desarrollo radicular, con reducciones de hasta 0,2 de su máximo desde $1,36$ a $1,56 \text{ g cm}^{-3}$, siendo el valor intermedio de $1,47 \text{ g cm}^{-3}$ (Chen et al., 1998; Jones, 1983). En esta investigación,

el desarrollo radicular presentó cierta restricción en INIS, mientras que para FIN la DAP se encontró en un rango óptimo.

En general, el tratamiento Gatton mostró una menor DAP en comparación al trigo, tanto en profundidad como en las evaluaciones realizadas en INIS y FIN, debido a su mayor aporte de biomasa al suelo. Varios estudios (Fu, Chen, Huang, Qu y Wei, 2021; Meki, Snider, Kiniry, Raper y Rocateli, 2013; Shaver, 2010) mencionan una correlación entre la cantidad de BIOM y la DAP; cuanto mayor es la biomasa, menor es la DAP. Sin embargo, en este estudio no se observaron diferencias significativas. En la Figura 6 también se observa un aumento en la DAP a mayor profundidad (0-25 y 25-50 cm) en INIS, mientras que en FIN ya no se presentaron diferencias importantes entre profundidades.

La menor DAP en FIN no tuvo el comportamiento esperado, ya que no se observó un efecto de la descomposición de la biomasa producida y el consecuente aumento de la porosidad del suelo. Rubio, Gama Roldán, Pérez Bidegain y Quincke (2018) mencionan la influencia de las condiciones climáticas sobre la DAP y encontraron en su estudio una DAP crítica en función a la disponibilidad del agua de $1,59 \text{ g cm}^{-3}$, lo cual restringiría el crecimiento vegetal. Otro factor podría ser la descomposición del sistema radicular del cultivo de cobertura por los microorganismos, con un consecuente aumento en la porosidad. Los valores en INIS se encontraban en el límite superior del rango para el tratamiento Gatton ($1,4\text{--}1,53 \text{ g cm}^{-3}$) y por encima del límite mencionado en trigo en la profundidad de 25-50 cm ($1,65 \text{ g cm}^{-3}$). La DAP media en INIS fue de $1,47 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,53 \text{ g cm}^{-3}$ para Gatton y trigo, respectivamente, resaltando una diferencia de 4,1% menor para Gatton. Al final del ensayo, ambos tratamientos terminaron con una DAP media de $1,18 \text{ g cm}^{-3}$. Promediando los valores de DAP de ambas mediciones, el Gatton registró una DAP

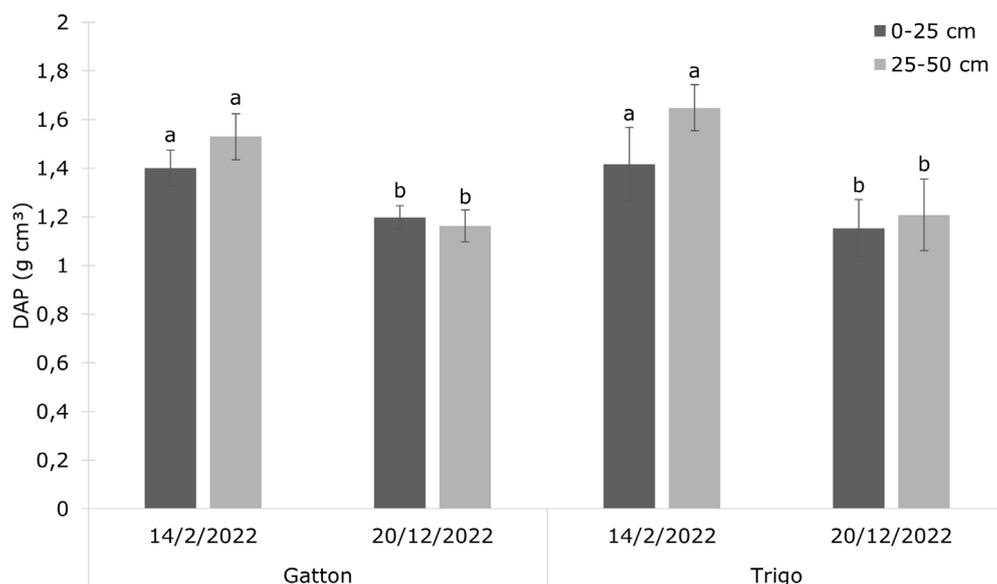


Figura 6. Densidad aparente del suelo (DAP) (g cm^{-3}) en dos diferentes sistemas de producción (Gatton y Trigo), dos profundidades (0-25 y 25-50 cm) y dos fechas de evaluación (INIS y FIN), Paratodo, 2022.

menor en un 3,03%, con un valor de $1,32 \text{ g cm}^{-3}$, frente a los $1,36 \text{ g cm}^{-3}$ del Trigo.

