

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DE LA PROFUNDIDAD Y LA CAPACIDAD DE ALMACENAJE DE
AGUA DEL SUELO EN EL RENDIMIENTO DE SOJA**

por

Franky Yoher BENÍTEZ GIORDANO

**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/a: Ing. Agr. Dr. Oswaldo Ernst
Nombre completo y firma

Tribunal: Ing. Agr. MSc. Santiago Álvarez
Nombre completo y firma

Ing. Agr. Mauricio Bustamante
Nombre completo y firma

Fecha: 8 de abril de 2025

Estudiante: Franky Yoher Benítez Giordano
Nombre completo y firma

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo a lo largo de la carrera.

A los amigos que me dejó el camino recorrido.

Tabla de contenidos

Página de aprobación	3
Agradecimientos	4
Lista de tablas y figura.....	7
Resumen.....	8
Abstract	9
1 Introducción.....	10
2 Revisión bibliográfica	11
2.1 Componentes del rendimiento	11
2.2 Período crítico en la determinación del rendimiento	11
2.3 Factores ambientales que regulan la dinámica del desarrollo	11
2.4 Rendimiento Potencial	12
2.5 Brecha de rendimiento	12
2.6 Capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD)	13
2.6.1 Capacidad de campo	13
2.6.2 Punto de marchitez permanente.....	13
2.7 Suelos de Uruguay	13
2.8 Antecedentes sobre suelos y disponibilidad hídrica	14
3 Materiales y métodos	17
3.1 Estrategia de investigación.....	17
3.2 Conformación de la base de datos	19
3.3 Análisis estadístico.....	19
3.3.1 Regresión lineal múltiple.....	19
3.3.2 Regresión lineal múltiple partiendo los datos en Terciles.....	20
3.3.2.1 mm recibidos durante el período crítico de definición del rendimiento (R4-R6).	20
3.3.2.2 mm de agua recibidos durante el ciclo del cultivo (VE-R8).	20

3.3.2.3	Sitios regados y no regados.	21
4	Resultados.....	22
4.1	Caracterización de la base de datos	22
4.2	Variables de suelo y ambiente determinantes del rendimiento de soja... 23	
4.3	Efecto de las variables seleccionadas bajo distintos escenarios de aporte de agua	28
4.3.1	Efecto de la profundidad del suelo bajo diferentes niveles de oferta hídrica recibida en el período crítico de definición del rendimiento.	28
4.3.2	Efecto de la profundidad del suelo bajo distintos niveles de oferta hídrica recibida a lo largo del ciclo del cultivo (período VE-R8).....	30
4.3.3	Efecto de la profundidad del suelo contrastando sitios con y sin riego suplementario.....	32
5	Discusión	34
6	Conclusiones.....	36
7	Bibliografía.....	38

Lista de tablas y figura

Tabla 1 Variables utilizadas, con sus valores medios, mínimos, máximos y coeficiente de variación	22
Tabla 2 Lista con los diez mejores modelos, las variables que los conformaron y su R^2 ajustado	24
Tabla 3 Coeficientes de regresión y estadísticos asociados al modelo seleccionado ...	25
Tabla 4 Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables del modelo seleccionado y su significancia.....	26
Tabla 5 Coeficientes de regresión y estadísticos asociados al modelo sin las variables correlacionadas	27
Tabla 6 Medias y rangos de los terciles correspondientes al período crítico	28
Tabla 7 Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a los niveles de oferta hídrica del período crítico	29
Tabla 8 Medias y rangos de los terciles del nivel de oferta hídrica durante el ciclo	30
Tabla 9 Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a los niveles de oferta hídrica en el ciclo.....	31
Tabla 10 Medias y rangos vinculados a los sitios regados y no regados	32
Tabla 11 Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a los sitios sin riego y con riego	33
Figura 1 Mapa georreferenciado con la ubicación de los sitios	17

Resumen

En nuestro país la mayoría del área agrícola se encuentra en condiciones de secano, teniendo en cuenta que las precipitaciones poseen una gran variación interanual resulta muy importante entender cómo actúan las diferentes condiciones del ambiente en la generación del rendimiento, para así identificar maneras de mitigar los riesgos asociados a una posible oferta hídrica baja, principalmente en cultivos de verano cuando la evapotranspiración es mayor y hay más riesgo de tener déficit.

En este trabajo se presentan las siguientes hipótesis: i) la capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD), resulta relevante para mitigar efectos del déficit de precipitaciones, en especial, durante el período crítico de definición del componente numérico más importante del rendimiento. ii) la posibilidad de mitigar el efecto depende de la profundidad del suelo.

Se realizó una recolección de datos en chacras agrícolas ubicadas en la cuenca agrícola más importante del país, donde se midió el rendimiento potencial logrado, sin influencia de enfermedades ni plagas, así como también la oferta del ambiente en cuanto a agua, radiación y temperatura en el ciclo y en diferentes etapas de éste. Por último, se midió también la profundidad del suelo y se caracterizaron y analizaron los diferentes horizontes para estimar el valor de la capacidad de almacenaje de agua disponible de cada sitio.

El análisis cuantitativo de los datos se realizó con el software estadístico infostat/E, realizando regresiones lineales múltiples con el objetivo de poder cuantificar el efecto de ésta y de la profundidad del suelo en el rendimiento del cultivo de Soja (*Glicine max*).

Se analizaron los datos de manera completa y también partiendo la base de datos según diferentes características de oferta hídrica en el período crítico para la generación del rendimiento (R4-R6) y durante todo el ciclo del cultivo. También se realizó el análisis de chacras con riego suplementario y bajo condiciones de secano.

Se comprobó que existe respuesta a la CAAD de 21 kg por mm. También se encontró respuesta a la profundidad del suelo, siendo mayor cuando se analizaron los sitios de secano, donde obtuvo un valor de 10 kg por cm de aumento.

Cuando se analizó la base de datos generando particiones según la oferta hídrica recibida en el ciclo, se encontró respuesta para condiciones de oferta media (entre 421 y 450mm), siendo el efecto 10 kg por cm de aumento en la profundidad del suelo.

