

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RENDIMIENTO DEL DOBLE CULTIVO ANUAL TRIGO/SOJA EN FUNCIÓN
DE LOS AÑOS DE AGRICULTURA CONTINUA**

por

Natalia FOSTER ARANDA

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2025**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Ing. Agr. (PhD) Oswaldo Ernst

Tribunal:

Ing. Agr. (PhD) Oswaldo Ernst

Ing. Agr. (PhD) Guillermo Siri-Prieto

Ing. Agr. (MSc) Santiago Alvarez

Fecha: 25 de junio de 2025

Estudiante:

Natalia Foster Aranda

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis.

Al Ing. Agr. Oswaldo Ernst, por su dirección de la tesis y valiosas observaciones a lo largo de todo el proceso.

A Mariana Rosas, Esteban Paiva y Ramiro Izaguirre por su apoyo en el trabajo de campo.

Al personal de laboratorio de la EEMAC y biblioteca de Facultad de Agronomía.

Finalmente, a mi familia, por su amor incondicional, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por estar siempre presentes con palabras de aliento y apoyo constante.

Gracias a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a que esta meta se hiciera realidad.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUCCIÓN.....	10
2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	11
2.1 USO Y MANEJO DE SUELOS EN LA AGRICULTURA DE SECANO EN URUGUAY.....	11
2.2 AGRICULTURA CONTINUA.....	12
2.3 DOBLE CULTIVO ANUAL.....	14
2.4 RENDIMIENTO POTENCIAL Y ALCANZABLE DE UN CULTIVO ...	15
2.5 RENDIMIENTOS OBTENIDOS A NIVEL NACIONAL	16
2.6 FACTORES LIMITANTES DEL RENDIMIENTO	17
2.6.1 Propiedades físicas del suelo.....	17
2.6.2 El agua como limitante del rendimiento	18
2.6.3 Nutrientes como limitante del rendimiento	20
2.6.4 Calidad del suelo como limitante del rendimiento	21
2.7 INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO.....	22
3 HIPÓTESIS DEL TRABAJO	24
4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EXPERIMENTO	25
4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS APLICADOS.....	25
4.3 MANEJO GENERAL DEL ENSAYO	27
4.4 DETERMINACIONES	27
4.4.1 Determinaciones climáticas.....	27
4.4.2 Determinaciones en suelo.....	27
4.4.3 Determinaciones a cosecha trigo y soja.....	28
4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	29
4.5.1 Análisis de varianza (ANAVA).....	29
4.5.2 Análisis multivariado.....	29
4.5.3 Regresión lineal simple	29
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	30

5.2	EFFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO DE SUELO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS	32
5.3	EFFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO DEL SUELO SOBRE LA FERTILIDAD	34
5.4	EFFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO	39
5.5	EFFECTO DE LA CALIDAD DEL SUELO SOBRE SU PRODUCTIVIDAD	43
6	CONCLUSIONES	48
7	BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Descripción de los tratamientos de historia de manejo del suelo.	26
Tabla 2 Descripción de los tratamientos de fertilización.	26
Tabla 3 Variables físicas según los distintos tratamientos de HMS.	32
Tabla 4 Estabilidad de agregados según la HMS.	33
Tabla 5 Concentración de carbono orgánico en el suelo, fósforo disponible y potasio según HMS.	34
Tabla 6 Bases totales y su composición de cationes según la HMS.	36
Tabla 7 Acidez del suelo según HMS.	38
Tabla 8 ACP utilizando las variables del suelo que fueron modificadas significativamente por los tratamientos de HMS.	39
Tabla 9 Correlación de los CP con las variables originales.	40
Tabla 10 Coeficientes de regresión entre rendimiento de Trigo (kg ha^{-1}) y componentes principales y estadísticos asociados.	43
Tabla 11 Coeficientes de regresión entre rendimiento de Soja (kg ha^{-1}) y componentes principales y estadísticos asociados.	43
Tabla 12 Coeficientes de regresión entre rendimiento de Trigo/Soja (kg ha^{-1}) y componentes principales y estadísticos asociados.	43
Figura 1 Medición de infiltración en el campo.	28
Figura 2 Precipitaciones decádicas (mm) durante el ciclo del cultivo de trigo y media histórica 30 años.	30
Figura 3 Precipitaciones decádicas (mm) durante el ciclo del cultivo de soja y media histórica 30 años.	31
Figura 4 Biplot de componentes 1 y 2 del Análisis de Componentes Principales.	41
Figura 5 Rendimiento de trigo (kg ha^{-1}) según historia de manejo del suelo.	44
Figura 6 Rendimiento de soja (kg ha^{-1}) según historia de manejo del suelo.	45
Figura 7 Rendimiento medio acumulado del doble cultivo trigo/soja (kg ha^{-1}) según historia de manejo del suelo.	45

RESUMEN

El incremento en la demanda de alimentos prevista a nivel global para los próximos años debe ser lograda en la superficie agrícola actual, ya que la incorporación de nuevas áreas supone costos ambientales altos. El clima en el país hace posible la realización de doble cultivo anual debido a la disponibilidad de agua y al régimen de temperatura a lo largo del año. La agricultura sostenible ha revitalizado el interés por la rotación de cultivos y la incorporación de pasturas a la rotación. En Uruguay, el deterioro en la fertilidad del suelo y la erosión son factores que limitan de manera importante la producción de cultivos. Los sistemas de labranza y la rotación de cultivos son prácticas de manejo que pueden modificar la calidad del suelo. El objetivo del trabajo es evaluar el efecto de la calidad del suelo como determinante de la brecha existente entre el rendimiento actual y el alcanzable cuando no existen limitantes en el aporte de nutrientes. El diseño experimental fue en parcelas divididas en tres bloques completos al azar. A la parcela mayor se le asignó los 5 tratamientos de historia de manejo de suelo (HMS), en tanto, en la parcela menor se adjudicó el manejo de fertilización. Los tratamientos de HMS aplicados fueron LCP: laboreo convencional, 50% del tiempo en cultivos, 50% del tiempo en pasturas, con predominancia de soja en la fase agrícola; SDP_{sj}: siembra directa, rotación con pasturas y predominancia de soja; SDC_{sj}: siembra directa, cultivo continuo y predominancia de soja; SDC_{sj}-bch: siembra directa, cultivo continuo y alta frecuencia de soja-barbecho y SDC_{sg}: siembra directa, cultivo continuo y predominancia de sorgo. Desarrollar un sistema de cultivo continuo bajo siembra directa y con alta frecuencia de soja de primera en la rotación genera un deterioro en las propiedades físicas del suelo, afectando negativamente la resistencia a la penetración, también afecta de forma negativa la infiltración de agua del suelo al igual que realizar laboreo convencional en rotación con pasturas. Realizar secuencias de cultivo continuo bajo siembra directa con predominancia de sorgo mantiene altos niveles de infiltración de agua del suelo. Incorporar a la rotación pasturas bajo siembra directa mantienen más alto el COS en superficie, mientras que el uso de laboreo convencional o siembra directa con predominancia de soja de primera en la secuencia resultaría en un menor nivel de COS deteriorando la fertilidad del suelo. El rendimiento de los cultivos trigo, soja y de la secuencia trigo/soja no fue afectado de forma significativa por ninguno de los tratamientos de HMS evaluados. El análisis multivariado permitió cuantificar el impacto positivo de mantener el carbono del suelo y agregados estables mayores a 2mm sobre el rendimiento de trigo y el de la infiltración de agua en el suelo sobre el de soja. La HMS definida por la realización de SD mantendría una mejor calidad suelo respecto de utilizar laboreo convencional. Los tratamientos que incorporan pasturas o gramíneas a la rotación presentan mejores resultados en la conservación de calidad del suelo.

Palabras clave: doble cultivo trigo/soja, agricultura continua, historia de manejo del suelo, calidad del suelo

ABSTRACT

The anticipated increase in global food demand for the coming years must be met within current agricultural land, as the incorporation of new areas entails high environmental costs. The country's climate makes double annual cropping possible due to water availability and year-round temperature conditions. Sustainable agriculture has revived interest in crop rotation and the incorporation of pastures into the rotation. In Uruguay, deteriorating soil fertility and erosion are factors that significantly limit crop production. Tillage systems and crop rotation are management practices that can modify soil quality. The objective of this study is to evaluate the effect of soil quality as a determinant of the gap between current yield and that achievable when nutrient input is unrestricted. The experimental design involved plots divided into three randomized complete blocks. The larger plot was assigned five soil management history (HMS) treatments, while the smaller plot was assigned fertilizer management. The HMS treatments applied were LCP: conventional tillage, 50% of the time in crops, 50% of the time in pastures, with soybeans predominating in the agricultural phase; SDP_{sj}: direct seeding, rotation with pastures and soybeans predominating; SDC_{sj}: direct seeding, continuous cultivation and soybeans predominating; SDC_{sj}-bch: direct seeding, continuous cultivation and high frequency of soybean-fallow; and SDC_{sg}: direct seeding, continuous cultivation and sorghum predominating. Developing a continuous cultivation system under direct seeding and with a high frequency of first-crop soybeans in the rotation causes a deterioration in the physical properties of the soil, negatively affecting penetration resistance. It also negatively affects soil water infiltration, as does conventional tillage in rotation with pastures. Continuous cropping sequences under no-till cultivation with a predominance of sorghum maintain elevated levels of soil water infiltration. Incorporating no-till pastures into the rotation maintains higher surface COS, while conventional tillage or no-till cultivation with a predominance of early soybean in the sequence would result in lower COS levels, deteriorating soil fertility. Crop yields for wheat, soybean, and the wheat/soybean sequence were not significantly affected by any of the HMS treatments evaluated. Multivariate analysis quantified the positive impact of maintaining soil carbon and stable aggregates greater than 2 mm on wheat yield, and soil water infiltration on soybean yield. HMS, defined by no-till cultivation, would maintain better soil quality compared to conventional tillage. Treatments that incorporate pastures or grasses into the rotation show better results in maintaining soil quality.

Keywords: double cropping wheat/soybean, continuous agriculture, soil management history, soil quality

1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se estima que hacia el 2050 la población rondará los 9,5 billones de personas (Cassman et al., 2003; Foley et al., 2011), para cubrir las necesidades básicas es necesario incrementar la producción total. El incremento en la demanda de alimentos prevista a nivel global para los próximos años debe ser lograda en la superficie agrícola actual, ya que la incorporación de nuevas áreas supone costos ambientales altos (Garnett & Godfray, 2012).

En la primera década del siglo XXI, se desarrolló el fenómeno expansivo de la superficie agrícola de la región Pampeana de Sudamérica más importante de la historia (Viglizzo et al., 2011). El principal desencadenante del proceso fue el incremento sostenido de los precios de los “comodities” a nivel mundial. En Uruguay pasó de una superficie agrícola de 400 mil hectáreas a una superficie de 2 millones en 10 años, que marcó un récord histórico, siendo la soja el cultivo que dominó el proceso de expansión.

En Uruguay, en la zafra 2022/23, la superficie sembrada de trigo fue de 302.000 hás y en soja fue de 1.010.000 hás. La producción de trigo fue de 1.283 mil toneladas con un rendimiento medio nacional de 4,251 Mg ha⁻¹, mientras que en soja la producción fue de 648 mil toneladas y el rendimiento medio fue de 0,641 Mg ha⁻¹ (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2024). Para trigo la zafra 2022 marcó un récord histórico de rendimiento tras el ya alcanzado en 2020 y 2021 (Berger, 2023). En tanto, la zafra de verano 2022/23 estuvo caracterizada por un déficit hídrico de magnitud sin precedentes para la historia del país y determinó los menores rendimientos de los últimos 20 años (Rava et al., 2023).

El clima en el país hace posible la realización de doble cultivo anual debido a la disponibilidad de agua y al régimen de temperatura a lo largo del año. La agricultura sostenible ha revitalizado el interés por la rotación de cultivos y la incorporación de pasturas a la rotación. En numerosos estudios han documentado los efectos positivos de la incorporación de pasturas a la rotación (Christen et al., 1992; García-Préchac et al., 2004; McEwen et al., 1989; Pierce & Rice, 1988).

En Uruguay, el deterioro en la fertilidad del suelo y la erosión son factores que limitan de manera importante la producción de cultivos. Las prácticas de manejo que pueden modificar la calidad del suelo incluyen los sistemas de labranza y la rotación de cultivos (Ernst et al., 2009). La labranza cero mejora la calidad del suelo y disminuye la erosión, la rotación de cultivos y pasturas hace que el uso del suelo sea más sostenible en las condiciones ecológicas y productivas de Uruguay (García-Préchac et al., 2004).

El siguiente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la calidad del suelo como determinante de la brecha existente entre el rendimiento actual y el alcanzable cuando no existen limitantes en el aporte de nutrientes.

Se plantea como desafío establecer una correlación entre los parámetros de suelo evaluados y el rendimiento de los cultivos.

2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

2.1 USO Y MANEJO DE SUELOS EN LA AGRICULTURA DE SECANO EN URUGUAY

La agricultura en Uruguay hasta mediados del siglo pasado se realizó dentro de lo que se define como "agricultura continua con laboreo". Se caracterizaba por un estancamiento en los niveles de producción, con un rendimiento medio de trigo de 1 Mg ha⁻¹ asociado al deterioro de la calidad del suelo por el propio sistema de producción, entre otros (Contatore & Ernst, 2024).

En las décadas del 1970 y 1980 el esquema de producción cambió a un sistema de rotación de cultivos con pasturas perennes sembradas. El rendimiento del cultivo de trigo pasó a 2.5 Mg ha⁻¹, se redujo la pérdida de suelo por erosión y se pudo mejorar la calidad del suelo. En el siguiente período hasta el 2002 se caracterizó por la adopción de la siembra sin laboreo, lo que permitió reducir los riesgos de erosión de suelo y pérdida de productividad, rendimiento del trigo en el período alcanzó los 3 Mg ha⁻¹. Desde el año 2002 la agricultura en Uruguay se ha intensificado en el área tradicional agrícola y se ha expandido hacia nuevas zonas. Se sustituyó el sistema de rotación de cultivos y pasturas por un sistema agrícola y se incorporaron nuevas zonas con potencial agrícola, tradicionalmente ganadera (Ernst & Siri-Prieto, 2011).

La producción de soja ha crecido de forma sostenida desde el año 2000, condicionada de manera externa por la evolución de la demanda del producto (Arbeletche & Gutiérrez, 2010). El cultivo de soja fue el dominante durante todo el período, en tanto que la intensidad de uso del suelo fue cambiando. Mientras que hasta 2010-2011 casi el 50% de la superficie era sembrada sobre barbecho invernal, la implementación de planes de uso y manejo de suelo (Resolución N°1.564/013, 2013) y cambios en las relaciones de precios fueron intensificando el uso agrícola del suelo (Contatore & Ernst, 2024). Entre 2014-2020 la superficie de barbecho invernal se redujo casi en 300.000 hás (Ernst et al., 2021). El sistema de producción actual se caracteriza por la predominancia de la sucesión de cultivos de trigo y soja en la modalidad de agricultura continua (Arbeletche, 2020).

2.2 AGRICULTURA CONTINUA

Los sistemas agrícolas pueden valorarse en base al efecto sobre la conservación del recurso para que las generaciones futuras puedan desarrollar la actividad y vivir de ella en términos de productividad obtenida o incremento de la rentabilidad del sistema en el largo plazo (Hulugalle & Scott, 2008, como se cita en Siri-Prieto & Ernst, 2010).

El sistema de laboreo y rotación de cultivos son prácticas de manejo con reconocida capacidad de modificar la calidad el suelo. La implementación de sistemas en los que los cultivos anuales rotan con pasturas perennes y no se laborean, mejoran los indicadores de calidad del suelo y reducen la erosión; pero esto no siempre se asocia a una mejora en el rendimiento de los cultivos (García-Préchac et al., 2004).