Tasa de infiltración

Los resultados de la tasa de infiltración (TI) mostraron diferentes en INIS entre los tratamientos Gatton y trigo, con mayor tasa de infiltración instantánea (TII) y tasa de infiltración básica (TIB) a favor del Gatton (Figura 7). Por un lado, el periodo seco y caluroso en el barbecho con poca precipitación (Figura 3) llevó a un suelo superficial con menor humedad en el estrato 0-50 cm en comparación al estrato profundo. Por otro lado, se observó una diferencia entre los tratamientos mencionados, atribuida a los macroporos producidos por los cultivos de cobertura recientes en función a la cantidad de sus residuos, que permitieron el aumento de la infiltración de agua (Shaver, 2010).

En FIN se obtuvieron resultados muy similares entre los tratamientos Gatton y Trigo, con mayor TI para el Gatton como resultado de una mayor cantidad de residuos. La escasa diferencia entre tratamientos se atribuye a la porosidad establecida durante este período de 10 meses.

La Figura 8 muestra la tasa de infiltración básica (TIB) de ambos sistemas. Hubo diferencia significativa entre INIS y FIN, con mayor TIB para el Gatton seguido por el Trigo en la evaluación INIS ($7,58$ y $3,52 \text{ cm h}^{-1}$, respectivamente); en FIN no hubo diferencia significativa entre los tratamientos ($0,97$ y $0,86 \text{ cm h}^{-1}$). Esto se relacionó a la mayor cantidad de residuos del suelo, con buena estabilidad de agregados y mayor porosidad, principalmente en el tratamiento Gatton, atribuido a los altos residuos radiculares y profundos (Peterson y Power, 2015). Los mismos autores mencionan que los sistemas radiculares de cultivos perennes de pasturas pueden llegar con facilidad a más de $10.000 \text{ Kg ha}^{-1}$ de masa seca, aumentando la velocidad de infiltración.

La cubierta de residuos intercepta parte de la lluvia, limitando la formación de costras y las pérdidas de suelo por escorrentía, aumentando así la tasa de infiltración de agua en el suelo (Lal, 2008). Por otra parte, los residuos vegetales y los productos de su descomposición mejoran la estructura del suelo a través de una mayor estabilidad de los agregados y porosidad (Jordán, Zavala y Gil, 2010), lo que también mejora la tasa de infiltración de agua del suelo (Ranaivoson, Naudin, Ripoché, Affholder, Rabeharisoa y Corbeels, 2017). Esto es confirmado por los resultados de esta investigación y se puede observar en Figuras 7 y 8.

En INIS, Gatton y Trigo tuvieron una buena cobertura de biomasa (7.114 y 4.969 Kg ha^{-1} , respectivamente), mientras en FIN registraron 3.125 y 1.025 Kg ha^{-1} . Ranaivoson et al. (2017) encontraron en su estudio de que 2.000 a 3.000 Kg ha^{-1} son suficientes para asegurar una buena TI y evitar el escurrimiento del agua superficial. Los valores registrados en la evaluación FIN podrían comprometer el sistema de producción con cultivo de cobertura de trigo.

Datos similares a INIS fueron reportados por Lizarralde, Ciganda, Baethgen, y Quincke (2016), quienes estudiaron la TIB en un sistema de rotación soja-trigo continuo y en otro basado en rotación con pastura. De manera similar, (Grazia, Barrios, Tiftonell, Rodríguez y Andrada, 2008) no encontraron diferencias significativas entre sistemas de rotación (convencional y siembra directa), aunque señalaron una tendencia a favor de la siembra directa.

Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) mostró diferencias notables entre los tratamientos Gatton y Trigo en las dos evaluaciones (INIS y FIN), Figura 9. En INIS (14/02/2022), los valores de RP fueron consistentemente menores en el tratamiento Gatton hasta los 38 cm de profundidad,

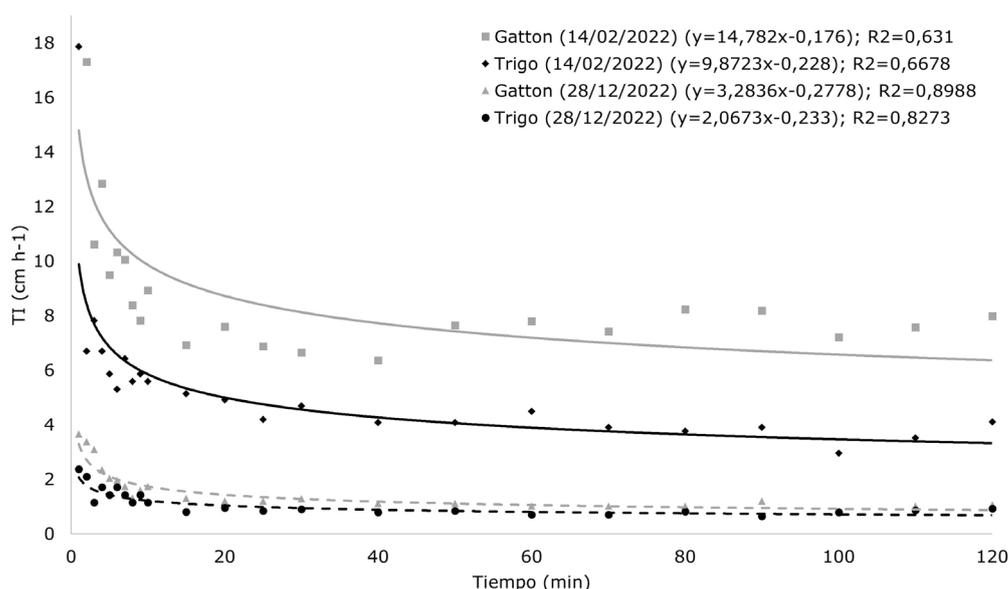


Figura 7. Tasa de infiltración (TI) en cm h^{-1} en dos diferentes sistemas de producción (Gatton y Trigo) y dos fechas de evaluación (INI y FIN), Paratodo, 2022.