En el período crítico la respuesta se observó solo cuando la oferta hídrica fue ≤ 90 mm, siendo 8 kg el efecto por cm de aumento en la profundidad.

Se demostró que la profundidad del suelo tiene efecto sobre el rendimiento que puede variar según la oferta ambiental, lo que es un hecho es que, bajo condiciones desfavorables, sin ser extremas, la profundidad del suelo ofrece un nivel de seguridad extra ante la toma de decisiones, como una forma de mitigar los riesgos asociados a la oferta hídrica.

Palabras clave: agricultura de secano, profundidad del suelo, déficit hídrico, capacidad de almacenaje de agua disponible

Abstract

In our country, most of the agricultural area is rainfed. Given the significant interannual variability in precipitation, it is crucial to understand how different environmental conditions influence yield generation. This knowledge helps identify ways to mitigate the risks associated with a potential water deficit, particularly in summer crops, when evapotranspiration is higher and the risk of drought is greater.

This study presents the following hypotheses: i) The soil's available water storage capacity (CAAD) is relevant for mitigating the effects of precipitation deficits, especially during the critical period when the most important numerical component of yield is defined.

ii) The possibility of mitigating this effect depends on soil depth.

Data collection was carried out on agricultural fields located in the country's most important agricultural basin. The potential yield achieved—without the influence of diseases or pests—was measured, along with environmental water supply, radiation, and temperature throughout the crop cycle and at different growth stages. Additionally, soil depth was measured, and different horizons were characterized and analyzed to estimate the available water storage capacity at each site.

A quantitative analysis of the data was performed using the statistical software Infostat/E, applying multiple linear regressions to quantify the effects of CAAD and soil depth on soybean (*Glycine max*) yield.

The data were analyzed comprehensively and also segmented based on different water supply conditions during the critical yield-defining period (R4-R6) and throughout the crop cycle. An analysis was also conducted on fields with supplemental irrigation and under rainfed conditions.

The results showed a yield response to CAAD of 21 kg per mm. A response to soil depth was also observed, with a greater effect under rainfed conditions, where the increase was 10 kg per cm of additional soil depth.

When the dataset was segmented based on total water supply during the crop cycle, a yield response was found under medium water availability conditions (421–450 mm), with an effect of 10 kg per cm of increased soil depth.

During the critical period, a response was observed only when water supply was ≤ 90 mm, with an effect of 8 kg per cm of increased soil depth.

It was demonstrated that soil depth influences yield, with variations depending on environmental water availability. However, under unfavorable—though not extreme—conditions, soil depth provides an additional level of security for decision-making, serving as a way to mitigate the risks associated with water availability.

Keywords: rainfed agriculture, soil depth, water deficit, available water storage capacity

1 Introducción

Hasta la zafra 2002/2003 el cultivo de soja tuvo poca relevancia en la agricultura uruguaya, superando apenas en algunas zafras las cincuenta mil hectáreas sembradas. En la primera década del siglo XXI comienza la expansión del cultivo que pasó de tener doce mil hectáreas en la zafra 2000/01, a más de un millón de hectáreas en la zafra 2010/11 convirtiéndose en el principal cultivo agrícola del país, según datos aportados por la Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA, 2020).

El rendimiento promedio en Uruguay para las últimas 3 zafras se ubica en torno a 2100 Kg ha⁻¹, siendo muy variable año a año (DIEA, 2020).

Existen diversos factores que determinan que no se alcancen rendimientos medios mayores a nivel comercial, pero en los cultivos de verano entre los que se encuentra el de soja se presenta como principal limitante el déficit hídrico (Giménez & García, 2011).

Este déficit se explica por la variabilidad de las precipitaciones y la capacidad de almacenaje de agua del suelo (CAAD), esto hace que las situaciones de déficit hídrico se presenten frecuentemente (Giménez & García, 2011).

En los sistemas de cultivo de secano en Uruguay, donde la variación de las precipitaciones entre años es considerable cobra importancia la CAAD ya que esta propiedad genera autonomía a los cultivos en épocas de déficit hídrico.

A pesar de que estos efectos son conocidos, no existen trabajos experimentales que demuestren la importancia de la CAAD para mitigar efectos en el rendimiento provocados por un déficit hídrico moderado.

Se plantea la siguiente hipótesis: i) CAAD del suelo resulta relevante para mitigar efectos del déficit de precipitaciones, en especial, durante el período crítico de definición del componente numérico más importante del rendimiento.

ii) la posibilidad de mitigar el efecto depende de la profundidad del suelo.

2 Revisión bibliográfica

2.1 Componentes del rendimiento

A lo largo del ciclo del cultivo se van generando los componentes numéricos del rendimiento, los principales son, el número de granos por unidad de superficie y el peso de granos. A su vez el número de granos se subdivide en tres componentes: número de nudos, número de vainas por nudo y número de granos por vaina (Kantolic et al., 2003).

El número de nudos que se diferencia en ramificaciones depende principalmente de las condiciones de fotoperiodo previas y posteriores a floración, a su vez la elongación y supervivencia de estos está condicionada por la tasa de crecimiento del cultivo y los factores ambientales que la regulan (agua, luz, nutrientes). El número de vainas por nudo resulta de los fenómenos de generación y mortandad de los frutos. La soja produce más primordios florales de los que puede fijar y en condiciones normales, menos del 50 % llega a formar vainas. Si bien no están claras las condiciones que determinan el aborto de vainas, se conoce que una de las principales determinantes de la mortandad de flores y frutos jóvenes es la disminución del flujo de asimilados desde las hojas a los órganos reproductivos. El subcomponente número de granos por vaina es más estable ante variaciones ambientales que los anteriores, aunque en determinadas situaciones uno o más granos de la vaina pueden abortar antes de que comience la fase de llenado efectivo modificando el número de granos logrados por vaina (Kantolic et al., 2003).