Cuando se avalúa la sostenibilidad del sistema de producción uno de los factores a considerar es la productividad y variabilidad anual asociada. Cuando los sistemas pierden productividad o sus rendimientos son muy variables entre años, se tornan insostenibles en el tiempo, y sería necesario modificar aquellas variables que se identifican como responsables de los resultados (Siri-Prieto & Ernst, 2010).

En experimentos de largo plazo instalados en la EEMAC, desde el año 1993 al 2008, los resultados sugieren que luego de 12 años la siembra sin laboreo representó una clara ventaja para los cultivos de verano en sistemas de agricultura continua, bajo impacto en los rendimientos de los cultivos de invierno y no mostró efecto positivo de importancia en sistemas integrados de agricultura con pasturas perennes. Transcurridos 12 años, los resultados sugieren que la aplicación de 4 tecnologías para la producción de grano y/o forraje, solo la agricultura continua con laboreo no cumplió con los objetivos de mantener y/o aumentar la calidad del suelo medido en algunas propiedades químicas del mismo (Siri-Prieto & Ernst, 2010).

Fernández y Andregnette (2004) realizaron una primera cuantificación del posible efecto negativo de los años de agricultura continua sin laboreo sobre los rendimientos de los cultivos. El análisis de registros de productores CREA muestran que desaparecieron los rendimientos más altos en las chacras con más años de agricultura. Las variables que pueden definir el resultado pueden ser muchas, como el tipo de suelo, las variedades asignadas, las fechas de siembra y manejo de nutrientes utilizadas.

En trabajo realizado sobre suelos de características similares entre sí pertenecientes de a la Unidad de Suelos Young y San Miguel, Centurión y Chinazzo (2012) no encontraron relación entre el rendimiento de trigo y los años de agricultura continua. En cada sitio se avaluó el rendimiento alcanzable (definido como el rendimiento obtenido cuando no hay limitante de nutriente y se controlan los factores reductores) y el rendimiento actual (el obtenido por los productores en cada sitio con el manejo correspondiente a cada chacra). No se cuantificó efecto de los años de agricultura continua sin laboreo, el rendimiento alcanzable fue similar y en todos los casos superior al actual. Sin embargo, a partir de las propiedades físicas, químicas y biológicas se construyó un índice de calidad del suelo, el cual se relacionó negativamente con la diferencia entre el rendimiento alcanzable y el actual.

Ernst (2018), en una investigación realizada logró cuantificar el impacto negativo de la intensificación agrícola desarrollada en Uruguay sobre el rendimiento en trigo. Se logró demostrar que el proceso de degradación del suelo subyace aún bajo siembra

directa continua. Implica que la calidad del suelo se modifica de manera tal que se transforma en un factor que limita el rendimiento. Además, el efecto negativo generado por los años de cultivo continuo no pudo compensarse con la fertilización nitrogenada con las tasas máximas utilizadas por los productores.

Berón y Muzio (2013) evaluaron el rendimiento del cultivo de soja de segunda según la historia de la chacra, identificaron que los menores rendimientos se lograron en los tratamientos con laboreo convencional y no hubo efecto rotación dentro de la labranza. Los mayores rendimientos fueron logrados con siembra directa pero no encontraron diferencias significativas entre las rotaciones realizadas.

En Entre Ríos provincia de Argentina, Wilson et al. (2000) evaluaron atributos del suelo más sensibles a los cambios ocasionados por el uso y manejo, para utilizarlos como indicadores de calidad del suelo. Seleccionaron lotes representativos del uso actual en una zona agrícola-ganadera, desde netamente agrícola hasta una agricultura continua de 30 años. La calidad del suelo fue afectada por el uso. La agricultura continua provocó un deterioro generalizado en el suelo mientras que las pasturas se mostraron efectivas para su recuperación. Los atributos más sensibles fueron la estabilidad de agregados y la materia orgánica.

En un relevamiento realizado en las zonas costeras del centro-sur y oeste del Uruguay, se analizaron registros de 45 predios para el período 2014- 2020. En el mismo se pudo identificar 3 grandes grupos de sistemas de producción. Los que rotan con pasturas, los que producen solo cultivos, pero diferenciados (incluyen maíz y sorgo rotando con soja) y los que producen soja con alta frecuencia. Los resultados del estudio indican que continuar bajo agricultura continua con alta frecuencia de soja por más de 5 a 7 años implicó una pérdida de 0.32 Mg ha^{-1} de soja por año. El rendimiento esperado de soja después de 10 años es de 1.4 Mg ha^{-1} menos en sistemas de mayor frecuencia de soja (Ernst et al., 2024).

En un estudio realizado por Ernst et al. (2020) se evaluó el efecto de la intensidad de uso del suelo durante 20 años sobre el carbono orgánico de suelo (COS) en un experimento de rotación de cultivos y pasturas sin laboreo. En el mismo se encontraron diferencias significativas en de COS (0-5 cm) entre las rotaciones. El cultivo continuo disminuyó el COS en 16%, 18%, 31% comparado con rotaciones cortas con pasturas, rotaciones largas con pasturas y pasturas perennes respectivamente. Los resultados sugieren que, incluso bajo labranza cero, el cultivo continuo redujo el COS comparado con sistemas de cultivos que incluyen alguna proporción de pasturas en la rotación

Según Ernst et al. (2024) la frontera de producción de soja estuvo determinada por la fecha de siembra, disponibilidad de agua durante el período crítico para definición del rendimiento y su interacción con la estrategia de fertilización. El indicador de uso agrícola de suelo que modificó significativamente el rendimiento de soja fue "años de agricultura continua corregido por frecuencia de soja en la fase agrícola". La predominancia de soja en las rotaciones resultó de precios del grano, financiamiento, comercialización y costos favorables, pero generó impactos negativos en la calidad del suelo, mayor erosión más uso de insumos e impacto ambiental negativo.

2.3 DOBLE CULTIVO ANUAL

Los cultivos múltiples como el doble cultivo trigo/soja, son una alternativa de intensificación, ya sea en forma secuencial, sembrando soja luego de la cosecha de trigo o como intersembra, sembrando soja dentro del trigo en pie durante el llenado de granos (Caviglia et al., 2004).

En los sistemas agrícolas el uso del suelo puede implicar el aprovechamiento de una o dos estaciones de crecimiento al año (invernal y/o estival). En aquellas partes del mundo en donde el clima así lo determina se pueden aprovechar dos estaciones de crecimiento a lo largo del año mediante la implementación del doble cultivo anual (Andrade & Sattorre, 2015)

El doble cultivo anual ha sido largamente implementado por agricultores de muchas regiones del mundo (Fischer et al., 2014), se ha incrementado la productividad de la tierra y el uso de insumos, también los rendimientos del doble cultivo anual son usualmente más estables que aquellos sistemas de un solo cultivo anual (Andrade et al., 2015).

En los sistemas de producción que incluyen doble cultivo anual, el agua disponible a la siembra del cultivo de verano es el residuo del consumo realizado por el cultivo de invierno además de la cantidad y distribución de precipitaciones durante el período del crecimiento del cultivo (Ernst et al., 2009).

En un experimento realizado en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Paysandú Uruguay durante el período julio 2010-abril 2011 por Ernst y Bianculli (2013), se estudió la variación del rendimiento de soja como cultivo de estación completa sembrado sobre un cultivo de cobertura invernal, con relación al doble cultivo anual trigo/soja secuencial o intersembra. En el mismo se determinó que el rendimiento en grano de soja de estación completa fue significativamente superior al logrado por el doble cultivo trigo/soja en cualquiera de sus opciones. Los resultados muestran en efecto negativo sobre el rendimiento de soja en doble cultivo secuencial, cuantificado en 1.28 Mg ha^{-1} . Considerando el rendimiento total del sistema, la secuencia trigo/soja generó el mayor rendimiento, alcanzando un rendimiento total de 5.6 Mg ha^{-1} . Tanto el doble cultivo secuencial como la intersembra significaron incrementos en la eficiencia del uso de los recursos con relación al cultivo de soja de estación completa.

2.4 RENDIMIENTO POTENCIAL Y ALCANZABLE DE UN CULTIVO

El rendimiento potencial (Y_p) de un cultivo se define como el rendimiento obtenido por el genotipo sin limitantes de agua y nutrientes que crece en un ambiente determinado en ausencia de factores estresantes bióticos (insectos, malezas y enfermedades) y abióticos (granizo, heladas, etc.). Para un genotipo definido, el Y_p está determinado por factores definidores del rendimiento, como la disponibilidad de CO_2 , la radiación solar, la temperatura del aire y el fotoperíodo (Van Ittersum & Rabbinge, 1997).

El rendimiento máximo alcanzable en secano (Y_w) es aquel que se obtiene con la mejor combinación de tecnologías e insumos disponibles, pero limitado por déficits de agua en algún momento del ciclo de acuerdo con el régimen hídrico de la zona (Lobell et al., 2009).

El rendimiento alcanzable es el obtenido con las buenas prácticas agrícolas actualmente recomendadas y con las limitaciones abióticas particulares de cada situación, pero donde los factores reductores (plagas, enfermedades y malezas) han sido controlados (Salvagiotti, 2009).

Según Salvagiotti (2009), los componentes más importantes para lograr estos rendimientos son la cantidad de agua utilizada y la eficiencia en el uso de esta. Para lograr rendimientos potenciales es imprescindible la ausencia de períodos de estrés hídrico, tanto en la fase vegetativa como en la reproductiva (Otero et al., 2014). Para alcanzar la máxima producción, la oferta de recursos debe estar disponible en la cantidad requerida y en el momento que se están generando los principales componentes del rendimiento (Salvagiotti, 2009).

La siembra de soja luego de la cosecha de trigo es una práctica habitual en el Uruguay, representando entre una 40 y 60% de la superficie sembrada del país según los años. Según Rizzo (2018), la fuente de variabilidad más importante es el año, siendo responsable del 71% y 74% de la varianza total de soja de primera y de segunda respectivamente. La disminución en el rendimiento potencial se debe principalmente a un cambio en la oferta inicial y dinámica del agua durante las etapas vegetativas y reproductivas del cultivo. Para soja de primera será muy importante la cantidad de agua almacenada en el suelo al momento de la siembra, mientras que para soja de segunda tendrá mayor importancia la cantidad de agua acumulada en el suelo al inicio de R3.

En soja de segunda el período reproductivo se ubica en condiciones de baja temperatura, radiación y fotoperíodo corto (Calviño et al., 2003; Hu & Wiatrak, 2012). Genera una disminución del crecimiento vegetativo como resultado de una floración prematura (Cater & Boerma, 1997, como se cita en Ernst & Bianculli, 2013) y el acortamiento del período de llenado de grano influenciado por el fotoperíodo (Major et al., 1975, como se cita en Ernst & Bianculli, 2013).

2.5 RENDIMIENTOS OBTENIDOS A NIVEL NACIONAL

El rendimiento potencial para trigo en Uruguay ha aumentado con el tiempo, actualmente se ubica en valores cercanos a los 10 Mg ha⁻¹. El rendimiento alcanzable se asume cercano al 80% del potencial de rendimiento del cultivo, por lo tanto, el rendimiento alcanzable es aproximadamente 8 Mg ha⁻¹ (Berger, 2023).

En Uruguay, en soja se han alcanzado rendimientos entre 4,5 Mg ha⁻¹ y 7,89 Mg ha⁻¹ en condiciones de agua no limitante (Canosa & Prieto, 2013; Fassio et al., 2016; Giménez, 2014; Paparcone & Silveira, 2022). La brecha entre el rendimiento potencial y el real disminuye en cultivos bajo riego, en los cuales se obtiene en torno del 85 a 95% del rendimiento, mientras que en cultivos sin riegos difícilmente supera el 50% (Álvarez et al., 2015, como se cita en Lafluf et al., 2023).

Según Rizzo (2018), el rendimiento potencial del cultivo de soja en condiciones de secano en Uruguay es de 3,6 Mg ha⁻¹ para soja de primera y 3,4 Mg ha⁻¹ para soja de segunda. En el estudio se encontró que el rendimiento máximo en secano para soja de primera y soja de segunda fue de 0,1 Mg ha⁻¹ mayor que el rendimiento potencial promedio a nivel nacional, evidenciando que en condiciones favorables el rendimiento potencial de soja puede alcanzarse en condiciones de secano.

Bidegain (2012), trabajando en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Paysandú, estimó rendimientos potenciales de soja que varían entre 4,13 Mg ha⁻¹ y 8,33 Mg ha⁻¹, con promedio de 6,16 Mg ha⁻¹, para los años comprendidos entre 2004 y 2011. Para el estudio se utilizaron datos climáticos de cada zafra, la fecha de siembra y fenología de una serie de experimentos y los datos de suelo (profundidad, textura, materia orgánica y densidad aparente). La radiación acumulada durante el ciclo del cultivo fue determinante de la variación en los rendimientos potenciales entre años. Esta variación está explicada por las diferencias en la radiación solar incidente entre años, la duración de los ciclos de los diferentes cultivares.

Según Mazzilli y Ernst (2007) el rendimiento esperado para la combinación trigo-soja en suelos del área agrícola del Litoral Oeste sería de 6,4 Mg ha⁻¹ en suelos profundos y en suelos superficiales sería de menos de 4,5 Mg ha⁻¹.

En Uruguay, el rendimiento medio de trigo para la serie 2019/20 a 2022/23 fue de 3,92 Mg ha⁻¹, con un mínimo de 3,27 Mg ha⁻¹ en los años 2019/20 y el máximo registrado para la zafra 2022/23 con un promedio de 4,51 Mg ha⁻¹ (DIEA, 2024). Con base en los datos se puede asegurar que hoy existe una brecha de rendimiento importante entre el rendimiento potencial y el obtenido por los productores.

En soja el rendimiento medio para la serie 2019/20 a 2022/23 fue 1,87 Mg ha⁻¹, con un mínimo de 0,64 Mg ha⁻¹ para la zafra 2022/23 y un máximo de 2,79 Mg ha⁻¹ para la zafra 2021/22 (DIEA, 2024). Estos resultados demuestran que hay una brecha entre el rendimiento potencial del cultivo y el obtenido actualmente, evidenciando la existencia de factores limitantes.

En la zafra 2022/23 los cultivos de verano se vieron fuertemente afectados en su rendimiento por el déficit hídrico, particularmente las siembras de segunda aún bajo riego en las que se obtuvo un rendimiento de 0,59 Mg ha⁻¹, mientras que para cultivos de segunda sin riego el rendimiento obtenido fue de 0,42 Mg ha⁻¹ (DIEA, 2024).

2.6 FACTORES LIMITANTES DEL RENDIMIENTO

Durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos para grano se presentan un conjunto de limitantes que tendrán un efecto negativo sobre el rendimiento obtenido, impedirán que se alcancen los rendimientos potenciales (Giménez & García Petillo, 2011).

Las propiedades físicas y químicas del suelo en interacción con las variables climáticas (disponibilidad de agua y radiación, como también los diferentes regímenes térmicos) determinan ambientes distintos para el cultivo de soja (Salvagiotti et al., 2010).

El efecto año ha demostrado tener un mayor impacto que el efecto de la rotación de cultivos, el manejo de suelo y los factores edáficos y topográficos. Para un mismo manejo, la variabilidad temporal es el principal factor determinante del rendimiento del cultivo de soja (Terra et al., 2010).

Según los resultados obtenidos en el experimento de rotación de cultivo-pasturas de INIA, Estación Experimental La Estanzuela, Uruguay, Díaz Roselló (1992) encontró que la reducción de rendimiento de trigo se relaciona con la pérdida de carbono del suelo (suministro de nutrientes) y no puede ser corregida con el agregado de fertilizante nitrogenado.