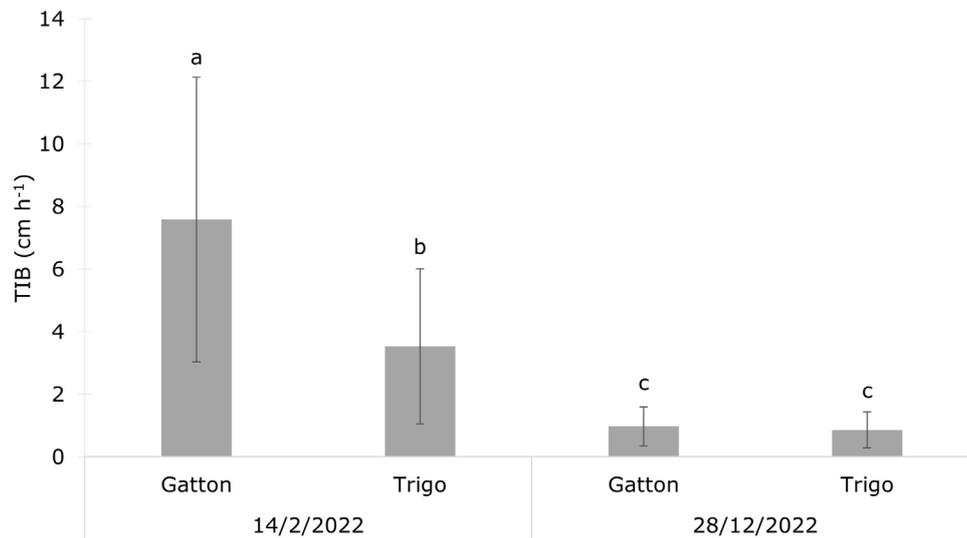


Figura 8. Tasa de Infiltración Básica (TIB) en cm h⁻¹ en dos diferentes sistemas de producción (Gattton y Trigo) y dos fechas de evaluación (INIS y FIN), Paratodo, 2022.

donde superaron a los del Trigo, igualándose a los 68 cm, con valores menores que 2 MPa. Alcanzaron un máximo de 2,90 MPa a 5-10 cm de profundidad, en comparación con los 3,24 MPa observados en el tratamiento Trigo. Estas diferencias fueron más pronunciadas en las capas superficiales (5-20 cm), donde Gatton presentó valores iniciales de 1,05 MPa frente a 1,96 MPa en Trigo, indicando un suelo menos compactado en el tratamiento Gatton.

En la evaluación FIN (28/12/2022), los valores de RP aumentaron en ambos tratamientos. Sin embargo, el tratamiento Gatton continuó mostrando una menor resistencia en todo el perfil del suelo evaluado (0-70 cm). En las capas superficiales, Gatton registró 1,30 MPa frente a los 1,74 MPa de trigo. A profundidades de 10-15 cm, los valores máximos fueron de 2,95 MPa en Gatton, mientras que en trigo se alcanzaron valores críticos de compactación de 3,69 MPa.

Los resultados muestran diferencias claras en la resistencia a la penetración (RP) entre los tratamientos, destacando el impacto diferencial de los cultivos de cobertura en la estructura del suelo. La menor RP observada en el tratamiento Gatton indica que este cultivo contribuyó a una mejor porosidad y reducción de la compactación del suelo, debido a su mayor aporte de biomasa y residuos vegetales, así como al desarrollo de un sistema radicular más profundo y ramificado. Esto indica que los cultivos de cobertura, con su mayor desarrollo radicular, estructuran mejor el suelo, generan mayor estabilidad de agregados y disminuyen la densidad del suelo, acorde con otros estudios (Pulido Moncada, Gabriels, Lobo, Rey y Cornelis, 2014; Watanabe, Figueiredo, Silva, Neves y Oliveira, 2017).

Por otro lado, varios estudios indican una correlación inversa entre la humedad del suelo y la RP (Herrick y Jones, 2002; Ruiz, Castillo Ontaneda y Vidal Díaz, 2020; Villazón-Gómez, Martín-Gutiérrez y Cobo-Vidal, 2019), lo que se debe tener en cuenta al comparar las evaluaciones INIS y FIN entre sí. La medición de la RP requiere condiciones

de humedad cercanas a la capacidad de campo, lo que en esta región se consigue previo a la siembra, después de un barbecho químico eficiente.