Por otro lado, el peso final de grano puede describirse como una función de su tasa de crecimiento y la duración del período de llenado. Ambos atributos están regulados genéticamente y presentan cambios según las condiciones ambientales. Las principales diferencias entre genotipos en el peso de grano son atribuibles a diferencias en la tasa de crecimiento de los granos (Kantolic et al., 2003).

2.2 Período crítico en la determinación del rendimiento

Si bien las estructuras responsables de la cantidad de granos por unidad de superficie se generan a lo largo de casi todo el ciclo, no todas las etapas son igualmente importantes, sino que existen períodos donde si las condiciones son adversas el impacto sobre el rendimiento es mayor (Kantolic, 2003).

La soja presenta alta capacidad de mantener el rendimiento ante condiciones de estrés entre las etapas R1-R3 en escala desarrollada por Fehr et al. (1971). Sin embargo, a medida que avanza el ciclo reproductivo va perdiendo esta capacidad, por lo cual el período más crítico se da en etapas reproductivas más avanzadas, aproximadamente entre R4-R6, cuanto mayor sea la tasa de crecimiento y la duración de esta etapa, mayor será el rendimiento (Andriani et al., 1991).

2.3 Factores ambientales que regulan la dinámica del desarrollo

Los factores ambientales que regulan la dinámica del desarrollo son principalmente la temperatura y el fotoperiodo, ambos factores actúan de forma simultánea y existe evidencia de interacción entre ellos. A su vez existe variación entre genotipos en la respuesta a dichos factores (Kantolic et al., 2003).

La temperatura regula el desarrollo a lo largo de todo el ciclo, pero los requerimientos térmicos y las temperaturas cardinales que regulan la tasa de desarrollo difieren a lo largo de las diferentes fases del desarrollo (Kantolic et al., 2003).

La tasa de desarrollo surge de la relación entre la duración de una fase fenológica y la temperatura, y a partir de esta se definen las temperaturas cardinales, la temperatura base (temperatura a la cual la tasa de desarrollo es cero), temperatura óptima y temperatura máxima. Para que haya desarrollo la temperatura debe ser mayor a la temperatura base, el desarrollo aumenta linealmente hasta la temperatura óptima, y declina entre ésta y la máxima (Sadras et al., 2002).

Se han desarrollado modelos para estimar la duración de las distintas etapas fenológicas, los más sencillos que solo se pueden aplicar en rangos de temperaturas entre la T base y la T óptima utilizan el concepto de tiempo térmico que se define como la sumatoria diaria de la diferencia entre la temperatura del ambiente y la temperatura base según etapa de desarrollo del cultivo (Sadras et al., 2002).

La soja es una especie de día corto (responde al acortamiento de los días), con respuesta cuantitativa. El fotoperiodo regula la mayor parte de los eventos reproductivos (Kantolic et al., 2003).

La mayoría de los cultivares de soja presentan una fase juvenil en la que no responden al fotoperiodo, aunque hay algunos que no presentan fase juvenil, esta tiene una duración de aproximadamente 8 días a temperaturas óptimas. Luego de esta etapa la exposición a fotoperíodos inductivos conduce a una serie de cambios que culminan en la iniciación floral (Kantolic et al., 2003).

El fotoperiodo a partir del cual se induce la floración, así como la sensibilidad al mismo presentan alta variación genotípica, la sensibilidad tiende a aumentar a medida que avanza el ciclo, siendo los grupos de madurez superiores los que presentan mayor sensibilidad en la post floración (Kantolic et al., 2003).

Condiciones de día largo pueden llevar a un retraso en la iniciación floral, esto es un factor de importancia para lograr buenos rendimientos (Sadras et al., 2002).

Otros factores que condicionan el desarrollo son disponibilidad de agua y nitrógeno, calidad de la luz, concentración de CO₂ y radiación solar (Sadras et al., 2002).

2.4 Rendimiento Potencial

Se entiende como rendimiento potencial, al rendimiento de un genotipo adaptado, el cual es cultivado en condiciones favorables sin limitaciones de agua, nutrientes, plagas, ni enfermedades (Evans, 1993).

2.5 Brecha de rendimiento

El término “brecha de rendimiento” es utilizado en la bibliografía y refiere a la diferencia entre el rendimiento potencial de un cultivo y el rendimiento medio obtenido por los productores (Lobell et al., 2009).

Esta brecha de rendimiento puede estar explicada por diferentes factores limitantes del rendimiento (disponibilidad hídrica, de nutrientes o ambos), y factores reductores del rendimiento (malezas, plagas, enfermedades).

Para planteos de producción en secano como se da en la mayoría de la superficie cultivada de Uruguay el objetivo es alcanzar el potencial de rendimiento limitado por agua.

Rizzo (2018) estimó a través del modelo CROPGRO-Soybean que el rendimiento potencial limitado por agua (Y_w) es de 3,6 Mg ha⁻¹ en cultivos de primera y 3,4 Mg ha⁻¹ para soja de segunda. La brecha de rendimiento estimada para soja de primera en Uruguay fue de 1,5 Mg ha⁻¹, mientras que para la soja de segunda fue 1,7 Mg ha⁻¹, la cual expresada con relación a Y_w , significó una brecha relativa del 42 % y 50 % (para soja de primera y segunda respectivamente).

2.6 Capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD)

Se define el agua disponible (AD) como la diferencia entre el contenido de agua de un suelo a capacidad de campo (CC) y el contenido de agua en el coeficiente de marchitez permanente (CMP) (García Préchac et al., s.f.).

2.6.1 Capacidad de campo

Puede ser estimada como el contenido de agua que posee el suelo luego de 1 a 3 días de ser saturado por lluvia o riego; cuando escurre el agua gravitacional y los macro poros quedan ocupados por aire y los microporos por agua se dice que el suelo está a capacidad de campo (García Préchac et al., s.f.).

2.6.2 Punto de marchitez permanente

Se estima como el contenido de agua del suelo en el cual una planta marchita no recobra la turgencia, aunque se le coloque en una atmósfera saturada de agua por 12 horas (García Préchac et al., s.f.).