En un experimento realizado para las condiciones de Uruguay, Otaño y Zarucki (2010) encontraron que los factores edáficos fueron los más correlacionados con los rendimientos de soja, siendo la conductividad aparente el que más efecto tuvo, ya sea positivo o negativamente según el estrato evaluado.

2.6.1 Propiedades físicas del suelo

La estructura física del suelo regula la capacidad de almacenaje, la intensidad y dirección del flujo de los diferentes compuestos y energía, varía ampliamente en respuesta a factores genéticos y ambientales (Martino, 2001).

Según Irmak et al. (2001) las propiedades del suelo como la capacidad de retención de agua, drenaje, profundidad radicular y fertilidad fueron identificadas como las causas más importantes de la variabilidad espacial del rendimiento en soja. Estimar de forma precisa las propiedades del suelo que influyen en el estrés hídrico es muy importante para poder explicar la variabilidad del rendimiento del cultivo.

En las rotaciones de cultivos, durante la etapa de cultivos con laboreo ocurre un deterioro en la estructura y propiedades del suelo. El balance de materia orgánica se hace deficitario, generando menor actividad biológica, produce encostramiento y erosión debido a la disminución de la cobertura del suelo y el tráfico de maquinaria produce compactación y traumatismos físicos a los agregados. Durante la etapa de pasturas se genera una reversión de los efectos anteriores, mejorando la agregación, estructura y las propiedades determinadas por las mismas (García-Préchac, 1992, como se cita en García-Préchac, 2003).

En un estudio realizado en La Pampa Argentina, Aparicio y Costa (2007) evaluaron el efecto de la agricultura continua y el tipo de laboreo sobre la calidad del suelo. Determinaron que las prácticas de laboreo bajo un sistema de agricultura continua afectaron varias propiedades físicas del suelo. Con el aumento de los años de

agricultura continua se redujo la conductividad hidráulica. El cambio en el diámetro medio de los agregados fue el único parámetro físico que se correlacionó significativamente con los años de agricultura continua.

Los mayores valores de densidad aparente se presentan en los sistemas de cultivos continuos y los menores las rotaciones de cultivos y pasturas, presentando valores intermedios las rotaciones de cultivos y pasturas de corta duración (Díaz et al., 1980, García-Préchac et al., 2002, como se cita en García-Préchac, 2003).

Ernst (2000, como se cita en Sawchik, 2001) encontró que las secuencias de cultivo sin laboreo determinaron una mayor estabilidad estructural de agregados que bajo laboreo convencional.

Wander y Bollero (1999) en Illinois, Estados Unidos, determinaron que la práctica de no laboreo mejora las condiciones físicas y biológicas del suelo en los primeros 15 cm, a pesar del aumento en la compactación de este. Las propiedades físicas y biológicas fueron las más alteradas por las prácticas agrícolas.

Martínez et al. (2022) realizaron un estudio donde se buscaba detectar el efecto de distintos sistemas productivos sobre las propiedades físicas y el carbono orgánico del suelo. Se estableció el trabajo sobre un experimento de largo plazo en Paysandú, Uruguay. En el mismo se encontró que el COS y su estratificación mostró diferencias significativas entre los sistemas de producción, al igual que la tasa de infiltración y la evaluación visual de la estructura.

2.6.2 El agua como limitante del rendimiento

Las necesidades de agua de los cultivos son variables y corresponden a la evapotranspiración (ET) que presentan en el ambiente en el que se desarrollan y a la tecnología aplicada en cada situación productiva (Pereira & Alves, 2005, como se cita en Giménez & García Petillo, 2011).

El estrés hídrico es considerado a nivel mundial como el factor más importante en limitar el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Boyer, 1982, como se cita en Giménez, 2014; Nendel et al., 2023, como se cita en Zeleke & Nendel, 2024).

El trigo en las condiciones de cultivo de Uruguay generalmente carece de períodos de estrés hídrico severo y cuenta con regímenes de precipitaciones que superan los requerimientos de los cultivos (Berger et. al., 2018).

Las deficiencias hídricas son una de las principales limitantes ambientales que presenta la soja en el país (Giménez & García Petillo, 2011; Sawchik & Cerreta, 2005).

En el doble cultivo de soja el déficit hídrico es la variable más importante que explica la variación en los rendimientos cuando no hay cambios en las condiciones de radiación solar (Rizzo, 2018).

La disponibilidad de agua para el cultivo está determinada por el nivel inicial de agua en el suelo, los aportes de las precipitaciones y la proporción de éstas que es retenida efectivamente en el perfil, y la topografía del suelo (Kantolic, 2003; Terra et al., 2010). En Uruguay, el régimen pluviométrico es aleatorio en cuanto a cantidad y oportunidad, los suelos relativamente poco profundos y con problemas de infiltración

determinan que sobre todo en los meses de mayor demanda atmosférica es normal que puedan ocurrir deficiencias hídricas (Durán, 1997).

Según Salvagiotti et al. (2010), la productividad de los cultivos está ligada a la ocurrencia de precipitaciones y a la capacidad de almacenaje de agua de los suelos. Se debe tener en cuenta que, para la mayoría de las plantas cultivadas en distintos ambientes, el 50% del agua útil en el suelo es el límite por debajo del cual comienzan a manifestar síntomas de deficiencia hídrica con efecto en la producción.

Considerando las necesidades de agua promedio de los cultivos de verano (alrededor de 500 mm), resulta que el almacenaje máximo de agua para los suelos de nuestro país sólo cubre 1/3 de los requerimientos de los cultivos. Esto implica que las prácticas de manejo ante un escenario de intensificación deberían tender a reducir el riesgo esencialmente en estos cultivos (Sawchik, 2004).

Farias et al. (2007) aseguran que la disponibilidad hídrica durante el período de crecimiento de soja constituye la principal limitante para lograr el potencial de rendimiento siendo además la causa principal de la variabilidad entre años. La disponibilidad de agua es importante, principalmente en dos períodos de desarrollo de la soja; en la etapa de germinación-emergencia y en floración-llenado de grano.

Según Foster y Rovegno (2015), las deficiencias hídricas moderadas durante la etapa vegetativa del cultivo de soja no afectaron significativamente el rendimiento, en tanto que contenidos de agua disponible inferiores al 20% durante la fase vegetativa y la floración sí afectaron significativamente el rendimiento. Los resultados evidencian que no solo son importantes las etapas en las cuales ocurren las deficiencias hídricas, sino también la magnitud de estas.

Incerti et al. citados por Ernst et al. (2009) mencionan que en regiones húmedas y en años de precipitaciones no limitantes, el efecto del manejo del suelo y la secuencia de cultivos tiene bajo impacto sobre el rendimiento de los cultivos.

En el caso de los cultivos de verano de segunda, siempre hay dependencia de las precipitaciones, debido a que el cultivo de invierno en la mayoría de los años entrega el suelo con baja disponibilidad hídrica a la siembra. Esto no determina necesariamente rendimientos inferiores a los cultivos de primera que se inicien sobre un perfil a capacidad de campo, en especial si la capacidad de almacenaje de agua del suelo es baja. Para estas situaciones las precipitaciones que ocurran en el período crítico de los cultivos son las principales determinantes del rendimiento final (Ernst et al., 2009)

La productividad del agua en base anual (rendimiento en grano por unidad de agua disponible) fue mayor en cultivos dobles (trigo/soja) que en sus respectivos cultivos simples. El doble cultivo trigo/soja, al mejorar la captura de agua reduce las pérdidas que originan erosión y transporte de contaminantes. El incremento de la cantidad de cultivos por año aumenta los rendimientos por unidad de tiempo y la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos del ambiente, principalmente el agua (Caviglia & Andrade, 2010).

2.6.3 Nutrientes como limitante del rendimiento

El cultivo de soja de segunda, al ser el sucesor de un cultivo de invierno comienza su ciclo en condiciones especiales que afectan su crecimiento y desarrollo. Se deben diferenciar dos razones determinantes sobre la performance del cultivo, una es el atraso en la fecha de siembra que se traduce en pérdida de rendimiento potencial y otra es la ausencia de período de barbecho que determinaría un comienzo de cultivo con baja reserva de agua y nutrientes (Massigoge & Ross, 2012, como se cita en Berón & Muzio, 2013).

La presencia de dos cultivos en un mismo ciclo agrícola genera interacciones que afecta a cada uno de ellos de diferente manera. En consecuencia, prácticas de manejo aplicadas al primer cultivo afectan directa o indirectamente el rendimiento del segundo (Salvagiotti et al., 2004). La aplicación en el trigo de fertilizantes que contienen en su formulación nutrientes de mediana a baja movilidad en el suelo puede dejar remanentes aprovechables para la soja, debido que la concentración en la solución está en equilibrio con la fase sólida y son adsorbidos por las arcillas (Mengel & Kirby, 1987, como se cita en Salvagiotti et al., 2004).

Los nutrientes generalmente deficientes en trigo son nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) (García et al., 2001). El sistema de agricultura continua en Uruguay ha provocado una reducción en la capacidad del suelo de aportar N (Hoffman et al., 2013; Siri-Prieto & Ernst, 2009), determinado un incremento en las cantidades de N que es necesario aplicar a los cultivos (Centurión & Chinazzo, 2012; Hoffman et al., 2013; Hoffman & Perdomo, 2011). Según Díaz-Zorita y Duarte (2004), entre el 25 % y el 75 % de las necesidades de nitrógeno de soja son logrados por fijación biológica del nitrógeno. Estudios demostraron que en situaciones de no-laboreo, dónde no existe período de barbecho que permita acumular N, la disponibilidad del nutriente para el cultivo está determinada por el residuo de la fertilización del cultivo anterior (Hill et al., 1994, como se cita en Berón y Muzio, 2013).

Los suelos del Uruguay presentan bajos niveles de fósforo (P), la presencia de soja en el sistema genera altos niveles de extracción y eso determina que este nutriente sea el principal factor nutricional en limitar el potencial de producción (Hernández et al., 1995, como se cita en Hoffman, 2013), sobre todo si las cantidades de P agregado no contemplan el total de P extraído por el cultivo (Siri-Prieto & Ernst, 2010).

Los cultivos de segunda, por lo general han recibido poca atención con relación a las necesidades de ajuste de fertilización fosfatada. Existe efecto residual de la fertilización de trigo sobre el cultivo de soja y dada la dinámica del P en el suelo se esperaría en el corto plazo un incremento de este en el suelo, siempre y cuando el P aplicado exceda las necesidades del cultivo de invierno previo (Díaz-Zorita et al., 2002, Fontanetto et al., 2003, Salvagiotti et al., 2003, Vivas et al., 2007, como se citan en Hoffman, 2013).

En un relevamiento de chacras realizado en Uruguay para la zafra 2010-2011, se pudo determinar que el 50% de la variación del P extractable a la siembra del cultivo de soja de segunda estuvo asociada a la región, al rendimiento de los cultivos de invierno previo, al P en el suelo a la siembra y al agregado de P a la siembra de los cultivos de invierno. El cultivo de soja de segunda fue sembrado en un ambiente con

bajos niveles de P en el suelo, determinado por los bajos valores de P en el suelo a la siembra del cultivo de invierno y el nivel de P agregado (Hoffman, 2013). En el mismo estudio se pudo establecer que en el 90% de las chacras relevadas los niveles de fósforo a la siembra de soja de segunda se ubicaban por debajo de 16 ppm de P disponible en suelo 0-20 cm.

Vivas et al. (2012) encontraron que la producción acumulada de trigo/soja en 10 años de evaluación mostró que los mayores rendimientos de trigo se alcanzaron con tratamientos de fertilización NPS, mientras que en soja de segunda los rendimientos más altos se alcanzaron con tratamientos con S.

En el mismo sentido, Gerster y Novello (2003) encontraron que la fertilización combinada con NPS o NPS más micronutrientes a la siembra de trigo o fraccionada a la siembra de trigo y a la siembra de soja de segunda fueron los tratamientos que alcanzaron mayores rendimientos.

2.6.4 Calidad del suelo como limitante del rendimiento

Estudios realizados por varios autores han determinado que la variabilidad del rendimiento de los cultivos se explica, en parte, por la variabilidad en los factores edáficos que alteran la calidad del suelo.

Terra et al. (2010) realizaron un estudio para determinar la relación entre los atributos del terreno con las propiedades del suelo y el rendimiento de los cultivos agrícolas. En el mismo se determinó que el 54% de la variación de rendimiento de los cultivos se explica por los atributos edáficos y topográficos, siendo la elevación y conductividad eléctrica las variables más correlacionadas con el rendimiento.

Ernst et al. (2018) estudiaron las propiedades del suelo que afectan el rendimiento de trigo en respuesta al número de años de cultivo continuo. Evaluaron la calidad de suelo en función del carbono orgánico del suelo (COS), fósforo (Bray 1), textura del suelo, tasa de infiltración de agua y nitrógeno potencialmente mineralizable. Encontraron que el 40% de la brecha de rendimiento de trigo se explica por el deterioro de la calidad del suelo independientemente del suministro de nutrientes para el cultivo. El cultivo anual continuo sin labranza generó un aumento progresivo de la brecha de rendimiento asociada a la calidad del suelo que pudo corregirse con fertilización suplementaria solo en los primeros cinco años luego de la pastura. A partir de entonces, una pérdida intrínseca de la calidad de suelo asociada a las propiedades físicas del suelo limitó aún más el rendimiento del trigo, y esa pérdida no pudo compensarse con agregado de nutrientes.

Kravchenko y Bullock (2000) señalan que aproximadamente el 40% de la variación del rendimiento de maíz y soja se debe a factores edáficos y topográficos. El estudio fue realizado en 8 chacras de Iowa en las que se encontró que la elevación y el carbono orgánico son las variables que más contribuyen a explicar la variación de rendimiento en el estudio.

Baráibar et al. (2014) realizaron un estudio en el cual se evaluó el efecto de la calidad del suelo definida por la historia de manejo de este, como determinante de la brecha de rendimiento. Para ello se construyó un índice de calidad de suelo empleando variables del suelo, y se lo relacionó con el rendimiento de soja, bajo distintos manejos

de fertilización. A partir de los resultados obtenidos se puede afirmar que la historia de manejo de suelo generó diferencias en la calidad de este y que eso limitó el rendimiento del cultivo de soja. Las restricciones no podían ser eliminadas por el mayor agregado de nutrientes.

2.7 INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO

La evaluación de la calidad del suelo se lleva a cabo seleccionando un conjunto de propiedades del suelo que se consideran indicadores de calidad del suelo. Las funciones del suelo son sensibles a los indicadores de calidad del suelo (Aparicio & Costa, 2007). Seleccionar cuidadosamente un número pequeño de indicadores, cuando se utiliza un índice simple, pueden proporcionar adecuadamente la información necesaria para la selección de las mejores prácticas de manejo (Andrews et al., 2002).

Wander y Bollero (1999) en Illinois, Estados Unidos, realizaron un estudio en el cual determinaron que la práctica de no laboreo mejora las condiciones físicas y biológicas del suelo en los primeros 15 cm, a pesar del aumento en la compactación de este. En dicho trabajo, las propiedades físicas y biológicas del suelo fueron las más alteradas por las prácticas agrícolas, siendo la materia orgánica particulada el indicador más sensible a la calidad del suelo.

En un estudio realizado en la Pampa Argentina, se evaluó el efecto de la agricultura continua y el tipo de laboreo sobre la calidad del suelo. Se determinó que las prácticas de laboreo bajo agricultura continua afectan varias propiedades físicas del suelo. Los años de agricultura continua generaron una disminución en la conductividad hidráulica de suelo, también se generó un cambio en el diámetro medio de los agregados (Aparicio & Costa, 2007).