Las investigaciones muestran un rango de tolerancia de interpretación respecto al valor crítico absoluto en condiciones de humedad a capacidad de campo. Varios autores indican 2 MPa como valor crítico límite (De Lima, Miola, Timm, Pauletto y Da Silva, 2012; Reichert, Kaiser, Reinert y Riquelme, 2009; Silva, Tormena, Fidalski, Imhoff, 2008; Tormena, Silva y Libardi, 1998), otros 2,5 MPa (Taylor, Roberson y Parker, 1966) o 3 MPa (Ruiz et al., 2020), y el estudio de Moraes, Debiasi, Carlesso, Franchini y Silva (2014) diferencia 2 MPa para un sistema de laboreo convencional, 3 MPa para un sistema de laboreo mínimo y 3,5 MPa para el sistema de siembra directa.

De todos modos, valores de RP superiores a 3 MPa se consideran críticos para el crecimiento radicular de la mayoría de los cultivos, limitando la exploración del suelo, el acceso al agua y nutrientes y, en consecuencia, el desarrollo y rendimiento de las plantas (Bengough, McKenzie, Hallett y Valentine, 2011; Klein y Camara, 2007).

Una RP por encima del valor crítico (3 MPa) solo se observó en el trigo en la capa de 5 a 15 cm de profundidad en INIS, y en la capa de 5 a 20 cm en FIN. Esta tendencia se atribuye al menor aporte de residuos del trigo y a una menor capacidad para mitigar la compactación inducida por actividades agrícolas, como el tránsito de maquinaria o el manejo intensivo del suelo (Hamza y Anderson, 2005; Hobson et al., 2021). Gatton, en general, indicó menor RP en comparación con el trigo, generando mejores condiciones para el desarrollo del cultivo sucesor.

Rendimiento de la soja

Con respecto a las variables biométricas y de rendimiento evaluadas, el cultivo de soja del tratamiento Gatton mostró una tendencia de mayores valores que el de trigo; sin

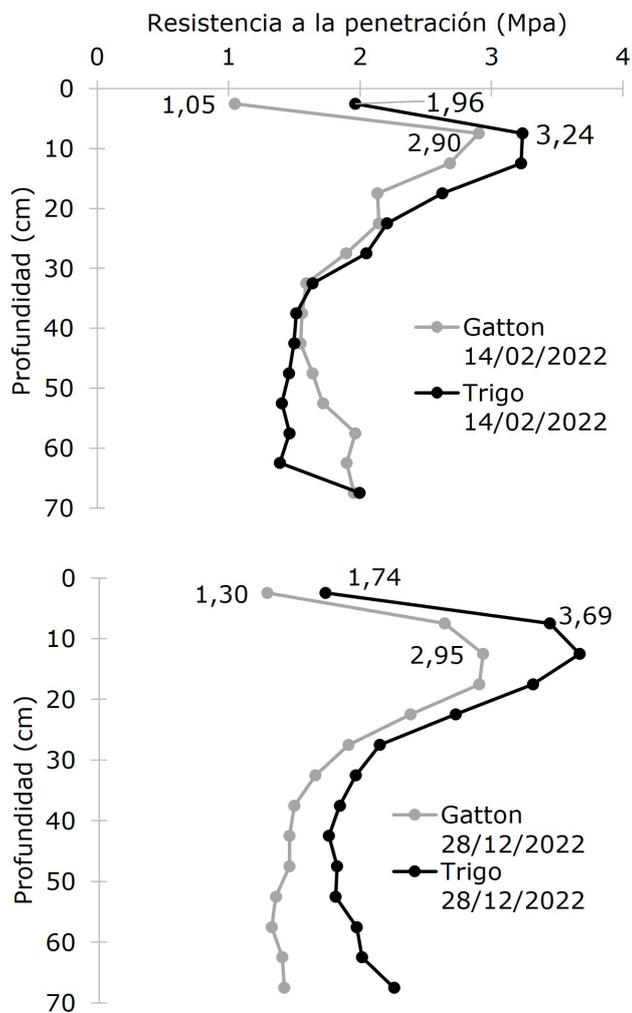


Figura 9. Resistencia a la penetración (RP) del suelo (MPa) en una profundidad de 0-70 cm en dos sistemas de producción (Gatton y trigo) y dos fechas de evaluación (INIS y FIN), Paratodo - 2022.

embargo, los que se destacaron significativamente fueron la altura (99,6 y 89,6 cm) y el rendimiento de granos (3.336 y 2.929 kg ha⁻¹), superando en 406 kg ha⁻¹ al tratamiento trigo (Tabla 1). Asimismo, el peso de 1.000 semillas fue superior en el tratamiento Gatton (136,7 g) frente al trigo (123,5 g), aunque con una significancia marginal (p = 0,085). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en el número de nudos por planta (p = 0,398), el número de vainas por planta (p = 0,526) ni en la densidad de plantas (p = 0,715) entre ambos tratamientos.

Tabla 1. Rendimiento de la soja en diferentes sistemas de rotación (Gatton y Trigo) en un suelo del tipo Cambisol, Paratodo, 2022.