2.7 Suelos de Uruguay

Características comunes:

Según Durán et al. (1999), si bien las condiciones climáticas en el país no presentan una variación importante, existe heterogeneidad en los materiales que dan origen a los suelos. Sin embargo, se pueden señalar varios rasgos comunes relevantes a la mayoría de suelos del país.

Entre los rasgos más significativos se destaca el color oscuro en casi todo el solum: negro, pardo muy oscuro o pardo grisáceo muy oscuro. Las excepciones más importantes a estos colores la constituyen: Un cierto número de suelos derivados de materiales generadores areniscosos, con color pardo a pardo rojizo y rojo (o rojo amarillento) en los horizontes A y B respectivamente (Durán et al., 1999).

Otra característica común es el alto contenido de materia orgánica en profundidad, la excepción en este caso la constituyen los suelos de textura franco-arenosa o arenoso-franca en el horizonte A. En general los suelos presentan una saturación en

bases mayor al 50 % y un pH por encima de 5,5 en todo el perfil, notándose en ambos parámetros una tendencia al aumento a medida que aumenta la profundidad (Durán et al., 1999).

Otro rasgo común a los suelos más extendidos en el país es la dominancia de arcillas del tipo 2:1 con carga permanente, particularmente illita y esmectitas. En los suelos ácidos, de baja materia orgánica y texturas livianas, que son los más lixiviados y meteorizados, no ocurren en cambio casi nunca las esmectitas, siendo importantes la caolinita y la illita (Durán et al., 1999).

También se destaca la presencia generalizada de horizontes subsuperficiales de textura fina y de carácter iluvial, a escasa profundidad. Esta característica morfológica presente casi siempre, da origen a suelos con un horizonte B argilúvico, de alto contenido de arcilla y poco permeable (Argiudoles Típicos y Vérticos principalmente). Es frecuente la presencia Vertisoles, suelos de color negro y alto contenido de arcilla expansible en todo el perfil con un contenido de materia orgánica elevado. En el litoral oeste y en el sur, sobre sedimentos de diverso origen y textura media a fina, predominan los Argiudoles Típicos y Vérticos (Durán et al., 1999).

Según Molfino y Califra (2001), la mayor parte de los suelos agrícolas del litoral oeste y de otras zonas poseen una CAAD de entre 80 y 160mm, también concluyeron que casi un 30 % de la superficie de nuestro territorio posee suelos con muy baja (menor a 40 mm) y baja (entre 40 y 80 mm) CAAD.

2.8 Antecedentes sobre suelos y disponibilidad hídrica

La interacción entre la profundidad del suelo y las precipitaciones medida como variación de rendimiento fue estudiada por Calviño y Sadras (1999) a partir de registros de chacras realizados por AACREA en Tandil y Pergamino (Argentina). Se establecieron funciones separadas para suelos profundos (profundidad de 1 m) y poco profundos (entre 0,75-0,50 m de profundidad). Los rendimientos variaron entre 2,1 a 3,1 Mg ha⁻¹ en suelos profundos y entre 1,3 a 2,6 Mg ha⁻¹ en suelos poco profundos. Se constató diferencias en rendimiento a causa del agua disponible en el período desde aparición de vainas hasta llenado de granos, la respuesta en rendimiento a la cantidad de agua en este período aumentó hasta los 100mm manteniéndose constante para valores superiores.

Mazzilli y Ernst (2007) utilizando modelos de predicción de rendimiento, estudiaron el efecto de la profundidad del suelo en el almacenaje de agua para cultivos de segunda, se tomó el dato de agua disponible a la siembra teniendo en cuenta el consumo de agua del cultivo antecesor, en este caso trigo.

Se obtuvo que en suelos más profundos la probabilidad de contener agua disponible es mayor que en suelos poco profundos, por lo que es un año con un nivel de precipitaciones “normal”, el suelo profundo brinda una mayor seguridad siempre y cuando este esté por encima del 50 % de su capacidad de almacenar agua útil. En años muy secos, la pérdida de rendimiento es indiferente de la profundidad.

Sadras y Calviño (2001) estudiaron la respuesta del rendimiento en granos a la profundidad del suelo para Soja, Maíz, Girasol y Trigo. En Soja utilizando un cultivar de crecimiento indeterminado, encontraron respuesta a la profundidad del suelo, con una pérdida de rendimiento de 0,45 % por cada cm de profundidad, esta fue menor comparada

con los demás cultivos de verano, Maíz y Girasol que poseen una menor plasticidad para compensar las pérdidas ante situaciones de estrés. También obtuvieron respuesta al sitio y a la interacción sitio x profundidad. La respuesta en Soja para cultivares de crecimiento determinado puede ser diferente debido a la menor capacidad de compensación ante situaciones de estrés aisladas en torno a la floración.

Bacigaluppo et al. (2011), en Argentina, estudiaron las principales variables de clima y el suelo que provocan diferencias en el rendimiento de soja. El experimento se realizó en cuatro zafra de cultivo, desde la 2000/01 hasta 2004/05. Se seleccionaron sitios con suelos genéticamente similares y clima templado y subhúmedo con variabilidad de precipitaciones. La fecha de siembra elegida fue la óptima, se aseguró que el nivel de fósforo no sea un factor limitante y se realizó un control de malezas, plagas y enfermedades. Para cada caso se determinó el rendimiento, variables del suelo (contenido de materia orgánica, porosidad, conductividad hidráulica, etc.), el agua disponible en suelo a la siembra, las precipitaciones, fotoperiodo, la radiación solar y la temperatura media para los períodos desde emergencia a R2, desde R2 a R5 y desde R5-R7. Las precipitaciones acumuladas durante la temporada de cultivo oscilaron entre 264 y 831 mm, lo que sugiere déficit hídrico en algunos ambientes. Como resultado se obtuvo que el efecto del sitio representa el 74 %, el 61 %, el 82 % y el 62 % de la variación del rendimiento en las campañas 2001/02, 2002/03, 2003/04 y 2004/05, respectivamente. El ambiente fue el principal factor explicativo de la variación del rendimiento, con una magnitud de efecto varias veces mayor que los efectos de tipo genético. El rendimiento obtenido en los diferentes ambientes osciló entre 2060 y 4580 kg/ha; el número de semillas fue el componente del rendimiento con mayor variación. Con respecto a las variables de suelo obtuvieron que el rendimiento se asoció negativamente con ΔM (terrones del Delta) y CS (capas de suelo compactado) y positivamente con Ksat (conductividad hidráulica) y la materia orgánica. Además, obtuvieron que Ksat se correlacionó negativamente con ΔM y CS. La variabilidad observada en el rendimiento fue coherente con la variabilidad observada en el clima y el suelo.