Campitelli et al. (2010) realizaron un estudio en Córdoba para determinar los indicadores que mejor representan la calidad del suelo. Según los resultados, los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar la calidad de suelos están relacionados a la fertilidad de los mismo. La disminución en el contenido de carbono orgánico y sus fracciones, macronutrientes N y P y el aumento en la susceptibilidad a la erosión hídrica son indicadores evidencian una disminución de la calidad del suelo respecto a los sitios que no han sido alterados y conservan su máximo potencial.

Según Cantú et al. (2007), el carbono orgánico evidencia una disminución en la calidad del suelo. El indicador C orgánico fue la propiedad más afectada por el manejo y es considerado un atributo clave dada la marcada influencia sobre la mayoría de las propiedades del suelo. La disminución del CO del suelo sería la causa principal de los valores bajos en el indicador de estabilidad de agregado e infiltración y medios del indicador de densidad aparente. Los cambios en la condición superficial del suelo fueron provocados por un incremento en los procesos de erosión, con la consiguiente pérdida de espesor del horizonte superficial.

Baráibar et al. (2014), desarrollaron un índice de calidad de suelo a partir de la evaluación del rendimiento del cultivo de soja. El ICS construido permitió captar diferencias entre los suelos, pero no identificar una tendencia clara con los rendimientos. En base a los resultados obtenidos identificaron que las propiedades físicas del suelo

explican principalmente las diferencias obtenidas entre las chacras analizadas. Las variables de mayor peso corresponden a Rp (resistencia a la penetración) Rp-m, Rp-20cm y Rp-20/m entre otras. Además, algunas propiedades químicas tomaron alto peso relativo, destacándose el COS 0-20 cm, Mg y pH-KCL.

Bocuti et al. (2022) realizaron un estudio en Mato Grosso Brasil, con la finalidad de establecer indicadores para generar índices de calidad física de suelos cultivados con soja. Los suelos de baja, media y alta calidad física y físico-hídrica tuvieron como atributo más limitante la macroporosidad, ya sea por alto drenaje o baja aireación. Suelos con mayores índices de calidad tenían mejores características inherentes a los agregados.

Sarmiento et al. (2018) realizaron un relevamiento bibliográfico de los principales índices de calidad de suelo utilizados y a partir de esos identificar los principales indicadores. Los indicadores comunes más utilizados en los índices determinan componentes químicos, físicos y biológicos del suelo. Según este estudio, un índice confiable de calidad de suelo debe contener los siguientes indicadores: C de biomasa microbiana, potencial de mineralización de N, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, porosidad, densidad aparente y conductividad hidráulica.

3 HIPÓTESIS DEL TRABAJO

Previo a realizar el trabajo de campo, se plantearon las siguientes hipótesis:

- Eliminando la labranza e implementando rotación de cultivos anuales es posible mantener calidad del suelo.
- Pérdidas de calidad del suelo reducen el rendimiento de la secuencia trigo/ soja.
- Una menor calidad el suelo no se soluciona con manejo nutricional.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EXPERIMENTO

El experimento se desarrolló durante la zafra 2014/2015, en la Estación experimental Mario A. Cassinoni, ubicado en el Departamento de Paysandú, sobre la ruta 3 km 363. El suelo donde se realizó el trabajo corresponde a la unidad San Manuel, según la carta de suelos 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976). Los suelos predominantes son Brunosoles Éutricos, Típicos y Lúvicos, y el grupo CONEAT es 10.9. Para el experimento se utilizó el cultivo de Soja (*Glycine max*) y Trigo (*Triticum estivum*) como antecesor.

4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS APLICADOS

Se utilizó un diseño experimental en parcelas divididas en tres bloques completos al azar. A la parcela mayor se le asignó los 5 tratamientos de historia de manejo de suelo (HMS) (tabla 1), en tanto, en la parcela menor se adjudicó el manejo de fertilización a la secuencia trigo/soja durante la zafra 2014/15.

La parcela mayor correspondiente a historia de manejo de suelo tuvo una dimensión de 15m de largo por 6m de ancho, y la parcela menor de 5m de largo por 2 m de ancho donde se aplicó los distintos tratamientos de fertilización (tabla 2).

Modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_j + H_i + F_k + (\beta.H)_{ji} + (H.F)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ijk} = Variable de respuesta

μ = Media general

β_j = Efecto del j-ésimo bloque

H_i = Efecto del i-ésimo tratamiento de HMS

F_k = Efecto del k-ésimo tratamiento de Fertilización

ε_{ijk} = Error experimental

Tabla 1*Descripción de los tratamientos de historia de manejo del suelo.*

Historia de manejo del suelo	Descripción
LCP	Laboreo convencional, 50% del tiempo en cultivos, 50% del tiempo en pasturas, con predominancia de soja en la fase agrícola
SDPsj	Siembra directa, rotación con pasturas y predominancia de soja
SDCsj	Siembra directa, cultivo continuo y predominancia de soja
SDCsj-bch	Siembra directa, cultivo continuo y alta frecuencia de soja-barbecho
SDCsg	Siembra directa, cultivo continuo y predominancia de sorgo

Los 5 tratamientos de historia de manejo de suelos fueron aplicados durante 20 años en las parcelas. En los tratamientos que rotan con pasturas (LCP y SDPsj), éstas fueron sembradas en 1995, 2002 y 2008, con una mezcla formada por festuca (*Festuca arundinacea*), trébol blanco (*Trifolium repens*) y lotus (*Lotus corniculatus*). En marzo del 2011 se inició el período de barbecho para la siembra de trigo. La secuencia de cultivos iniciada en el 2011 fue trigo/soja-trigo y trigo/sorgo-trigo para tratamientos de predominancia de soja y sorgo respectivamente. Previo al experimento todas las parcelas fueron sembradas con soja.

Tabla 2*Descripción de los tratamientos de fertilización.*

Niveles de fertilización	Descripción
Actual	Criterios actuales para ambos cultivos TRIGO: 90 P₂O₅ kg ha⁻¹, 60 KCl kg ha⁻¹, 20 S₂O kg ha⁻¹ y 70 N kg ha⁻¹ SOJA: 90 P₂O₅ kg ha⁻¹, 60 KCl kg ha⁻¹ y 11 S₂O kg ha⁻¹
Residual	Fertilizar solo el trigo (90 P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹ , 60 KCl kg ha ⁻¹ , 20 S ₂ O kg ha ⁻¹ y 70 N kg ha ⁻¹) y medir el efecto residual en soja (sin fertilizar en soja).

4.3 MANEJO GENERAL DEL ENSAYO

El cultivo de trigo se sembró el 21 de junio de 2014, se utilizó la variedad Fuste, con una población objetivo de 45 plantas por metro lineal y una distancia entre hileras de 17cm. El cultivo se cosechó el 26 de noviembre de 2014. A los efectos de evaluar el efecto de la HMS sobre la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos, todos los tratamientos fueron sembrados sin labranza.

Para el cultivo de soja se utilizó la variedad A5019 con una población objetivo de 30 plantas m⁻² y una distancia entre hileras de 0.5 m. El cultivo se sembró el 5 de diciembre de 2014 bajo la modalidad de siembra directa. La cosecha del cultivo se realizó el día 10 de abril de 2015.

El manejo de malezas, plagas y enfermedades para ambos cultivos se realizó de manera homogénea en todo el experimento, con el criterio de eliminar los factores reductores del rendimiento.

4.4 DETERMINACIONES

4.4.1 Determinaciones climáticas

Los datos de pluviométricos decádicos para el ciclo de los dos cultivos e históricos se obtuvo de los registros de la estación meteorológica de la EEMAC.

4.4.2 Determinaciones en suelo

Se tomaron muestras compuestas de suelo a la siembra del cultivo de soja para cada repetición de los tratamientos. Se utilizó calador, y se tomaron 5 sub-muestras por sub-parcela, separando manualmente los estratos de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm de profundidad. A partir de estas muestras se determinó el nivel de P Bray 1(ppm), K (meq/100g de suelo), Na (meq/100g de suelo), Mg (meq/100g de suelo), Ca (meq/100g de suelo), N total % y C%.

En cada parcela analizada se realizaron determinaciones de infiltración (l/h). La metodología utilizada fue la propuesta por Wander y Bollero (1999), fueron colocados anillos concéntricos a una profundidad que permitiera que los mismos se fijaran y así evitar posibles pérdidas de agua. El cilindro interno (10.4 cm de diámetro) se llenó con 450 cc de agua, y también se colocó agua en el espacio entre ambos cilindros. Se midió el tiempo que demoró en desaparecer el agua. El tiempo obtenido expresó la infiltración con los niveles de agua disponible en el suelo en el momento de la determinación, denominada como Infiltración 1.

Figura 1*Medición de infiltración en el campo.*

Nota. El cilindro interior contiene 450 cc de agua. El tiempo para infiltración total se mide en el anillo interior.

En cada parcela correspondiente a HMS se seleccionaron tres parcelas menores (1, 2 y 3) y en cada una de ellas se realizaron 2 mediciones de resistencia a la penetración (R_p). Para medir R_p se utilizó un penetrómetro de cono, que corresponde a una barra metálica y que en base a un índice señala el grado de resistencia a la penetración por cm de inserción en el suelo de manera objetiva imitando la acción de la raíz. La medición se realizó el 2 de febrero de 2014, durante el ciclo del cultivo de soja.

A la siembra se realizó la medición de estabilidad de agregados, para la misma se realizó la extracción de panes de suelo correspondientes a los primeros 20 cm de suelo. Se realizaron 3 muestras por cada tratamiento de HMS, las mismas fueron pesadas y se separó 1/4 de cada muestra para procesar. Luego la muestra de suelo se agita (con un agitador) en una columna de tamices (mallas de 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm, 0.0625 mm, 0.03125 mm y 0.015625 mm) a una velocidad de 210 ciclos por minuto durante 5 minutos y se determina la fracción de suelo retenido en cada tamiz.

4.4.3 Determinaciones a cosecha trigo y soja

Se determinó el número de plantas (pl. m^{-2}), contando las mismas en dos metros lineales de las tres hileras centrales de las parcelas que fueron cosechadas.

Se determinó el rendimiento (kg ha^{-1}) obtenido en las parcelas, cosechando dos metros lineales de las tres hileras centrales.

Se determinó el peso de 100 granos (g) de cada una de las parcelas cosechadas.

4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.5.1 Análisis de varianza (ANAVA)

Se realizó el análisis de varianza (ANAVA) con todas las variables medidas para determinar la existencia o no de diferencias significativas entre los tratamientos. Se consideró a priori un p-valor de 0,1 como nivel de significancia. Para los efectos significativos se realizó la comparación de medias utilizando la prueba de LSD Fisher, con un $\alpha=0,05$.

Para analizar los rendimientos obtenidos en función de las HMS se consideró el número de plantas como covariable, ya que esta no dependió de la HMS, pero si puede afectar el rendimiento. Dado que la interacción entre HMS y fertilización no fue significativa, se descarta la Hipótesis de que la fertilización corrige efectos negativos sobre el rendimiento. Por tanto, en el presente trabajo se analizan los resultados sobre el rendimiento en grano solo de los efectos principales de la HMS.

4.5.2 Análisis multivariado

Para identificar las variables del suelo que explicaron las diferencias entre las HMS se realizó un análisis de componentes principales (ACP).

Los componentes principales (CP) se definen como una combinación lineal de variables con relación a un sistema de coordenadas. La mayor varianza del conjunto de datos es capturada en el primer eje (se denomina Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande en el segundo eje, y así sucesivamente. Para realizar el ACP, se definió el mínimo set de datos (MSD), siguiendo los pasos propuestos por Wander y Bollero (1999). Se consideraron las variables que fueron significativamente diferentes entre las HMS y luego se estableció la correlación entre ellas.

Se identificaron los CP que presentaron mayor “vector”, son los que representaron la mayor parte de la variación y se retuvieron en el análisis aquellos que explicaron más de un 5% de la variación (Wander & Bollero, 1999). Luego se realizó un análisis de la varianza para los CP en función de las HMS de manera de determinar cuáles CP se diferenciaron en los tratamientos.

4.5.3 Regresión lineal simple

Para identificar la relación entre el rendimiento (kg ha^{-1}) y los CP se utilizó una regresión lineal simple con el rendimiento (kg ha^{-1}) como variable dependiente y los CP como regresoras.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

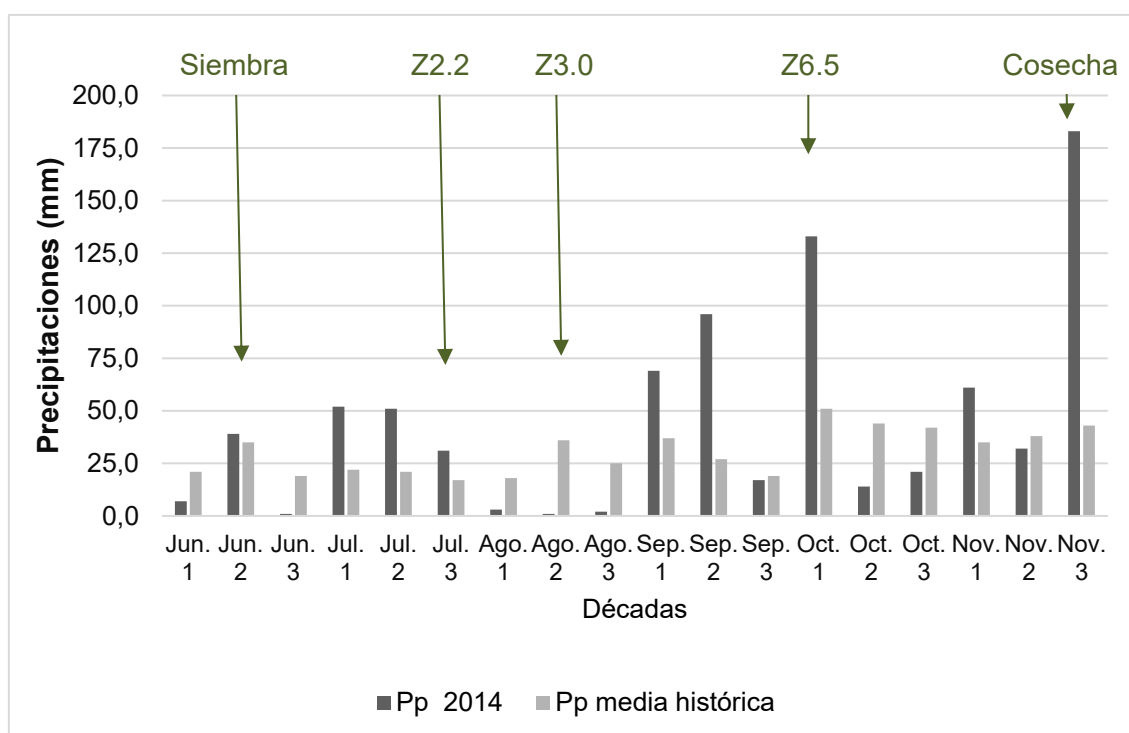
5.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

La caracterización climática para los períodos de cultivos y la media histórica de 30 años fue realizada en base a los registros obtenidos de la estación meteorológica de la EEMAC.

Durante la estación de crecimiento del cultivo de trigo (junio a noviembre), se produjeron precipitaciones por un total de 812 mm, siendo más de un 40% superior al promedio histórico. El año 2014 fue un año que se caracterizó por una primavera lluviosa (figura 3).

Figura 2

Precipitaciones decádicas (mm) durante el ciclo del cultivo de trigo y media histórica 30 años.