	Productividad de la soja					
	Altura (cm)	Nudos/Planta	Vainas/Planta	Peso 1000 semillas (g)	Densidad (Pl Ha ⁻¹)	Rend. (Kg Ha ⁻¹)
Gatton (1)	99,6 **	21,4 *	126,4 *	136,7 *	113.889 *	3.336 **
Trigo (2)	89,6	20,4	107,4	123,5	108.333	2.929
Diferencia (1)(2)	10,0	1,0	19,0	13,2	5.556	406
p-Valor	0,018	0,398	0,526	0,085	0,715	0,006

*NS=No significativamente diferente; **DS=Diferencia significativa con la Prueba T para dos muestras suponiendo varianzas iguales (p-Valor 0,05).

La altura y el rendimiento de las plantas son rasgos poligénicos, complejos y deseables que se heredan de forma cuantitativa (Diondra et al., 2008). No necesariamente debe existir una correlación positiva entre estas dos variables, aunque varios estudios la encontraron (Borowska y Prusiński, 2021; Sulisty, Purwantoro y Sari, 2018).

La tasa de crecimiento de las plantas depende de factores ambientales como la disponibilidad hídrica y de nutrientes, la densidad de plantas (Herbert y Litchfield, 1982) y la temperatura. Los datos expuestos en la Tabla 1 indican que las plantas de soja en el tratamiento Gatton lograron producir más biomasa total (BT) que en el trigo. Con un mayor índice de área foliar y mayor densidad de plantas, pudieron interceptar más radiación y, con suficiente agua y nutrientes (Figuras 3 y 4), transformaron más CO₂ en producción. Esta diferencia en la interceptación de la radiación durante el desarrollo del fruto probablemente causó las diferencias a favor del tratamiento Gatton debido a una mayor incorporación de biomasa, sobre todo en el rendimiento, acorde con resultados obtenidos en otros estudios (Liu, Jin, Herbert, Zhang y Wang, 2005; Taylor, Mason, Bennie y Rowse, 1982).

El barbecho químico más largo del Gatton (283 días) en comparación con el trigo (184 días), más el volumen de residuo aportado, justificó el mayor porcentaje de agua gravimétrica que impactó en el rendimiento final de la soja, principalmente en su fase reproductiva, acorde con otros estudios (Irmak et al., 2002; Dos Santos Cordeiro et al., 2021). Esto demostró que el sistema de producción a base de una gramínea por un período más largo refleja una mayor sostenibilidad productiva en el cultivo de soja, sin tener en cuenta los costos productivos de la parcela (sostenibilidad económica), en especial si no se pudo generar un retorno en este período.

Estos resultados indican que la incorporación de pasturas perennes como cobertura en regímenes de siembra directa puede ser una estrategia efectiva para mejorar la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas agrícolas en ambientes semiáridos, promoviendo tanto la conservación del suelo como el incremento de los rendimientos agrícolas.

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio -bajo las condiciones descritas- demuestran que el sistema con cobertura de Gatton mostró una mayor retención de humedad gravimétrica hasta los 100 cm de profundidad,

una mayor producción de biomasa y una descomposición más rápida de los residuos vegetales (1,88 veces). El comportamiento del nitrógeno del suelo fue similar en ambos tratamientos y fue afectado principalmente por la pluviometría y el consumo del cultivo de soja. Además, Gatton indicó una tasa de infiltración superior y una menor densidad aparente en comparación con la sucesión trigo. El tratamiento trigo presentó una resistencia a la penetración crítica superior a 3 MPa.