Benjamin y Nielsen (2006) llevaron a cabo un experimento para examinar la respuesta del sistema radicular de las leguminosas al estrés por déficit hídrico, para ello utilizaron garbanzo (*Cicer arietinum*), arveja (*Pisum sativum*) y soja (*Glycine max*). Se realizó el cultivo bajo dos regímenes hídricos: uno bajo condiciones de lluvia natural y otro regado para minimizar el estrés por déficit hídrico. La distribución de las raíces de cada especie se midió a intervalos de 23 cm de profundidad hasta una profundidad de 1,12 m directamente debajo de las plantas en las etapas de crecimiento de floración tardía y llenado de vainas. Se midió la superficie de las raíces y se registró el peso de las mismas en cada intervalo de profundidad. Se obtuvo como resultado que el déficit hídrico no afectó a la distribución relativa de las raíces de la soja. Entre el 95-97 % del total de las raíces y el 58-70 % de la superficie total se encontraba en la superficie de 0,23 m en ambos momentos de muestreo y bajo ambos regímenes hídricos. También constataron que el peso de las raíces en las diferentes etapas de crecimiento fue similar pero la superficie radicular entre el período de floración tardía y llenado de grano se duplicó en el tratamiento sin riego y se triplicó en el tratamiento regado lo que indica raíces más finas en etapas de llenado de grano.

Micucci y Taboada (2006) estudiaron la relación entre las propiedades físicas del suelo y su relación con la abundancia de raíces de soja en 2 sistemas de laboreo, convencional y sin laboreo (siembra directa). Se observaron diversos cambios en los suelos de ambos sistemas, en el sistema sin laboreo se dio una recuperación del carbono

orgánico del suelo tras 4-11 años, mejoró la estabilidad de los agregados significativamente. La compactación relativa del suelo varió 60,8-83,6 % por debajo del límite mínimo para el rendimiento de los cultivos (> 90 %). En cambio, la porosidad del suelo > 50 mm osciló entre el 0,91 y el 5,09 % del volumen del suelo, muy por debajo del límite crítico mínimo para la aireación y elongación de las raíces (> 10, % v/v). El umbral de resistencia del suelo (alrededor de 2-3 MPa) sólo se superó en una bandeja de arado inducido en el suelo Bragado de labranza convencional (5,9 MPa), y en suelos de labranza convencional y cero (3,7-4,2 MPa, respectivamente). Sin embargo, concluyeron que ni la baja macro porosidad ni las altas resistencias del suelo impidieron el crecimiento de las raíces de soja en ningún sitio. Encontraron una correlación negativa entre la abundancia de raíces y el contenido de arcilla del suelo en profundidad. Por lo tanto concluyeron que el desarrollo de raíces de soja en profundidad está relacionado a las propiedades del suelo y no al sistema de laboreo.

Grzesiak et al. (2012) estudiaron los cambios en la estructura del sistema radicular de plántulas de maíz (C4) y triticale (C3) afectados por la compactación del suelo. Se sometieron plántulas de ambas especies a niveles de compactación del suelo bajos (L - 1,10 g/cm³), moderados (M - 1,34 g/cm³) y severos (S - 1,58 g/cm³). Se observaron claras diferencias en la distribución de las raíces en el perfil del suelo; las plantas de los tratamientos M y S presentaron menor masa seca de tallo, hojas y raíces, así como menor número de hojas respecto al tratamiento L, se observó una importante disminución de la biomasa radicular en los tratamientos M y S en el perfil del suelo en la profundidad de 15 a 40 cm. Cualquier nivel de compactación del suelo no influyó en el número de raíces seminales y seminales-adventicias, pero disminuyó su longitud.