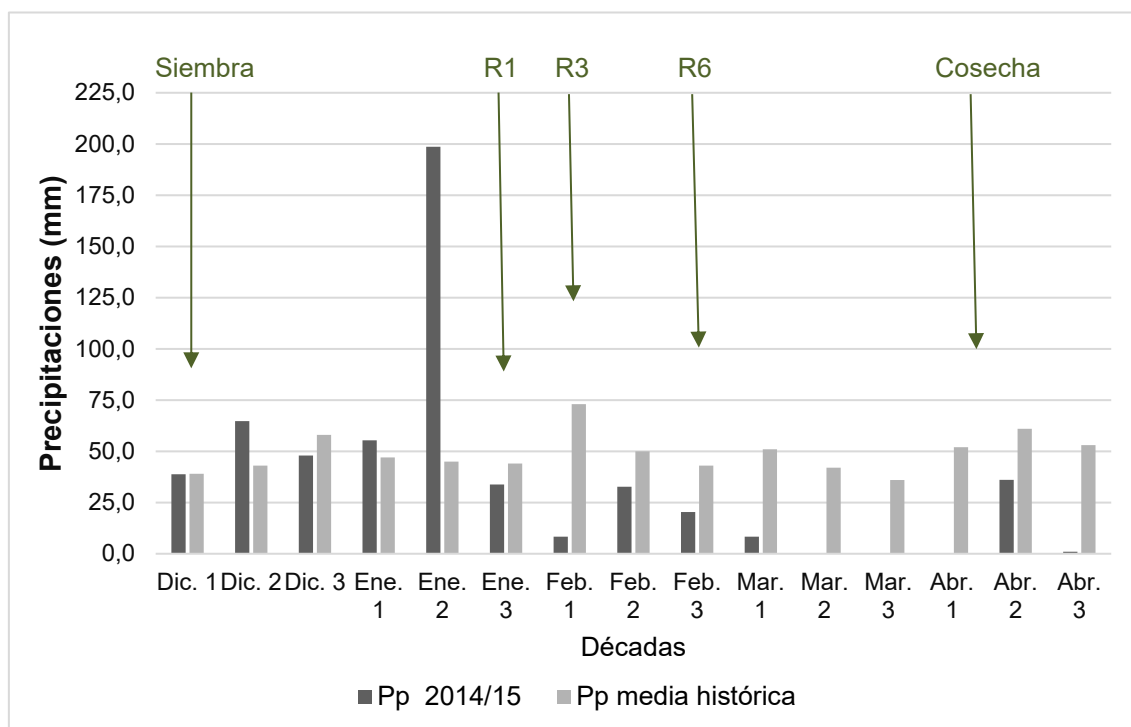


Nota. Elaborado con base en datos obtenidos de la estación meteorológica de la EEMAC 2015. (E. Cairus, comunicación personal, 16 octubre, 2015)

Durante todo el ciclo del cultivo de soja se registraron 546 mm, un 18% por debajo de la media histórica para el período. Las primeras etapas de crecimiento del cultivo transcurrieron con precipitaciones similares a la media histórica, en tanto que desde el inicio del período crítico de definición del rendimiento hasta el fin de la estación de crecimiento del cultivo las lluvias ocurridas fueron inferiores a la media histórica (figura 4).

Figura 3

Precipitaciones decádicas (mm) durante el ciclo del cultivo de soja y media histórica 30 años.



Nota. Elaborado con base en datos obtenidos de la estación meteorológica de la EEMAC 2015. (E. Cairus, comunicación personal, 16 octubre, 2015)

5.2 EFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO DE SUELO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

Tabla 3

Variables físicas según los distintos tratamientos de HMS.

HMS	Rp-m (KPa)	Rp-20cm (KPa)	Rp-20/m (KPa)	CE 0-5 (μ S/cm)	CE 5-20 (μ S/cm)	INF l/h/m ²
LCP	1589,66 a	321,33 a	0,2 a	99,03 a	72,18 a	0,33 c
SDPsj	1398,89 a	243,78 a	0,18 a	105,9 a	72,72 a	2,33 abc
SDCsj	1514,74 a	312,39 a	0,2 a	99,3 a	75,68 a	3,78 ab
SDCsj-bch	1624,58 a	363,61 a	0,23 a	103,27 a	67,17 a	0,83 bc
SDCs _g	1551,36 a	261 a	0,17 a	103,22 a	66,07 a	4,02 a
Nivel de significancia (p valor)	0,4392	0,122	0,2021	0,5985	0,3325	0,0549

Nota. Medidas con letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Rp-m: resistencia a la penetración media (KPa), Rp-20 cm: resistencia a la penetración de los primeros 20 cm (KPa), Rp-20/m: Rp y la media; (KPa), CE 0-5: conductividad eléctrica de 0 a 5 cm (S/min), CE 5-20: conductividad eléctrica de 5 a 20 cm (μ S/cm), INF: infiltración del suelo (l/h/m²).

Para la variable Rp-m no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos analizados. Para Rp-20 cm y Rp-20/m la HMS SDCsj-bch presentó el mayor valor, en tanto que SDPsj y SDCs_g presentaron los valores más bajos, éste último para ambas variables. No se encontraron diferencias significativas entre las HMS en cuanto a conductividad eléctrica para las dos profundidades analizadas. En infiltración se encontró diferencias significativas entre las HMS, siendo SDCs_g el que presentó el valor más alto, mientras que LCP registró el valor más bajo, seguido en orden creciente por SDCsj-bch y SDPsj (tabla 3).

Tabla 4*Estabilidad de agregados según la HMS.*

HMS	E.A. 2 mm	E.A. 1 mm	E.A. 0,5 mm	E.A. 0,25 mm	E.A. 0,125 mm	E.A. 0,0625 mm	E.A. 0,03125 mm	E.A. 0,015625 mm	TP mm
LCP	3,96 b	0,53 b	1,43 ab	1,32 a	1,2 a	0,3 a	0,03 b	0,01 b	1,2 ab
SDPsj	6,6 a	0,25 c	0,8 b	0,73 b	0,56 b	0,12 b	0,05 a	0,02 ab	0,81 b
SDCsj	6,34 a	0,42 bc	0,89 b	0,78 b	0,59 b	0,12 b	0 c	0,01 ab	0,87 b
SDCsj-bch	3,27 b	1,02 a	1,74 a	1,18 a	1,11 a	0,16 b	0,03 ab	0,03 a	1,42 a
SDCsg	2,97 b	1,2 a	1,79 a	1,18 a	1,09 a	0,17 b	0,04 ab	0,03 a	1,46 a
Nivel de significancia (p valor)	<0,0001	<0,0001	0,0232	0,0006	0,0006	0,0003	0,0003	0,0554	0,0431

Nota. Medidas con letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). E.A.: Estabilidad de Agregados, TP: Tamaño ponderado.

Los tratamientos analizados en la tabla No. 4 muestran diferencias significativas en la estabilidad de agregados, presentan un valor relativamente más alto en la fracción de 2 mm y disminuye a medida que se reduce el tamaño de las fracciones. Esto sugiere que los agregados más grandes son más estables, pero se tiende a perder estabilidad en los agregados más pequeños. Analizando el tamaño ponderado de los agregados, los tratamientos SDCsg (1.46 g) y SDCsj-bch (1.42 g) tienen los valores más altos diferenciándose significativamente en comparación con las demás HMS.

5.3 EFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO DEL SUELO SOBRE LA FERTILIDAD

Tabla 5

Concentración de carbono orgánico en el suelo, fósforo disponible y potasio según HMS.

HMS	COS 0-5(%)	COS 5-20(%)	P 0-5 (ppm)	P 5-20 (ppm)	K 0-5 (meq/100g)	K 5-20 (meq/100g)
LCP	2,02 b	2,27 a	8,55 ab	13,92 a	0,47 c	0,57 a
SDPsj	2,58 a	1,96 a	8,59 ab	7,81 ab	0,71 ab	0,48 a
SDCsj	2,39 ab	2,23 a	17,29 a	3,58 b	0,41 c	0,53 a
SDCsj-bch	2,01 b	2,5 a	7,3 b	10,84ab	0,75 a	0,42 a
SDCsg	2,27 ab	2,45 a	17,03 a	11,49 a	0,49 bc	0,32 a
Nivel de significancia (p valor)	0,04	0,3305	0,0765	0,0992	0,0239	0,2517

Nota. Medidas con letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). COS 0-5: Carbono orgánico de 0 a 5 cm (%), COS 5-20: Carbono orgánico de 5 a 20 cm (%), P 0-5: Fósforo de 0 a 5 cm (ppm), P 5-20: Fósforo de 5 a 20 cm (ppm), K 0-5: Potasio de 0 a 5 cm (meq/100g de suelo), K 5-20: Potasio de 5 a 20 cm (meq/100g de suelo).

Los tratamientos de HMS generaron diferencias significativas en el contenido de COS en los primeros 5 cm del perfil del suelo, en tanto que para la fracción de 5-20 cm no se diferenciaron (tabla 5). El mayor contenido de COS para la fracción de 0-5 cm se identificó para el tratamiento SDPsj mientras que los valores más bajos se dieron en los tratamientos LCP y SDCsj-bch, el resultado podría ser explicado por la realización de SD y la rotación con pasturas.

El contenido de fósforo muestra diferencias significativas entre tratamientos de HMS y varía según la fracción analizada. El nivel crítico está definido entre 10-12 ppm en los primeros 20 cm del suelo (García Lamothe, 2011; Morón, 2005). En los primeros 5 cm del suelo el mayor contenido de fósforo se cuantificó en los tratamientos SDCsj y SDCsg y el menor valor por debajo del nivel crítico se identificó en el tratamiento SDCsj-bch. Para la porción de 5-20 cm los tratamientos LCP, SDCsj.bch y SDCsg presentaron contenido de P por encima del nivel crítico, mientras que SDPsj y SDCsj presentaron valores por debajo del mismo. Para el último tratamiento se evidencia que el contenido de P es mayor en superficie y disminuye en profundidad, causado posiblemente por la

fertilización superficial. En el caso de los tratamientos LCP y SDCsj-bch el contenido de P en superficie es menor que en profundidad, una posible causa podría atribuirse al uso de laboreo y al período de barbecho que propician la pérdida de suelo por erosión.

En la primera porción de 0-5 cm de suelo el contenido de K varió significativamente según la HMS, se mantuvo por encima del nivel crítico establecido en 0,34 meq/100g de suelo (Barbazán et al., 2011; García Lamothe & Quincke, 2012; Núñez & Morón, 2013) en todos los tratamientos. Se identificó el contenido más alto de K en el tratamiento de SDCsj-bch, mientras que el valor más bajo se midió en LCP y SDCsj. En la sección de 5-20 cm no se identificaron diferencias significativas generadas por las HMS.

Tabla 6*Bases totales y su composición de cationes según la HMS.*

HMS	Ca 0-5 (meq/100g)	Ca 5-20 (meq/100g)	Mg 0-5 (meq/100g)	Mg 5-20 (meq/100g)	Na 0-5 (meq/100g)	Na 5-20 (meq/100g)	BT 0-5 (meq/100g)	BT 5-20 (meq/100g)
LCP	11,39 a	10,85 a	1,22 b	1,33 a	0,14 a	0,12 a	13,24 a	12,85 a
SDPsj	11,66 a	11,58 a	1,39 b	1,26 a	0,09 a	0,12 a	14,28 a	12,99 a
SDCsj	11,07 a	11,56 a	1,23 b	1,36 a	0,11 a	0,09 a	13,46 a	12,9 a
SDCsj-bch	12,85 a	11,7 a	1,59 a	1,25 a	0,14 a	0,1 a	14,77 a	14,03 a
SDCsg	10,01 a	11,14 a	1,3 b	1,19 a	0,1 a	0,13 a	10,91 b	13,74 a
Nivel de significancia (p valor)	0,1723	0,709	0,0121	0,1994	0,3558	0,6644	0,0114	0,2108

Nota. Medidas con letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). Ca 0-5: Calcio de 0 a 5 cm (meq/100g de suelo), Ca 5-20: Calcio de 5 a 20 de 5 a 20 cm (meq/100g de suelo), Mg 0-5: Magnesio de 0 a 5 cm (meq/100g de suelo), Mg 5-20: Magnesio de 5 a 20 de 5 a 20 cm (meq/100g de suelo), Na 0-5: Sodio de 0 a 5 cm (meq/100g de suelo), Na 5-20: Sodio de 5 a 20 de 5 a 20 cm (meq/100g de suelo), BT 0-5: Bases Totales de 0 a 5 cm (meq/100g de suelo), BT 5-20: Bases Totales de 5 a 20 de 5 a 20 cm (meq/100g de suelo).

La HMS no generó diferencias significativas en el contenido de Ca en los primeros 5 cm del perfil, siendo SDCsj-bch el tratamiento con el contenido más alto y SDCsg el de valor más bajo. En tanto que en la siguiente porción de suelo de 5-20 cm tampoco se encontraron diferencias entre los tratamientos (tabla 6).

Para el contenido de Mg se encontraron diferencias significativas entre las distintas HMS en los primeros 5 cm, el valor más alto se encontró en el tratamiento SDCsj-bch, en las demás HMS el valor fue menor y no se diferenciaron entre sí. En los siguientes 5 a 20 cm las HMS no generaron diferencias significativas.

El contenido de Na no fue afectado significativamente por los tratamientos de HMS en ninguna de las dos profundidades del suelo analizadas.

Las BT se diferenciaron significativamente según la HMS en los primeros 5 cm de suelo, el menor contenido se encontró para el tratamiento SDCsg mientras que los demás no se diferenciaron entre sí. En los siguientes 5-20 cm no se encontraron diferencias entre los tratamientos.

Tabla 7*Acidez del suelo según HMS.*

HMS	pH KCL 0-5	pH KCL 5-20	pH H ₂ O 0-5	pH H ₂ O 5-20	Ac. Tit. 0-5 (meq/100g)	Ac. Tit. 5-20 (meq/100g)
LCP	4,73 a	4,6 a	5,74 a	5,59 a	3,86 b	3,62 a
SDPsj	4,72 a	4,78 a	5,75 a	5,69 a	3,88 b	3,62 a
SDCsj	4,7 a	4,63 a	5,7 a	5,62 a	4,14 b	3,7 a
SDCsj-bch	4,79 a	4,7 a	5,69 a	5,65 a	3,7 b	3,63 a
SDCsg	4,36 b	4,62 a	5,37 b	5,62 a	5,59 a	3,81 a
Nivel de significancia (p valor)	0,0008	0,4409	0,0525	0,6796	0,0011	0,7458

Nota. Medidas con letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). A. Tit. 0-5: Acidez titulable (meq/100g de suelo), A. Tit. 5-20: Acidez titulable (meq/100g de suelo), pH-KCL0-5: pH del cloruro de potasio de 0 a 5 cm, pH-KCL 5-20: pH del cloruro de potasio de 5 a 20 cm, pH-H₂O 0-5: pH del agua de 0 a 5 cm, pH-H₂O 5-20: pH del agua de 5 a 20 cm.

En la tabla No. 7 se puede observar que el pH-KCL presentó valores de pH más bajos si lo comparamos con el pH-H₂O, debido a que este además de medir la concentración de protones H⁺ existente en la solución del suelo, cuantifica el nivel de protones de Al⁺³ liberados a la solución desde la fase de intercambio.

Analizando los resultados, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de HMS. El tratamiento SDCsg presentó el menor valor para pH-KCL y para la variable pH-H₂O en los primeros 5 cm del perfil del suelo, en tanto que en la porción más profunda los tratamientos de HMS no se diferenciaron significativamente. Los valores de pH-H₂O recomendados para el cultivo de soja en Uruguay están entre 5 y 6,5 (Del Pino, 2012), por lo que todas las HMS se encuentran dentro del rango. Según Osorio (2012) en suelos de pH por debajo de 5,5 la presencia de iones de Al restringe la solubilidad-disponibilidad de fosfato, sulfato y molibdeno. Además, afecta negativamente la nitrificación y la descomposición de materia orgánica.