El uso de Gatton como cultivo de cobertura incrementó el rendimiento de granos de soja en un 13,9% en comparación con la sucesión basada en trigo, destacándose también en parámetros biométricos como la altura de planta (10 cm superior).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., Truu, J., Rees, R. M., & Smith, P. (2019). A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology*, 25(8), 2530-2543. <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>
- Aluko, O. O., Kant, S., Adedire, O. M., Li, C., Yuan, G., Liu, H., & Wang, Q. (2023). Unlocking the potentials of nitrate transporters at improving plant nitrogen use efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1074839. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1074839>
- Bartzen, B. T., Hoelscher, G. L., Ribeiro, L. L. O., & Seidel, E. P. (2019). How the Soil Resistance to Penetration Affects the Development of Agricultural Crops? *Journal of Experimental Agriculture International*, 30(5), 1-17. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2019/46589>
- Bauer, A., & Black, A. L. (1994). Quantification of the Effect of Soil Organic Matter Content on Soil Productivity. *Soil Science Society of America Journal*, 58(1), 185-193. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010027x>
- Beltran, M. J., Galantini, J. A., Tognetti, P. M., & Barraco, M. R. (2022). Interacción entre cultivos comerciales y de cobertura. Producción, dinámica del agua y nitratos del suelo. *Ciencia del suelo*, 40(1), 24-37.
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59-68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1527-1576. <https://doi.org/10.1002/saj2.20129>
- Borowska, M., & Prusiński, J. (2021). Effect of soybean cultivars sowing dates on seed yield and its correlation with yield parameters. *Plant, Soil and Environment*, 67(6), 360-366. <https://doi.org/10.17221/73/2021-PSE>
- Bristow, K. (1988). The role of mulch and its architecture in modifying soil temperature. *Soil Research*, 26(2), 269-280. <https://doi.org/10.1071/SR9880269>
- Casali, L., Herrera, J. M., & Rubio, G. (2022). Resilient soybean and maize production under a varying climate in the semi-arid and sub-humid Chaco. *European Journal of Agronomy*, 135, 126463. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126463>
- Chen, Y., Tessier, S., & Rouffignat, J.. (1998). Soil bulk density estimation for tillage systems and soil textures. *Transactions of the ASAE*, 41(6), 1601-1610. <https://doi.org/10.13031/2013.17328>
- De Lima, C. L. R., Miola, E. C. C., Timm, L. C., Pauletto, E. A., & Da Silva, A. P. (2012). Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 124, 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.006>
- Derpsch, R., Lange, D., Birbaumer, G., & Moriya, K. (2016). Why do medium- and large-scale farmers succeed practicing CA and small-scale farmers often do not? – Experiences from Paraguay. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 14(3), 269-281. <https://doi.org/10.1080/14735903.2015.1095974>
- Diondra, W., Ivey, S., Washington, E., Woods, S., Walker, J., & Krueger, N. (2008). *Is There A Correlation Between Plant Height and Yield in Soybean?* 7(2), 70-76.
- Dos Santos Cordeiro, C. F., Echer, F. R., & Araujo, F. F. (2021). Cover Crops Impact Crops Yields by Improving Microbiological Activity and Fertility in Sandy Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 1968-1977. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00494-0>
- Fernández, R., Quiroga, A., & Noellemeyer, E. (2012). Cultivos de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semiarida pampeana? *Ciencia del Suelo. INTA, EEA Anguil.*, 30(2), 15 (137-150).
- Fu, B., Chen, L., Huang, H., Qu, P., & Wei, Z. (2021). Impacts of crop residues on soil health: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 164-173. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1948354>
- Fundación para el Desarrollo Sustentable del Chaco. (2005). Atlas climático del chaco paraguayo. *Fortalecimiento del manejo sustentable de las ecorregiones chaco y pantanal*: USAID
- Gaudin, A. C. M., Tolhurst, T. N., Ker, A. P., Janovicek, K., Tortora, C., Martin, R. C., & Deen, W. (2015). Increasing Crop Diversity Mitigates Weather Variations and Improves Yield Stability. *PLOS ONE*, 10(2), e0113261.

- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113261>
- Golik, S., Chamorro, A. M., Bezus, R., Pellegrini, A., & Voisin, A. (2022). Eficiencia de uso del agua en diferentes secuencias de cultivos y barbechos en Argentina. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3), 49282. <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.49282>
- Grazia, J. D., Barrios, M. B., Tiftonell, P. A., Rodríguez, H. A., & Andrada, H. I. (2008). Dinámica del agua en el suelo bajo diferentes sistemas de labranza en una rotación trigo-soja. En: *XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 13-16 de mayo, 2008, San Luis, Argentina.
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Herbert, S. J., & Litchfield, G. V. (1982). Partitioning Soybean Seed Yield Components ¹. *Crop Science*, 22(5), 1074-1079. <https://doi.org/10.2135/cropsci1982.0011183X002200050044x>
- Herrick, J. E., & Jones, T. L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1320-1324. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1320>
- Hobson, D., Harty, M., Tracy, S., & McDonnell, K. (2021). The effect of tillage depth and traffic management on soil properties and root development during two growth stages of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *SOIL*, 8(1) <https://doi.org/10.5194/soil-2021-129>
- Ibáñez, J. (2006). *Tipos de Hojarasca y Residuos Vegetales: Relación con la Descomposición de la Materia Orgánica del Suelo*. *Biología y ecología del suelo*. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/09/14/41289>
- Irmak, A., Batchelor, W. D., Jones, J. W., Irmak, S., Paz, J. O., Beck, H. W., & Egeh, M.. (2002). Relationship between plant available soil water and yield for explaining soybean yield variability. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(4). <https://doi.org/10.13031/2013.8748>
- Jones, C. A. (1983). Effect of Soil Texture on Critical Bulk Densities for Root Growth¹. *Soil Science Society of America Journal*, 47(6), 1208. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700060029x>
- Jordán, A., Zavala, L. M., & Gil, J. (2010). Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *CATENA*, 81(1), 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.007>
- Kamkar, B., Akbari, F., Teixeira da Silva, J. A. & S. A., Movahedi Naeini (2014). The Effect of Crop Residues on Soil Nitrogen Dynamics and Wheat Yield. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 1(1). <https://doi.org/10.15406/apar.2014.01.00004>
- Klein, V. A., & Camara, R. K. (2007). Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(2), 221-227. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200004>
- Koudahe, K., Allen, S. C., & Djaman, K. (2022). Critical review of the impact of cover crops on soil properties. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 343-354. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>
- Lal, R. (2008). Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Management*, 28(4), 747-758. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.023>
- Lampurlanés, J., & Cantero-Martínez, C. (2003). Soil Bulk Density and Penetration Resistance under Different Tillage and Crop Management Systems and Their Relationship with Barley Root Growth. *Agronomy Journal*, 95(3), 526. <https://doi.org/doi:10.2134/agronj2003.0526>
- Liu, X., Jin, J., Herbert, S. J., Zhang, Q., & Wang, G. (2005). Yield components, dry matter, LAI and LAD of soybeans in Northeast China. *Field Crops Research*, 93(1), 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.09.005>
- Lizarralde, C., Ciganda, V., Baethgen, W., y Quincke, A. (2016). Pérdida de nutrientes en agua de escurrimiento en sistemas de rotaciones contrastantes. *Revista INIA*, 46.
- Lu, Y.-C., Watkins, K. B., Teasdale, J. R., & Abdul-Baki, A. A. (2000). Cover crops in sustainable food production. *Food Reviews International*, 16(2), 121-157. <https://doi.org/10.1081/FRI-100100285>
- Mazzilli, S. R., Ernst, O. R., Sastre, A., & Terra, G. (2015). Disponibilidad de nitratos en sistemas agrícolas sin laboreo y su relación con variables ambientales y de manejo. *Agrociencia*, 19(1), 131-139. <https://doi.org/10.31285/AGRO.19.329>
- McClelland, S. C., Paustian, K., & Schipanski, M. E. (2021). Management of cover crops in temperate climates influences soil organic carbon stocks: A meta-analysis. *Ecological Applications*, 31(3), e02278. <https://doi.org/10.1002/eap.2278>
- Meki, M. N., Snider, J. L., Kiniry, J. R., Raper, R. L., & Rocateli, A. C. (2013). Energy sorghum biomass harvest thresholds and tillage effects on soil organic carbon and bulk density. *Industrial Crops and Products*, 43, 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.07.033>
- Moraes, M. T. D., Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J. C., & Silva, V. R. D. (2014). Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 38(1), 288-298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>