3 Materiales y métodos

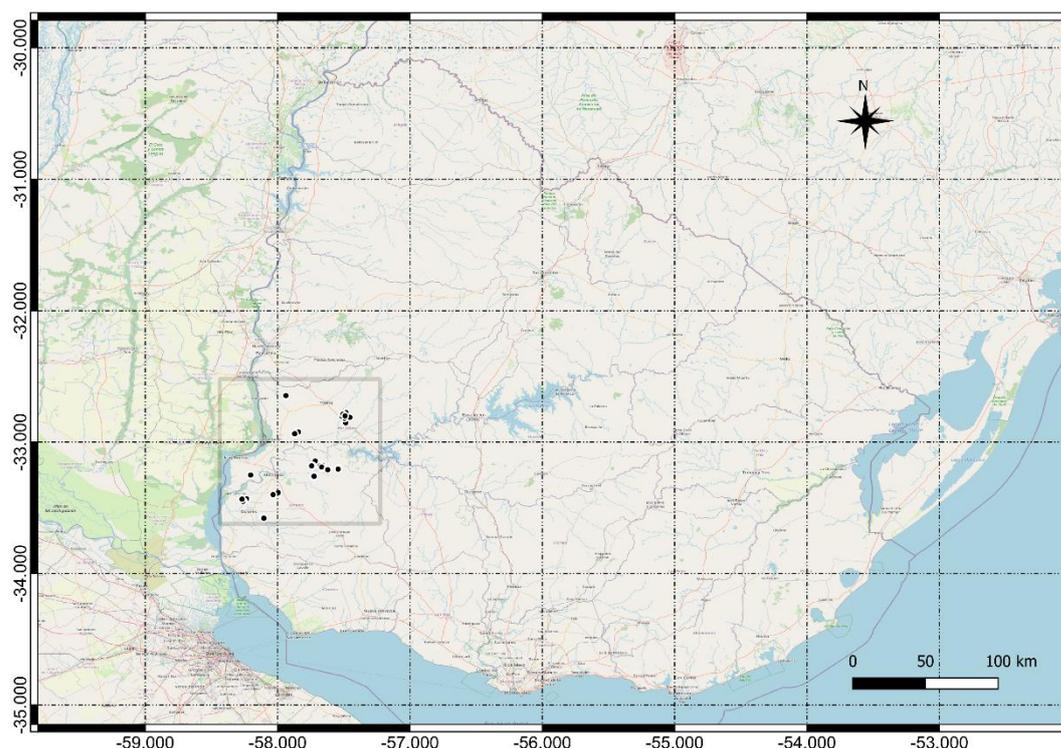
3.1 Estrategia de investigación

El trabajo se realizó en la zafra 2019/2020. Se establecieron 65 sitios seleccionados en chacras de productores pertenecientes a FUCREA y AUSID ubicadas entre Mercedes y Young. Todas corresponden a soja de estación completa (de primera); por lo que los antecesores fueron chacras provenientes de praderas plurianuales, de barbecho invernal o siguiendo a cultivos de servicio, definidos como aquellos que tienen un objetivo diferente al de la provisión de alimentos. Las chacras fueron sembradas dentro del rango óptimo de fechas recomendada (desde 25/10 hasta 1/12)

El área de estudio corresponde al litoral y centro-sur del Uruguay, la zona de mayor importancia agrícola del país. El clima de la región es subtropical húmedo. La temperatura media diaria anual es de 17,5 °C con una marcada variación en función de la estación del año. La precipitación media anual es de 1200 mm, con una alta variación interanual.

Figura 1

Mapa georreferenciado con la ubicación de los sitios



Nota. Elaborado con Qgis (versión 3.16.14-Hannover).

Mediciones

En el suelo:

Para el relevamiento de datos de suelo se realizaron muestreos con taladro holandés en cada sitio, tomando como referencia, un radio de 10m desde un punto

marcado con GPS. Se identificaron horizontes, registrado su espesor en cm, hasta la aparición del material madre, con una profundidad máximo de 1,3 m. Se tomaron muestras por horizontes para determinar textura (método Bouyoucos) y carbono orgánico con el método Walkley-Black.

Se utilizaron ecuaciones de Fernández (1979) y Silva et al. (1988) para calcular los contenidos de humedad en equilibrio con las tensiones correspondientes a 1/10 atmósfera (Capacidad de Campo - CC), a 15 atmósferas (Coeficiente de Marchitez Permanente - CMP) y densidad aparente (d_a), a partir de contenidos porcentuales en peso de arena, limo, arcilla y materia orgánica de los horizontes del suelo.

Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$CC (\text{Horizontes A}) = 21,977 - 0,168 (\text{Ar } \%) + 2,601 (\text{M.O } \%) + 0,127 (\text{Ac } \%)$$

$$CC (\text{Horizontes B}) = 18,448 - 0,125 (\text{Ar } \%) + 1,932 (\text{MO } \%) + 0,295 (\text{Ac } \%)$$

$$CMP (\text{Horizontes A o B}) = - 58,1313 + 0,3718 (\text{M.O. } \%) + 0,5682 (\text{Ar } \%) + 0,6414 (\text{L } \%) + 0,9755 (\text{Ac } \%)$$

$$D_a (\text{g/cc}) = 3,6725 - 0,0531 (\text{M.O. } \%) - 0,0210 (\text{Ar } \%) - 0,0228 (\text{L } \%) - 0,0221 (\text{Ac } \%)$$

Para calcular el agua disponible por horizonte se restó el respectivo CMP a cada valor de CC. ($ADH = CC - CMP$).

Luego se multiplicaron esos valores por las respectivas densidades aparentes y espesores para transformar los contenidos de humedad potencial disponible en peso a volumen y milímetros de acuerdo con las fórmulas siguientes:

$$ADH (\% \text{ agua en peso}) = CC (\text{H } \% \text{ agua en peso}) - CMP (\text{H } \% \text{ agua en peso})$$

$$ADH (\text{H } \% \text{ agua en volumen}) = CC (\text{H } \% \text{ agua en peso}) - CMP (\text{H } \% \text{ agua en peso})$$

$$ADH (\text{mm}) = ADH (\text{H } \% \text{ agua en volumen}) \times d_{aH} \times \text{espesorH} / 10 \text{ cm}$$

$$ADS (\text{mm}) = \sum ADH (\text{mm})$$

Siendo ADH (Agua Disponible por Horizonte), CC (Capacidad de Campo), CMP (Coeficiente de Marchitez Permanente), H % (Porcentaje de humedad). d_{aH} (densidad aparente del horizonte), espesorH (espesor del Horizonte), ADs (Agua disponible del Suelo)

En el cultivo:

Se registró la fecha de siembra, cultivar y Grupo de madurez

Durante el desarrollo del cultivo se registró “in situ” su fenología a los 20, 40 y 90 días de sembrado utilizando la escala desarrollada por Fehr et al. (1971). Con la fecha de siembra, el cultivar, la fenología registrada a campo y el apoyo de un modelo de predicción para los estadios fenológicos de soja desarrollado a nivel local (FENOsoja) se

estimó la ubicación temporal del período crítico de determinación del principal componente numérico del rendimiento, los granos m^2 (estadios R4 a R6).

Cuando los cultivos llegaron a su punto de cosecha se cosecharon de forma manual 3 filas de plantas de 2 metros cada una en cada sitio, retirando todo el material (planta entera con granos), para luego separar el grano de la planta y obtener datos de rendimiento potencial alcanzado.