Los resultados de acidez titulable indicaron diferencias significativas entre las HMS. El tratamiento de SDCsg presentó el valor más alto de Ac.Tit. en los primeros 5 cm del suelo, siendo el resultado 5.59 meq/100 g de suelo, mientras que en la porción de 5-20 cm no se encontraron diferencias entre tratamientos. El valor más alto de acidez titulable podría evidenciar la menor capacidad buffer del suelo y una mayor presencia de Al⁺³.

El tratamiento SDCsg presentó menor pH y mayor Acidez, ese resultado podría ser explicado por una mayor frecuencia y cantidad de fertilización nitrogenada aplicada para cubrir los requerimientos de los cultivos de la secuencia.

5.4 EFECTO DE LA HISTORIA DE MANEJO SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO

Se utilizó el ACP para identificar un conjunto mínimo de propiedades que puedan definir la calidad del suelo y su relación con la respuesta vegetal.

En la tabla No. 8 se resume el resultado del ACP utilizando las propiedades del suelo que fueron modificadas significativamente por los tratamientos de HMS.

Tabla 8

ACP utilizando las variables del suelo que fueron modificadas significativamente por los tratamientos de HMS.

Lambda	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	7,81	0,46	0,46
2	5,90	0,35	0,81
3	1,85	0,11	0,92

Nota. Variables analizadas: : COS 0-5, P 0-5, P 5-20, K 0-5, Mg 0-5, BT 0-5, pH H₂O 0-5, Ac. Tit. 0-5, Rp 20cm, Rp 20/media, Infiltración, E.A. 2 mm(g), E.A. 1 mm(g), E.A. 0,5 mm (g), E.A. 0,25 mm(g), E.A. 0,125 mm(g), Tamaño Ponderado.

Con tres CP se logró explicar el 90% de la variabilidad de la calidad del suelo generada por HMS. Los R² parciales de los CP1, CP2, y CP3 fueron 0,46; 0,35; y 0,11 respectivamente.

Tabla 9*Correlación de los CP con las variables originales.*

Variables	CP 1	CP 2	CP 3
COS 0-5	0,88	0,31	0,33
P 0-5	0,21	0,85	-0,12
P 5-20	-0,82	-0,07	-0,13
K 0-5	-0,09	-0,61	0,76
Mg 0-5	-0,31	-0,55	0,76
BT 0-5	0,27	-0,95	0,14
pH H2O 0-5	0,43	-0,85	-0,29
Ac. Tit. 0-5	-0,24	0,95	0,17
Rp 20cm	-0,49	-0,6	-0,26
Rp 20/media	-0,32	-0,79	-0,06
Infiltración	0,42	0,82	0,24
E.A. 2 mm(g)	0,99	-0,16	-0,06
E.A. 1 mm(g)	-0,83	0,36	0,35
E.A. 0,5 mm (g)	-0,97	0,16	0,14
E.A. 0,25 mm(g)	-0,95	-0,01	-0,29
E.A. 0,125 mm(g)	-0,97	-0,01	-0,2
Tamaño Ponderado	-0,97	0,18	0,17

Con 3 CP se agrupa más del 90% de la variabilidad ($R^2=0,92$). En el CP1 las variables con mayor coeficiente fueron COS 0-5 cm, P 5-20 cm, E.A. en todas sus fracciones medidas y Tamaño Ponderado. Para el caso de CP2 las variables con mayor coeficiente fueron P 0-5 cm, BT 0-5 cm, pH H2O 0-5 cm, Ac. Tit. 0-5 cm, Rp 20/media e Infiltración. En CP3 la mayor correlación se identificó para las variables K 0-5 cm y Mg 0-5 cm (tabla 9). En base a los coeficientes correlación de las variables con los CP, hay dos ejes definidos por propiedades físicas del suelo, el eje 1 como “Estabilidad de agregados”, al eje 2 como “Infiltración” y el eje 3 como “Propiedades químicas”.

La ubicación de las HMS en el cuadrante de la figura No. 4 indican que LCP se diferenció en todos los CP por las variables Rp 20 cm, Rp 20/media, E.A. 0.25 mm, E. A.0.125 mm y P 0-5 cm, en algunos CP las diferencias se generaron por E.A. 2, Mg 0-5 cm, K 0-5 cm y por la variable pH H2O 0-5 cm. La estabilidad de agregados en las fracciones intermedias fue afectada, al igual que la menor resistencia a la penetración y una menor estratificación de nutrientes, los resultados podrían ser explicados por la realización de laboreo convencional.

“Infiltración” separa las dos HMS que incluyen doble cultivo anual con soja (SDPsj y SDCsj) de la rotación con pasturas bajo labranza y doble cultivo con sorgo o soja de primera. En tanto, “Estabilidad” discriminó entre SDC con doble cultivo anual de labranza y SDsj-bch.

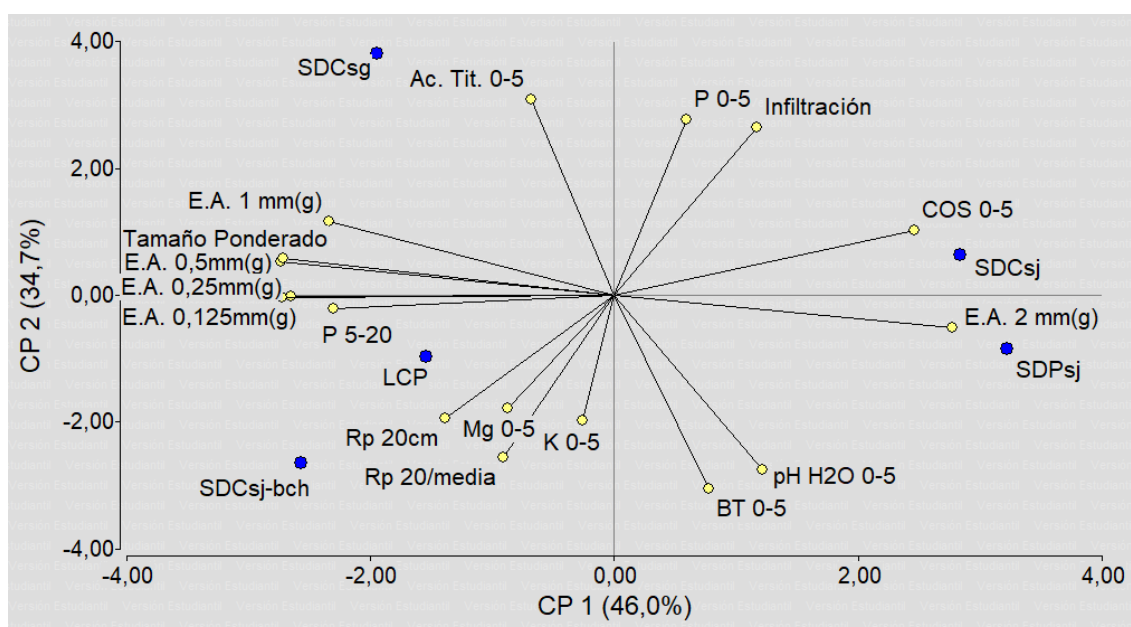
SDCsg se diferenció en todos los CP en E.A. 1 mm, E.A. 0,5, Tamaño Ponderado y Ac. Tit. 0-5, y en algunos casos Mg 0-5 cm, K 0-5 cm, COS 0-5 e Infiltración.

Para la HMS SDP_{sj}, la variable B.T. 0-5 cm se diferenci3 en todos los CP, K 0-5 cm, Mg 0-5 cm, COS 0-5 cm, pH H₂O 0-5 cm, E.A. 2 mm e Infiltraci3n se diferenciaron en una sola oportunidad.

Para el caso de SDC_{sj} la variable que la diferenci3 en todos los CP fue P 0-5 cm, en alg3n caso por la Infiltraci3n, E.A. 2 mm, COS 0-5 cm y pH H₂O 0-5 cm. En tanto, SDC_{sj}-bch se diferenci3 en todos los CP por las variables Mg 0-5 cm y K 0-5 cm, tambi3n en algunos CP para las variables, B.T. 0.5 cm, P 5-20 cm y Ac. Tit. 0-5 cm, y en las variables f3sicas Rp 20 cm, Rp 20/media, E.A. 0,5 mm y E.A. 0.125 mm. El efecto en la estratificaci3n del contenido de nutrientes y las propiedades f3sicas del suelo podr3an evidenciar un efecto de la siembra directa, la fertilizaci3n superficial y el menor aporte de residuos vegetales al sistema por la predominancia de soja en la rotaci3n.

Figura 4

Biplot de componentes 1 y 2 del An3lisis de Componentes Principales.



En las fracciones de agregados mayores 2 mm destacan SDP_{sj} y SDC_{sj}, mostrando valores menores LCP, SDC_{sj}-bch y SDC_{sg}. En tanto que en E.A. 1 mm (g) hasta 0.125 mm (g) los resultados se invierten y destacan LCP, SDC_{sj}-bch y SDC_{sg} sobre los dem3s HMS.

Los resultados siguen el mismo sentido que los obtenidos por Ernst y Siri-Prieto (2009), analizando el mismo sitio experimental pudieron constatar que el mayor valor de E.A. se obtiene en los sistemas que rotan con pasturas sin laboreo.

Los tratamientos de HMS afectaron la resistencia a la penetraci3n y la infiltraci3n. El tratamiento SDC_{sj}-bch mostr3 el mayor valor de Rp a 20 cm (363,61 KPa) junto con una infiltraci3n media/baja, mientras que LCP present3 el valor m3s bajo de infiltraci3n.

El tratamiento SDCsg mostró el valor más alto de infiltración, por otro lado, el tratamiento de LCP mostró el peor desempeño en esta variable seguido por SDCsj-bch, lo que podría limitar la disponibilidad del agua para el cultivo y afectar negativamente el crecimiento. Los resultados están alineados con los presentados Cantú et al. (2007) donde los autores indican que una menor capacidad de infiltración puede estar determinada por la pérdida de estructura de la capa superficial del suelo generada por el laboreo, además de las pérdidas de suelo provocadas por la erosión durante el período de laboreo y/o barbecho.

La conductividad no varió significativamente entre las HMS analizadas. Los resultados difieren de los presentados por Aparicio y Costa (2007) quienes indican que los años de agricultura continua reducen la conductividad hidráulica. La compactación del suelo y una alta concentración de sales pueden dificultar el desarrollo radicular, lo que limita el acceso al agua y nutrientes.

La HMS tiene un impacto significativo sobre la fertilidad del suelo, afectando el contenido de nutrientes en el mismo. El tratamiento SDPsj mostró un mayor contenido de COS (2,58%), mientras que LCP y SDCsj-bch presentaron valores más bajos (2,02% y 2,01% respectivamente). El mayor contenido de COS podría correlacionarse con una mayor productividad agrícola, mejorando la estructura, la capacidad de infiltración y retención de agua del suelo. Los tratamientos donde se realiza siembra directa o incluyen pasturas en la rotación presentan una mejor calidad de suelo en contraste a los que se realiza laboreo convencional y predomina el cultivo de soja en la rotación con períodos de suelo descubierto en barbecho. Según Campitelli et al. (2010) la disminución en el contenido de carbono orgánico del suelo evidencia una disminución en la calidad del suelo.

Evaluando las características del suelo según las propiedades que se consideran indicadores de calidad de suelo presentadas por diversos autores (Aparicio & Costa, 2007; Baráibar et al., 2014; Bocuti et al., 2022; Campitelli et al., 2010; Cantú et al., 2007; Ernst et al., 2020; Sarmiento et al., 2018; Wander & Bollero, 1999), se podría indicar que la historia de manejo del suelo definida por la realización de siembra directa mantendría una mejor calidad suelo respecto del manejo que utiliza laboreo convencional. Los tratamientos que incorporan pasturas o gramíneas a la rotación presentan mejores resultados en la conservación de calidad del suelo.

5.5 EFECTO DE LA CALIDAD DEL SUELO SOBRE SU PRODUCTIVIDAD

Para cuantificar si las propiedades relevantes identificadas en cada CP afectaron el rendimiento, se realizó una regresión simple entre el rendimiento de los cultivos y cada uno de los tres CP. Los resultados indican que las propiedades identificadas en CP1 presentan la mayor relación con el rendimiento del doble cultivo (R^2 0,51), en tanto las propiedades identificadas en los demás componentes se relacionaron en menor medida con el rendimiento obtenido, CP3 con un R^2 0,21 y CP2 con el menor valor R^2 0,10.

Tabla 10

Coeficientes de regresión entre rendimiento de Trigo (kg ha^{-1}) y componentes principales y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp Mallows	VIF
Const.	4893,77	312,19	4206,65	5580,9	15,68	<0,0001		
CP 1	169,23	105,9	-63,86	402,32	1,6	0,0384	4,55	1
CP 2	-16,94	127,3	-297,12	263,25	-0,13	0,8966	2,02	1
CP 3	-77,36	147,82	-402,7	247,99	-0,52	0,6111	2,27	1

Tabla 11

Coeficientes de regresión entre rendimiento de Soja (kg ha^{-1}) y componentes principales y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp Mallows	VIF
Const.	2099,61	142,87	1785,16	2414,05	14,7	<0,0001		
CP1	22,52	48,46	-84,14	129,19	0,46	0,6512	2,22	1
CP 2	-112,08	58,26	-240,3	16,14	-1,92	0,0806	5,7	1
CP 3	59,84	67,65	-89,04	208,73	0,88	0,3953	2,78	1

Tabla 12

Coeficientes de regresión entre rendimiento de Trigo/Soja (kg ha^{-1}) y componentes principales y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp Mallows	V IF
Const.	6993,38	353,03	6216,37	7770,39	19,81	<0,001		
CP 1	191,75	119,75	-71,82	455,33	1,6	0,376	4,56	1
CP 2	-129,02	143,95	-445,86	187,82	-0,9	0,3893	2,8	1
CP 3	-17,51	167,15	-385,42	350,39	-0,1	0,9184	2,01	1

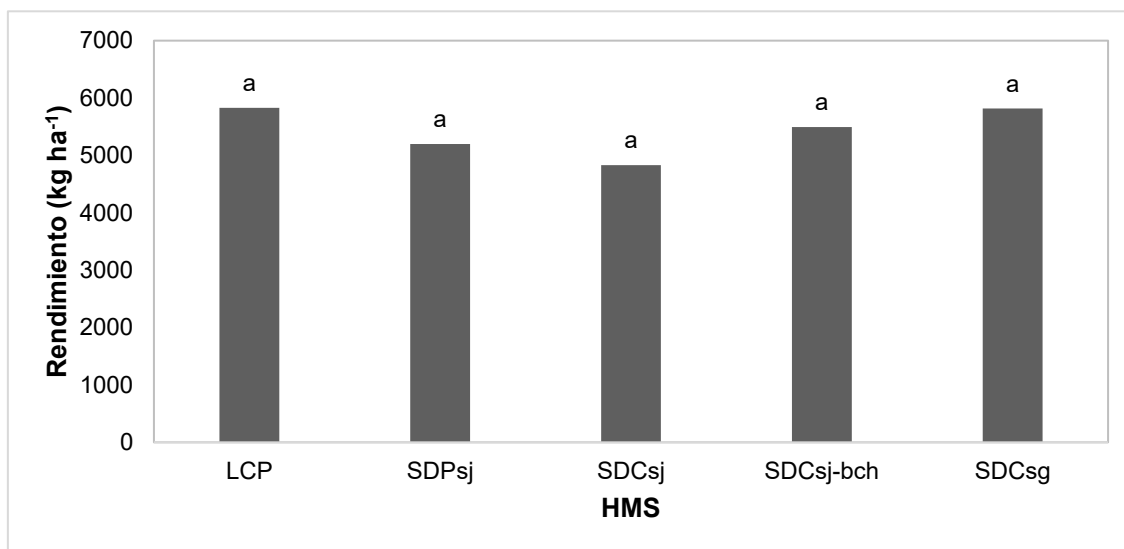
Existió un efecto lineal positivo del CP1 sobre el rendimiento de trigo (COS0-5 y EA>2 mm). La relación positiva entre el CP1 (asociado a COS y agregados >2mm) y el rendimiento de trigo sugiere que una mejor fertilidad y estructura del suelo favorecen el desarrollo y el rendimiento de este cereal en las condiciones del estudio (tabla 10). En tanto, el CP2 se relacionó de manera negativa con el rendimiento de soja (asociado principalmente a BT, pH, Acidez e Infiltración) (tabla 11). La relación negativa entre el CP2 y el rendimiento de soja podría interpretarse de varias maneras. Considerando el contexto climático del año con precipitaciones por debajo de la media histórica durante el período crítico de la soja, es posible que el CP2 estuviera correlacionado con otras variables no medidas que afectaron negativamente a la soja. Además, podría haber una interacción compleja donde una alta infiltración en ciertas condiciones de suelo se asocia con otros factores limitantes para la soja.