- Nielsen, D. C., & Vigil, M. F. (2005). Legume Green Fallow Effect on Soil Water Content at Wheat Planting and Wheat Yield. *Agronomy Journal*, 97(3), 684-689. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0071>
- Ohyama, T., Tewari, K., Ishikawa, S., Tanaka, K., Kamiyama, S., Ono, Y., & Takahashi, Y. (2017). Role of Nitrogen on Growth and Seed Yield of Soybean and a New Fertilization Technique to Promote Nitrogen Fixation and Seed Yield. En M. Kasai (Ed.), *Soybean—The Basis of Yield, Biomass and Productivity*. InTech. <https://doi.org/10.5772/66743>
- Paul & Clark. (1996). *Soil Microbiology and Biochemistry in perspective*. 2.ª ed. Academic Press. https://www2.nrel.colostate.edu/assets/nrel_files/labs/paul-lab/docs/Paul_Chap1.pdf
- Pereira, E. de S., Galantini, J., & Quiroga, A. (2017). Calidad de cultivos de cobertura en sistemas de siembra directa del sudoeste bonaerense. *Ciencia del suelo*, 35(2), 337-350.
- Pérez, G. L., Sotelo, C. E., Sirio, A. A., Carnicer, S., Mansilla, N. P., & López, C. F. (2020). *Análisis comparativo de suelos cultivados y de monte de la provincia del Chaco, Argentina*.
- Peterson, G. A., & Power, J. F. (2015). Soil, Crop, and Water Management. En R. F. Follett, D. R. Keeney, & R. M. Cruse (Eds.), *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability* (pp. 189-198). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/1991.managingnitrogen.c9>
- Picone, L., Videla, C., & García, F. (1997). Desnitrificación durante el cultivo de trigo en un Argiudol típico bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del suelo*, 15, 53-58.
- Pulido Moncada, M., Gabriels, D., Lobo, D., Rey, J. C., & Cornelis, W. M. (2014). Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 139, 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.002>
- Quiroga, A. R., Funaro, D. O., & Fernandez, R. (2005). Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la región pampeana. *Ciencia del suelo*, 33(1), 79-86.
- Ranaivoson, L., Naudin, K., Ripoche, A., Affholder, F., Rabeharisoa, L., & Corbeels, M. (2017). Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(4), 26. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0432-z>
- Reeves, D. W., Rogers, H. H., Droppers, J. A., Prior, S. A., & Powell, J. B. (1992). Wheel-traffic effects on corn as influenced by tillage system. *Soil and Tillage Research*, 23(1-2), 177-192. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(92\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0167-1987(92)90013-2)
- Reichert, J. M., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., & Riquelme, U. F. B. (2009). Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(3), 310-319. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000300013>
- Rubio, V., Gama Roldán, D., Pérez Bidegain, M., & Quincke, A. (2018). Evaluación del intervalo hídrico óptimo en un brunosol éutrico típico bajo diferentes intensidades de uso agrícola. *Agrociencia*, 22(1), 107-115. <https://doi.org/10.31285/AGRO.22.1.11>
- Ruiz, I. G., Castillo Ontaneda, A. L., y Vidal Díaz, M. L. (2020). Impactos críticos del penetrómetro como criterio para estimar la compactación del suelo y decidir labores en caña de azúcar. *Revista Científica Agroecosistemas*, 8(1), 29-38. <https://orcid.org/0000-0002-1248-5135>
- Salvagiotti, F., Specht, J. E., Cassman, K. G., Walters, D. T., Weiss, A., & Dobermann, A. (2009). Growth and Nitrogen Fixation in High-Yielding Soybean: Impact of Nitrogen Fertilization. *Agronomy Journal*, 101(4), 958-970. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0173x>
- Savabi, M. R., & Stott, D. E. (1994). Plant Residue Impact on Rainfall Interception. *Transactions of the ASAE*, 37(4), 1093-1098. <https://doi.org/10.13031/2013.28180>
- Sawchik, J. (2001). Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo pastura bajo laboreo convencional y siembra directa. *Siembra Directa en el Cono Sur. PROCISUR*. Montevideo: INIA
- Scagnozzi, A., Saviozzi, A., Levi-Minzi, R., & Riffaldi, R. (1997). Nutrient release from decomposing crop residues in soil: A laboratory experiment. *American Journal of Alternative Agriculture*, 12(1), 10-13. <https://doi.org/10.1017/S0889189300007116>
- Sharma, P., Singh, A., Kahlon, C. S., Brar, A. S., Grover, K. K., Dia, M., & Steiner, R. L. (2018). The Role of Cover Crops towards Sustainable Soil Health and Agriculture—A Review Paper. *American Journal of Plant Sciences*, 09(09), 1935-1951. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.99140>
- Shaver, T. (2010). Crop Residue and Soil Physical Properties. *Proceedings of the 22nd Annual Central Plains Irrigation Conference, Kearney, NE*. February, 24-25. Thompson, Colby, Kansas, pp. 22-37
- Silva, Á. P. D., Tormena, C. A., Fidalski, J., & Imhoff, S. (2008). Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(1), 1-10. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100001>
- Stolf, R., Murakami, J. H., Brugnaro, C., Silva, L. G., Silva, L. C. F. D., & Margarido, L. A. C. (2014). Penetrômetro de impacto stolf—Programa computacional de dados em EXCEL-VBA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*,