Oferta de ambiente

Para cada sitio se registraron por fecha las precipitaciones y, en caso de aplicarse riego, los mm de agua aplicados

La radiación incidente y temperatura media fueron obtenidos desde la página web de National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2021). En el visor de acceso a datos de su página web se visualiza un mapa donde se seleccionan las coordenadas del sitio de interés, para obtener los registros de radiación se usaron las coordenadas -33,1722 de latitud y -57,7969 de longitud, que es un punto medio desde el cual se ubican los sitios a un radio de 60 km. Se seleccionó la opción Agroclimatology y la opción CSV para descargar los datos en un archivo Excel. Se define el período de tiempo (en este trabajo desde 2 de noviembre de 2019 hasta 16 de abril de 2020) y la variable que se desea obtener para ese período, en este caso radiación incidente diaria (solar irradiance). Para el caso de la temperatura media diaria (temperatura at 2 meters), el procedimiento fue el mismo, pero al ser un dato mas variable, se utilizaron las coordenadas de cada establecimiento para que sea más preciso, en la figura 1 se pueden ver los puntos georreferenciados.

3.2 Conformación de la base de datos

La base de datos fue conformada con los datos de rendimiento de cada sitio, los cálculos realizados de CAAD para cada sitio, oferta hídrica (precipitaciones y riego), así como de radiación incidente y temperatura media. Los mm de riego que se aplicaron en los lugares que estaban bajo pivot se obtuvieron de los registros de seguimiento de los productores en su plan de riego.

3.3 Análisis estadístico

El análisis estadístico fue realizado con el programa Infostat/E.

3.3.1 Regresión lineal múltiple

Se cargaron en el software todas las variables que conforman la base de datos y se le pidió que seleccionara el modelo que maximice el R^2 , entre las opciones que obtuvo se seleccionó el modelo de mayor R^2 , menor número de variables y que contenga al menos una de las variables de interés.

Una vez definidas las variables se realizó el análisis de regresión lineal múltiple. Éste permite estudiar la relación entre una variable de respuesta Y (variable dependiente) y una o más variables regresoras X (Variables independientes).

La ecuación del modelo de regresión lineal múltiple es el siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i$$

Dónde:

Y_i = es la i -ésima observación de la variable dependiente.

$x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ = es el i -ésimo valor de las variables regresoras o independientes.

β_0 = parámetro desconocido que representa la ordenada al origen de la recta, indica el valor esperado de Y cuando $x_1=0, x_2=0, \dots, x_k=0$.

$\beta_1 \dots \beta_k$ = parámetros desconocidos que representan las tasas de cambio de Y frente a cambios unitarios en x_1, x_2, \dots, x_k .

ε_i = término de error aleatorio.

Las estimaciones realizadas para los parámetros del modelo son obtenidas por el método de estimación por mínimos cuadrados ordinarios. En los resultados se muestran la matriz de coeficientes de regresión y estadísticos asociados, donde se puede ver para cada parámetro incluido en el modelo el valor estimado (Est), el error estándar de la estimación (EE), los límites del intervalo de confianza al 95 % (LI y LS), el valor estadístico T para probar la hipótesis que el parámetro vale 0, el valor de significación p para la prueba de la hipótesis de T y el índice C_p de Mallows. También se muestra la tabla de análisis de la varianza. En esta se incluye el coeficiente R^2 , el R^2 ajustado, el error cuadrático medio de cada predicción y el análisis de la varianza para el modelo especificado. El R^2 mide la proporción de la variación en Y que es explicada por la relación con la variable X . El R^2 ajustado se calcula como el cociente entre la suma de cuadrados del modelo y la suma de cuadrados total. En el análisis de la varianza la suma de cuadrados es de tipo III.

3.3.2 Regresión lineal múltiple partiendo los datos en Terciles.

Se estudió el efecto de las variables seleccionadas bajo condiciones de oferta hídrica contrastantes. Para ello se particionó la base de datos por terciles en base a la oferta de agua, definida por precipitaciones y riego.

3.3.2.1 mm recibidos durante el período crítico de definición del rendimiento (R4-R6).

Tercil alto: entre 98 y 241 mm recibidos.

Tercil medio: entre 91 y 98 mm recibidos.

Tercil bajo: entre 19 y 90 mm recibidos.

3.3.2.2 mm de agua recibidos durante el ciclo del cultivo (VE-R8).

Tercil alto: entre 453 y 666 mm recibidos.

Tercil medio: entre 421 y 450 mm recibidos.

Tercil bajo: entre 317 y 421 mm recibidos.

3.3.2.3 Sitios regados y no regados.

Sitios sin riego: 55 sitios, con un rendimiento medio de 2978,36 kg ha⁻¹

Sitios regados: 10 sitios, con un rendimiento medio de 4093 kg ha⁻¹

4 Resultados

4.1 Caracterización de la base de datos

En la Tabla 1 se resume la información relevada. Valores medios (Media), mínimos (Mín), máximos (Máx) y coeficiente de variación (CV) para las variables que conforman la base de datos.

Tabla 1

Variables utilizadas, con sus valores medios, mínimos, máximos y coeficiente de variación

Variable	Media	Mín	Máx	CV
Profundidad (cm)	92	25	130	26
CAAD del horizonte A (mm)	44	20	75	29
CAAD de todo el perfil (mm)	160	61	221	25
Fecha de siembra juliano	311	294	330	2
Largo de ciclo (días)	144	129	165	8
mm acumulados en R1-R6	170	78	365	37
mm acumulados en R4-R6	101	19	241	43
mm acumulados R1-R8	225	126	451	33
mm acumulados en el ciclo VE_R8	447	317	666	19
Radiación acumulada VE_R8 (Mj m ⁻²)	3304	3002	3865	6
Radiación acumulada R1_R8 (Mj m ⁻²)	1759	1438	2086	9
Radiación acumulada R1_R6 (Mj m ⁻²)	1255	1133	1304	3
Radiación acumulada R4_R6 (Mj m ⁻²)	721	625	798	5
Temperatura media VE_R8 (°C)	23	22	23	2
Temperatura media R1_R8 (°C)	23	21	24	3
Temperatura media R1_R6 (°C)	24	23	25	1
Temperatura media R4_R6 (°C)	24	23	24	1
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	3150	1470	5110	25

Nota. Elaborado con Infostat/E. Ref.: CAAD: Capacidad de almacenaje de agua disponible; VE, R1, R6, R8 estados fenológicos del cultivo en la escala de Fehr et al. (1971).