Los resultados sugieren un efecto relevante positivo de la fertilidad (COS, asociado a los EA>2 mm) sobre el rendimiento de trigo y negativo de la infiltración de agua en el suelo, pH y acidez sobre el de soja. Al considerar el doble cultivo anual, no hubo efecto de los CP, por lo que se compensaron los efectos que se manifestaron individualmente en cada cultivo (tabla 12).

No obstante, el ANAVA para rendimiento de trigo, soja y el doble cultivo trigo/soja fue no significativa (Figuras 5, 6 y 7)

Figura 5

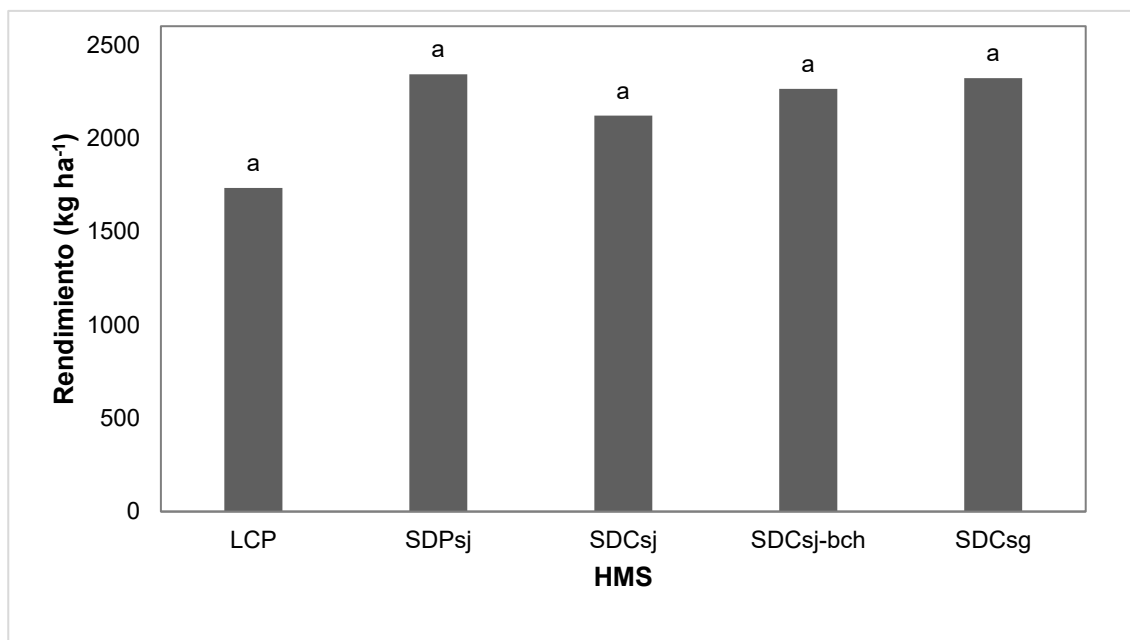
Rendimiento de trigo (kg ha^{-1}) según historia de manejo del suelo.



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

Figura 6

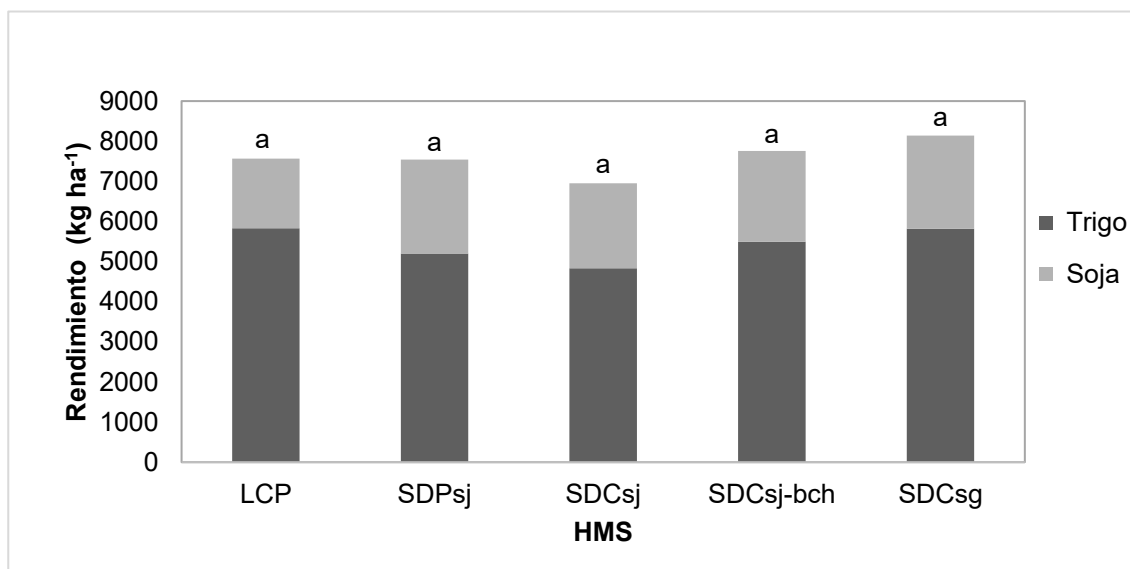
Rendimiento de soja (kg ha⁻¹) según historia de manejo del suelo.



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

Figura 7

Rendimiento medio acumulado del doble cultivo trigo/soja (kg ha⁻¹) según historia de manejo del suelo.



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

En la figura No. 7 Rendimiento medio acumulado del doble cultivo trigo/soja (kg ha^{-1}) según historia de manejo del suelo se puede observar que los rendimientos no se diferenciaron significativamente en función de la HMS.

Las pérdidas en calidad del suelo identificadas atribuibles a las HMS no redujeron el rendimiento de trigo, soja, ni la secuencia trigo/soja, por lo que la hipótesis planteada a priori no se cumplió. No obstante, los resultados sugieren un efecto relevante positivo de la fertilidad (COS, asociado a los $\text{EA} > 2 \text{ mm}$) sobre el rendimiento de trigo y un efecto negativo de la infiltración de agua en el suelo sobre el rendimiento de soja, en tanto que para la secuencia se compensaron los efectos. Esta aparente contradicción entre el resultado obtenido analizando el efecto de la calidad del suelo estimado por CP y el efecto de la HMS sobre el rendimiento analizado por ANAVA se atribuye al relativamente alto coeficiente de variación del rendimiento, lo cual no permitió cuantificar como significativo las variaciones de rendimiento.

En trigo, el menor rendimiento se registró en la HMS SDCsj (4.831 kg ha^{-1}) diferenciándose por 999 kg ha^{-1} del mayor resultado obtenido en LCP (5.830 kg ha^{-1}). En soja las diferencias en rendimiento fueron de 609 kg ha^{-1} entre la mejor y peor HMS, siendo el más bajo LCP con 1.733 kg ha^{-1} y el más alto SDPsj con 2.342 kg ha^{-1} . Para la secuencia trigo/soja el menor rendimiento se obtuvo en SDCsj y el mayor en SDCsg (6.952 kg ha^{-1} y 8.140 kg ha^{-1} respectivamente) con una diferencia de 1.188 kg ha^{-1} entre ambas HMS. Las diferencias en rendimiento entre las HMS cuantitativamente fueron importantes, pero no fueron significativas.

La HMS definida por la realización de laboreo convencional y rotación con pasturas (LCP) generó diferencias en estabilidad de agregados, resistencia a la penetración y además una menor estratificación de nutrientes. Las HMS que incluyen el doble cultivo anual con soja (SDPsj y SDCsj) se separaron de las demás HMS por la variable infiltración. La HMS definidas por labranza y la siembra directa con soja de primera se diferenciaron de las SDC con doble cultivo anual por la variable estabilidad de agregados.

En el análisis de CP, cada parcela es un dato, por lo que permite cuantificar las relaciones sitio-específicas entre la calidad del suelo y el rendimiento. Análisis multivariado muestra que la HMS afectó las propiedades del suelo que pueden definir la calidad de este. Se identificó un efecto relevante positivo de la fertilidad (COS, asociado a los $\text{EA} > 2 \text{ mm}$) sobre el rendimiento de trigo y un efecto negativo de la acidez e infiltración de agua en el suelo sobre el rendimiento de soja. Al analizar el doble cultivo trigo/soja, se compensaron los efectos.

No obstante, si bien utilizando el ANAVA se identificaron efectos significativos de las HMS sobre Infiltración, Estabilidad de Agregados, Tamaño ponderado, COS 0-5 cm, P 0-5 cm, P 5-20 cm, K 0-5 cm, Mg 0-5 cm, BT 0-5 cm, pH KCl 0-5, pH H_2O 0-5 cm, Ac. Tit. 0-5 cm, no redujeron significativamente el rendimiento de trigo, soja, ni el rendimiento acumulado de la secuencia trigo/soja. La diferencia entre ambos análisis sugiere que el efecto de la calidad del suelo se manifiesta sobre el rendimiento, pero que la variabilidad no pudo atribuirse a un manejo específico del suelo.

La interacción entre HMS y los niveles de fertilización analizados no fue significativa, según los resultados de este trabajo la fertilización no corrige efectos negativos sobre el rendimiento de trigo, soja y el acumulado de la secuencia trigo/soja.

Por tanto, eliminar la labranza e implementar una de rotación de cultivos anuales sería una alternativa capaz de mantener la calidad del suelo tal como se plantea en la hipótesis del trabajo. Los parámetros para destacar serían infiltración y estabilidad de agregados. El uso de siembra directa permitiría mantener la calidad del suelo. En el mismo sentido estudios realizados por García-Préchac et al. (2004), Siri-Prieto y Ernst (2010), Berón y Muzio (2013), mencionan que la implementación de sistemas sin laboreo, con cultivos anuales que rotan con pasturas perennes mejoran los indicadores de calidad del suelo y reducen la erosión; aunque esto no siempre se asocia a una mejora en el rendimiento de los cultivos.

6 CONCLUSIONES

- Desarrollar un sistema de cultivo continuo bajo siembra directa y con alta frecuencia de soja de primera en la rotación genera un deterioro en las propiedades físicas del suelo, afectando negativamente la resistencia a la penetración.
Este sistema de cultivo también afecta de forma negativa la infiltración de agua del suelo al igual que realizar laboreo convencional en rotación con pasturas.
- Realizar secuencias de cultivo continuo bajo siembra directa con predominancia de sorgo mantiene altos niveles de infiltración de agua del suelo en comparación a las demás HMS evaluadas.
- Las rotaciones que incorporan pasturas bajo siembra directa mantienen un contenido más alto de COS en superficie, en tanto que realizar laboreo convencional o siembra directa con predominancia de soja de primera en la secuencia resultaría en un menor nivel de COS deteriorando la fertilidad del suelo.
- El rendimiento de los cultivos trigo, soja y de la secuencia trigo/soja no fue afectado de forma significativa por ninguno de los tratamientos de HMS evaluados. No obstante, el análisis multivariado permitió cuantificar el impacto positivo de mantener el carbono del suelo y agregados estables mayores a 2mm sobre el rendimiento de trigo y el de pH, Acidez e infiltración de agua en el suelo sobre el de soja.
- La HMS definida por la realización de SD mantendría una mejor calidad suelo respecto de los sistemas que utilizan laboreo convencional. Los tratamientos que incorporan pasturas o gramíneas a la rotación presentan mejores resultados en la conservación de calidad del suelo.
- La interacción entre HMS y fertilización no fue significativa. Según los resultados del presente trabajo la fertilización no corrige efectos negativos sobre el rendimiento.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol. 1. Clasificación de suelos del Uruguay*. MAP.
- Andrade, J., Poggio, S., Ermácora, M., & Satorre, E. (2015). Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy*, 67, 37-51.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030115000362>
- Andrade, J., & Satorre, E. (2015). Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research*, 177, 137-147.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429015000908>
- Andrews, S., Karlen, D., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture. Ecosystems and Enviroments*, 90(1), 24-45.
- Aparicio, V., & Costa, J. (2007). Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*, 96(1-2), 155-165.
- Arbeletche, P. (2020). El agronegocio en Uruguay: Su evolución y estrategias cambiantes en el siglo XXI. *Rivar*, 7(19), 113-114.
<https://dx.doi.org/10.35588/rivar.v7i19.4355>
- Arbeletche, P., & Gutiérrez, G. (2010). Crecimiento de la agricultura en Uruguay: Exclusión social o integración económica en redes. *Pampa*, 6, 113-138.
https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-02082010000100006&lng=es&tlng=es.
- Baráibar, S., Freiría, D., & Rizzo, G. (2014). *La calidad del suelo como determinante de la brecha de producción de soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Barbazán, M., Bautes, C., Beux, L., Bordoli, J. M., Cano, J., Ernst, O., García, A., García, F., & Quincke, A. (2011). Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: Rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 93-99. <https://doi.org/10.31285/AGRO.15.597>
- Berger, A. (2023). El trigo marcó un nuevo récord: Qué factores influyeron en este avance y cómo consolidar altos rendimientos. *Revista INIA*, (73), 27-30.
- Berger, A., Gaso, D., Calistro, R., & Morales, X. (2018). Limitantes ambientales y potencial de rendimiento de trigo en Uruguay. En S. German, M. Quincke, D. Vázquez, M. Castro, S. Pereyra, P. Silva, & A. García (Eds.), *Seminario Internacional "1914-2014: Un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela"* (pp. 112-123). INIA.
- Berón, M., & Muzio, M. (2013). *Rendimiento del cultivo de soja de segunda según historia de chacra* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.

- Bidegain, A. (2012). *Cuantificación de la repuesta en rendimiento en grano en el cultivo de soja en función de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, contenido de agua inicial y distribución de precipitaciones durante el ciclo del cultivo* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Bocuti, D., Amorim, R., DI Raimo, L., Weber, O., Azevedo, E., & Jardini, D. (2022). Índice de qualidade física e físico-hídrica de solos cultivados com soja. En M. Castiglioni, P. Fernández, & S. Vangeli (Coords.), *XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: Suelos saludables, sustento de la sociedad y el ambiente* (pp. 1022-1027). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Calviño, P. A., Sadras, V., & Andrade, F. H. (2003). Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. *Field Crops Research*, 83(1), 67-77.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429003000625>
- Campitelli, P., Oaki, A., Gudelj, O., Rubenacker, A., & Sereno, R. (2010). Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 28(2), 223-231. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672010000200010&lng=es&tlng=es
- Canosa, G., & Prieto, C. (2013). *Estudio del efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., & Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo*, 25(2), 173-178.
- Cassman, K., Dobermann, A., Walters, D., & Yang, H. (2003). Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 315-358.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122858>
- Caviglia, O., & Andrade, F. (2010). Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*, 3(1), 1-8.
https://www.researchgate.net/profile/Octavio-Caviglia-2/publication/228489685_Sustainable_intensification_of_agriculture_in_the_Argentinean_pampas_Capture_and_use_efficiency_of_environmental_resources/links/563b44e008ae337ef2999f6d/Sustainable-intensification-of-agriculture-in-the-Argentinean-pampas-Capture-and-use-efficiency-of-environmental-resources.pdf
- Caviglia, O., Sadras, V., & Andrade, F. (2004). Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas: I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat and soybean. *Field Crops Research*, 87(2-3), 117-129. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03784290030002260>
- Centurión, H., & Chinazzo, M. V. (2012). *Rendimiento alcanzable en trigo en función de los años de agricultura: Relevamiento de chacras*. [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.