- 38(3), 774-782. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300009>
- Sulistyo, A., Purwantoro, & Sari, K. P. (2018). Correlation, path analysis and heritability estimation for agronomic traits contribute to yield on soybean. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 102, 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/102/1/012034>
- Tamagno, S., Balboa, G. R., Assefa, Y., Kovács, P., Casteel, S. N., Salvagiotti, F.,... Ciampitti, I. A. (2017). Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: A synthesis-analysis. *Field Crops Research*, 200, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.019>
- Taylor, H. M., Mason, W. K., Bennie, A. T. P., & Rowse, H. R. (1982). Responses of soybeans to two row spacings and two soil water levels. I. An analysis of biomass accumulation, canopy development, solar radiation interception and components of seed yield. *Field Crops Research*, 5, 1-14. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(82\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0378-4290(82)90002-8)
- Taylor, H. M., Roberson, G. M., & Parker, J. J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, 102(1), 18-22. <https://doi.org/doi:10.1097/00010694-196607000-00002>
- Tormena, C. A., Silva, A. P., & Libardi, P. L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(4), 573-581. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>
- Urinovsky Irigoyen, K. M., Toledo, D. M., Arzuaga, S. A., Acosta, M. G. L., & Contreras Leiva, S. M. (2021). Indicadores de calidad física en suelos del Chaco semiárido bajo distintos sistemas. *Agrotecnia*, 31, 5. <https://doi.org/10.30972/agr.0315810>
- Villazón-Gómez, A., Martín-Gutiérrez, G., & Cobo-Vidal, Y. (2019). Relación entre la humedad gravimétrica y la resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(1), 35-39.
- Ward, N. (2022). *Nitrogen Credits from Soybeans*. WARDs Laboratories. <https://www.wardlab.com/nitrogen-credits-from-soybeans/#:~:text=Soybean%20residue%20has%20a%20very,held%20in%20old%20crop%20residues.>
- Watanabe, R., Figueiredo, G. C., Silva, Á. P. D., Neves, J. C. L., & Oliveira, T. S. D. (2017). Soil Compressibility under Irrigated Perennial and Annual Crops in a Semi-Arid Environment. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 41. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160206>
- Weber, C. R. (1966). Nodulating and Nonnodulating Soybean Isolines: II. Response to Applied Nitrogen and Modified Soil Conditions¹. *Agronomy Journal*, 58(1), 46-49. <https://doi.org/10.2134/agronj1966.00021962005800010015x>
- Willumsen, J., & Thorup-Kristensen, K. (2001). Effects of Green Manure Crops on Soil Mineral Nitrogen Available for Organic Production of Onion and White Cabbage in Two Contrasting Years. *Biological Agriculture & Horticulture*, 18(4), 365-384. <https://doi.org/10.1080/01448765.2001.9754898>
- Wood, C. W., Westfall, D. G., & Peterson, G. A. (1991). Soil Carbon and Nitrogen Changes on Initiation of No-Till Cropping Systems. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2), 470. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020029x>