- Christen, O., Sieling, K., & Hanus, H. (1992). The effect of different preceding crops on the development, growth, and yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 1(1), 21-28.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030114800580>
- Contatore, A., & Ernst, O. (2024). Valorando la rotación y la diversidad de cultivos en producto y resultado económico. *Cangüé*, (47), 15-21.
- Del Pino, A. (2012). *Acidez de suelos y encalado* [Webinar]. Facultad de Agronomía.
<https://www.yumpu.com/es/document/read/19654250/acidez-encaladopdf-facultad-de-agronomia>
- Díaz Roselló, R. M. (1992). Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas*, (1), 103-110.
- Díaz-Zorita, M. & Duarte, G. A. (Coords.). (2004). *Manual práctico para la producción de soja*. Hemisferio Sur.
- Durán, A. (1997). Clasificación Hidrológica de los Suelos del Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 1(1), 15-29.
- Ernst, O. (2018). *Brecha de rendimiento de trigo: Pérdida de calidad de suelo como factor determinante* [Disertación doctoral]. Universidad de la República.
- Ernst, O., Alzueta, M. E., Ernst, F., Romero, F., Barriola, I., Bagnato, C., Álvarez, S., & Piñeiro, G. (2021). Cuantificación de los cambios recientes en el uso del suelo en el litoral Oeste Uruguayo. *Cangüé*, (44), 26-32.
https://cangue.eemac.edu.uy/index.php?download_pdf=1&pdf_id=96
- Ernst, O., & Bianculli, M. (2013). Rendimiento, fenología y uso de agua en intersembra trigo-soja con relación a cultivos secuenciales y cultivo de cobertura-soja. *Agrociencia Uruguay*, 17(2), 33-44.
- Ernst, O., Dogliotti, S., Cadenazzi, M., & Kemanian, A., (2018). Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield. *Field Crops Research*, 217, 180-187.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429017307049>
- Ernst, O., Ernst, F., Bajsa, N., Barreto, P., Fernández, G., Fererira, A., Franco, J., García, I., Mazzilli, S., Pérez, M., Piñeiro, G., Rizzo, G., & Salvo, L. (2024). *Informe final publicable de proyecto: Evaluación y rediseño de sistemas agrícolas en base a indicadores de sostenibilidad*. ANII.
https://redi.anii.org.uy/jspui/bitstream/20.500.12381/3606/2/Informe_final_publicable_FSA_1_2018_1_151930.pdf
- Ernst, O., Kemanian, A., Mazzilli, S., Siri-Prieto, G., & Dogliotti, S. (2020). The dos and don'ts of no-till continuous cropping: Evidence from wheat yield and nitrogen use efficiency. *Field Crops Research*, 257(186), Artículo e107934
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107934>
- Ernst, O., Mazzilli, S., & Siri-Prieto, G. (2009). Manejo de la reserva de agua de suelo para situaciones de estrés hídrico. En E. Hoffman, A. Ribeiro, O. Ernst, & O. García (Orgs.), *Primer Simposio Nacional de Agricultura* (pp. 33-48). Universidad de la República.

- Ernst, O., & Siri-Prieto, G. (2009). Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage Research*, 105(2), 260-268. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198709001469>
- Ernst, O., & Siri-Prieto, G. (2011). La agricultura en Uruguay: Su trayectoria y consecuencias. En E. Hoffman, A. Ribeiro, O. Ernst, & O. García (Orgs.), *// Simposio Nacional de Agricultura de Secano* (pp. 149-163). Universidad de la República.
- Farias, J. R., Nepomuceno, A. L., & Neumaier, N. (2007). Ecofisiología da soja. *Circular Técnica*, (48), 1-9.
- Fassio, A., Pérez, O., Ibáñez, W., Rabaza, C., Vergara, G., Sawchik, J., Schusselin, M., & Silva, L. (2016). Soja: Rendimiento con y sin riego a diferentes poblaciones de siembra. *Revista INIA*, (47), 22-26. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6396/1/Rev.INIA-2016-No47-p.22-26.pdf>
- Fernández, E., & Andregnette, B. (2004). Sostenibilidad económica de los sistemas mixtos y de agricultura continua. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Sustentabilidad de la intensificación agrícola en el Uruguay* (pp. 39-43).
- Fischer, R. A., Byerlee, D., & Edmeades, G. (2014). *Crop yields and global food security: Will yield increase continue to feed the world?* ACIAR. https://www.researchgate.net/publication/282713287_Crop_yields_and_global_food_security_will_yield_increase_continue_to_feed_the_world_ACIAR_Monograph_No_158_Australian_Centre_for_International_Agricultural_Research
- Foley, J., Ramankutty, N., Brauman, K., Cassidy, E., Gerber, J., Johnston, M., Mueller, N., O'Connell, C., Ray, D., West, P., Balzer, C., Bennett, E., Carpenter, S., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., & Zaks, D. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478, 337-342. <http://dx.doi.org/10.1038/nature10452>
- Foster, P., & Rovegno, F. (2015). *Efectos de diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas fisiológicas de soja sobre el rendimiento* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- García, F. O., Fontanetto, H., & Vivas, H. (2001). La fertilización del doble cultivo trigo/soja. *INTA EEA Rafaela, Publicación Miscelánea*, (94). <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2001/06/FertTrigoSojaAbr2001.doc>
- García Lamothe, A. (2011). Recomendaciones de manejo de la fertilización para soja. *Revista INIA*, (26), 53-55.
- García Lamothe, A., & Quincke, A. (2012). *El potasio en la producción de cultivos de invierno*. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada Cultivos de Invierno* (pp. 9-14). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/650/1/112761020512113354.pdf>
- García-Préchac, F. (2003). Propiedades físicas y erosión en los trabajos de larga duración de la Estanzuela. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Simposio 40 Años de Rotaciones Agrícolas-Ganaderas*. (pp. 19-23).

- García-Préchac, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G., & Terra, J. A. (2004). Integrating no-till into crop–pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.002>
- Garnett, T., & Godfray, C. (2012). *Sustainable intensification in agriculture: Navigating a course through competing food system priorities*. FCRN; Martin Oxford School. https://tabledebates.org/sites/default/files/2020-10/SI_report_final.pdf
- Gerster, G., & Novello, O. (2003). Fertilización con Nitrógeno, Fósforo, Azufre y Micronutrientes en la Secuencia Trigo-Soja. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (18), 6-8.
- Giménez, L. (2014). Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia (Uruguay)*, 18(1), 53-64.
- Giménez, L., & García Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano en dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 100-108.
- Hoffman, E. (2013). Criterios y estrategias de fertilización que apunten a asegurar el suministro de fósforo en cultivos de soja de segunda. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, (11), 2-7.
- Hoffman, E., Fassana, C. N., & Perdomo, C. (2013). Manejo de nitrógeno en cereales de invierno: ¿Agregando más nos estamos quedando cortos? En A. Ribeiro & H. Silva (Eds.), *III Simposio Nacional de Agricultura* (pp. 51-62). Universidad de la República.
- Hoffman, E., & Perdomo, C. (2011). Manejo del nitrógeno en cereales de invierno, en un escenario de cambios del sistema agrícola uruguayo. En A. Ribeiro & H. Silva (Eds.), *II Simposio Nacional de Agricultura* (pp. 45-60). Universidad de la República.
- Hu, M., & Wiatrak, P. (2012). Effect of planting date on soybean growth, yield, and grain quality: Review. *Agronomy Journal*, 104(3), 785-790. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0382>
- Irmak, A., Jones, J., Batchelor, W., & Paz, J. (2001). Estimating spatially variable soil properties for application of crop models in precision farming. *Transactions of the ASAE*, 44(5), 1343-1353. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.6424>
- Kantolic, A. (2003). Bases funcionales de la determinación del rendimiento y manejo del cultivo de soja. En E. H. Satorre (Ed.), *El libro de la soja* (pp. 29-38). SEMA; CREA; AAPRESID.
- Kravchenko, A. N., & Bullock, D.G. (2000). Spatial variability. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1), 75-83. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.92175x>
- Lafluf, L., Leguisamo, N., & Muiños, F. (2023). *Efectos de la fecha de siembra sobre el rendimiento de soja en condiciones de riego y secano* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.

- Lobell, D. B., Cassaman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179-204. <https://doi.org/10.1146/annurev.envIRON.041008.093740>
- Martínez, B., Taullard, F., & Vargas, J. (2022). *Efecto del sistema de cultivo sobre propiedades físicas del suelo y su relación con el rendimiento de maíz y soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Martino, D. (2001). Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. En R. Díaz Rossello (Coord.), *Siembra directa en el cono Sur* (pp. 225-257). PROCISUR.
- Mazzilli, S., & Ernst, O. (2007). Modelos de simulación: Sus posibilidades como herramienta para la planificación agrícola y la toma de decisiones. *Cangüé*, (29), 60-63.
- McEwen, J., Darby, R. J., Hewitt, M. V., & Yeoman, D. P. (1989). Effects of field beans, fallow, lupins, oats, oilseed rape, peas, ryegrass, sunflowers and wheat on nitrogen residues in the soil and on the growth of a subsequent wheat crop. *The Journal of Agricultural Science*, 115(2), 209-219. <https://doi.org/10.1017/S0021859600075146>
- Morón, A. (2005). Informe de resultados de la red de ensayos de fertilización de soja 2002-2003. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada Técnica Cultivos de Verano* (pp. 53-55). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/439/1/111219230807174556.pdf>
- Núñez, A. & Morón, A. (2013). El rol de las reservas de potasio en los suelos agrícolas del Uruguay. En M. Barbazán & M. Ferrando (Eds.), *Simposio: Potasio en sistemas agrícolas de Uruguay* (pp. 11-15). Universidad de la República.
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias (2024). *Anuario estadístico 2024*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2024/Anuario2024/%20ANUARIO2024.pdf>
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4. <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>
- Otaño, C. & Zarucki, I. (2010). *Impacto de distintos niveles de fertilidad y atributos del terreno sobre la variabilidad de rendimiento del cultivo de soja a escala de chacra* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Otero, A., Gaso D., Capurro, M. C., Berger, A., Pérez, O., García, C., Terra, J. & Sawchik, J. (2014). Construyendo los componentes de un sistema productivo con la inclusión del riego. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Riego en cultivos y pasturas: 3er Seminario internacional* (pp. 43-52). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11771/1/Riego-en-cultivos-y-pasturas-2014.-Otero-A.-et-al.pdf>
- Paparcone, S. & Silveira, F. (2022). *Efecto de la fecha de siembra y disponibilidad hídrica sobre el rendimiento del cultivo de soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.

- Pierce, F. J., & Rice, C. W. (1988). Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use. En W. L. Hargrove (Ed.), *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen* (pp. 21-42). American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America.
<https://doi.org/10.2134/asaspecpub51.c3>
- Rava, C., Borges, M., Ferraro, B., Lanfranco, B., & Fernández, E. (2023). El complejo oleaginoso en Uruguay en la zafra 2022/2023 y sus perspectivas. *Revista INIA*, (75), 45-50. https://www.researchgate.net/publication/376717730_El_complejo_oleaginoso_en_Uruguay_en_la_zafra_20222023_y_sus_perspectivas
- Resolución No. 1.564/013: *Manual de medidas exigibles para cultivos: Instructivo para la elaboración y presentación de Planes de Uso y Manejo Responsable de Suelos*. (2013). MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/institucional/normativa/resolucion-n-1564013-mgaprenare-18032013-manual-medidas-exigibles-para>
- Rizzo, G. (2018). *Estimación y análisis espaciotemporal del rendimiento y las brechas de rendimiento de soja en Uruguay* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.
- Salvagiotti, F. (2009). Manejo de soja de alta producción. *Para Mejorar la Producción*, (42), 57- 62. https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Salvagiotti/publication/265804710_Produccion_de_soja_y_uso_eficiente_de_lo_s_recursos/links/55e1324208aecb1a7cc62dc9/Produccion-de-soja-y-uso-eficiente-de-los-recursos.pdf
- Salvagiotti, F., Enrico, J. M., Bodrero, M., & Bacigaluppo, S. (2010). Producción de soja y uso eficiente de los recursos. *Para mejorar la producción*, (45), 151-154. https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Salvagiotti/publication/265804710_Produccion_de_soja_y_uso_eficiente_de_lo_s_recursos/links/55e1324208aeb1a7cc62dc9/Produccion-de-soja-y-uso-eficiente-de-los-recursos.pdf
- Salvagiotti, F., Gerster, G., Bacigaluppo, S., Castellarín, J., Galarza, C., Gonzáles, N., Gudeltj, V., Novello, O., Pedrol, H., & Vallone, P. (2004). Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo*, 22(2), 92-101.
- Sarmiento, E., Fandiño, S., & Gómez, L. (2018). Índices de calidad del suelo: Una revisión sistemática. *Ecosistemas*, 27(3), 130-139.
- Sawchik, J. (2001). Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo – pastura bajo laboreo convencional y siembra directa. En R. Díaz Rossello (Coord.), *Siembra directa en el Cono Sur* (pp. 323-345). PROCISUR.
- Sawchik, J. (2004). La intensificación agrícola y el manejo del agua en los sistemas. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Sustentabilidad de la Intensificación Agrícola en el Uruguay* (pp. 11-17).
- Sawchik, J., & Ceretta, S. (2005). Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada técnica de cultivos de verano* (pp. 41-51).

- Siri-Prieto, G., & Ernst, O. (2009). Cambios en el contenido de carbono y nitrógeno del suelo: ¿Hacia dónde va el sistema? En E. Hoffman, A. Ribeiro, O. Ernst & O. García (Orgs.), *Primer Simposio Nacional de Agricultura* (pp. 111-123). Universidad de la República.
- Siri-Prieto, G., & Ernst, O. (2010). Manejo del suelo y rotación con pasturas: Efecto sobre la calidad del suelo, el rendimiento de los cultivos y el uso de insumos. *Informaciones Agronómicas*, (45), 22-26.
- Terra, J. A., Melo, D., & Sawchik, J. (2010). Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimientos de cultivos agrícolas en Uruguay. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Taller Internacional Sociedad Uruguay Ciencia Suelo* (1-11).
- Van Ittersum, M. K., & Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combination. *Field Crops Research*, 52(3), 197-208. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3)
- Viglizzo, E. F., Carreño, L., Volante, J. & Mosciaro, M. J. (2011). Valuación de bienes y servicios ecosistémicos: ¿Verdad objetiva o cuento de la buena pipa? En P. Laterra, E. Jobbagy & J. M. Paruelo (Eds.), *Valoración de servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (pp. 17-36). INTA.
- Vivas, H., Albrecht, R., Martins, L. & Hotián J. L. (2012). Alternativas de fertilización del doble cultivo trigo/soja: Efectos sobre la productividad y algunas propiedades del suelo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, (7), 11-15.
- Wander, M. M., & Bollero, G. A. (1999). Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4), 961-971.
- Wilson, M. G., Quintero, C. E., Boschetti, N. G., Benavidez, R. A., & Mancuso, W. A. (2000). Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 20(1), 23-30.
- Zeleeke, K., & Nendel, C. (2024). Yield response and water productivity of soybean (*Glycine max* L.) to deficit irrigation and sowing time in south-eastern Australia. *Agricultural Water Management*, 296, Artículo e108815 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108815>