Los suelos muestreados presentaron una profundidad máxima de 130 cm y una mínima de 25 cm, con una media de 92 cm. La capacidad de almacenar agua de dichos suelos presentó un alto CV, 29 y 25, para el horizonte A y para el perfil completo respectivamente.

El largo de ciclo y la fecha de siembra presentaron variaciones de alrededor de un mes.

Los milímetros de agua acumulados, que incluyen precipitaciones y riego (en caso de tenerlo) presentaron también una variación importante marcándose notoriamente cuando observamos los diferentes períodos del cultivo, por ejemplo, en el período R4-R6, el mínimo fue de 19 mm y el máximo 241 mm. La radiación acumulada y la temperatura fueron las variables más estables, la T° durante el ciclo estuvo en el rango de los 21-25°C.

Los rendimientos alcanzados fueron muy variables, obteniéndose una media de 3150 kg.ha⁻¹, con un máximo de 5110 kg.ha⁻¹ y un mínimo de 1470 kg.ha⁻¹.

4.2 Variables de suelo y ambiente determinantes del rendimiento de soja

Se identificaron 10 modelos de regresión múltiple integrando variables explicativas del rendimiento que lograron un R² ajustado similar (Tabla 2). Se seleccionó el modelo 8, por tener el menor número de variables e incluye variables relacionadas con la capacidad de suministro de agua desde el suelo, objetivo central de este trabajo.

Tabla 2

Lista con los diez mejores modelos, las variables que los conformaron y su R^2 ajustado

Num.Reg.	R^2 Aj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11	0,56	CAAD- AB	FS	LC	mmR4- R6	mmR1- R6	mmR1- R8	RADVE- R8	RADR1- R8	RADR1- R6	RADR4- R6	T R1- R8(X)		
10	0,56	CAAD- AB	FS	LC	mmR4- R6	mmR1- R6	mmR1- R8	RADVE- R8	RADR1- R8	RADR1- R6	RADR4- R6			
11	0,56	CAAD- AB	FS	LC	mmR4- R6	mmR1- R6	mmR1- R8	mmVE- R8	RADR1- R8	RADR1- R6	RADR4- R6	T R1- R8(X)		
11	0,56	CAAD- AB	ProfT	FS	LC	mmR4- R6	mmR1- R6	mmR1- R8	RADVE- R8	RADR1- R8	RADR1- R6	RADR4- R6		
12	0,56	CAAD- AB	ProfT	FS	LC	mmR4- R6	mmR1- R6	mmR1- R8	RADVE- R8	RADR1- R8	RADR1- R6	RADR4- R6	T R1- R8(X)	
11	0,56	CAAD- AB	FS	LC	mmR4- R6	mmR1- R6	mmR1- R8	RADVE- R8	RADR1- R8	RADR1- R6	RADR4- R6	T VE- R8(X)		
10	0,56	CAAD- AB	FS	LC	mmR4- R6	mmR1- R6	mmR1- R8	RADR1- R8	RADR1- R6	RADR4- R6	T R1- R8(X)			
10	0,55	CAAD- A	CAAD- AB	LC	ProfT	mmR4- R6	mmR1- R6	mmR1- R8	mmVE- R8	RADVE- R8	T R1- R8(X)			
10	0,55	CAAD- AB	FS	LC	mmR4- R6	mmR1- R8	mmVE- R8	RADVE- R8	RADR1- R8	RADR1- R6	RADR4- R6			
13	0,55	CAAD- A	CAAD- AB	FS	ProfT	LC	mmR4- R6	mmR1- R6	mmR1- R8	mmVE- R8	RADR1- R8	RADR1- R6	RADR4- R6	T R1- R8(X)

Nota. Elaborado con Infostat/E.

En la Tabla 3 se presentan los coeficientes y ajustes de la regresión lineal múltiple que incluye las variables del modelo seleccionado.

Tabla 3

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados al modelo seleccionado

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	8228,81	2763	2689,32	13768,3	2,98	0,0043		
CAAD_A	-10,58	6,95	-24,51	3,35	-1,52	0,1336	11,32	1,78
CAAD_AB	20,89	10,14	0,57	41,21	2,06	0,0442	13,25	37,41
ProfT	-27,1	16,64	-60,47	6,26	-1,63	0,1092	11,65	37,59
LC	22,41	7,32	7,73	37,1	3,06	0,0034	18,36	1,51
mmR4_R6	4,84	2,63	-0,44	10,12	1,84	0,0718	12,37	3
mmR1-R6	-11,38	3,02	-17,44	-5,32	-3,76	0,0004	23,17	8,28
mmR1-R8	9,03	2,17	4,68	13,38	4,16	0,0001	26,3	6,11
mmVE_R8	3,96	1,42	1,12	6,81	2,79	0,0072	16,79	3,56
RAD VE-R8	-1,69	0,42	-2,53	-0,84	-4,01	0,0002	25,07	1,59
T R1-R8 (X)	-238,14	94,31	-427,22	-49,06	-2,53	0,0145	15,38	1,23

Nota. Elaborado con Infostat/E. Ref.: CAAD_A: Capacidad de almacenaje de agua disponible del horizonte A, CAAD_AB: Capacidad de almacenaje de agua disponible de todo el perfil, ProfT: Profundidad total, LC: Largo de ciclo, mmR4_R6: mm de agua recibidos en el período R4-R6, RAD VE_R8: Radiación acumulada en el período VE-R8, T R1_R8 (X): Temperatura media del período R1-R8.

La CAAD del perfil completo (CAAD_AB) tuvo un efecto significativo, con un valor de 20,89 kg por mm de aumento, con este valor, teniendo en cuenta el rango de CAAD de los perfiles de los diferentes sitios, se puede decir que entre un suelo de CAAD medio (160mm) y el máximo de la base de datos (221mm) habría una diferencia de aproximadamente 1200 kg en el rendimiento y si tomamos los extremos del rango, la diferencia llega a los 3300 kg. Este dato no resulta extraño si observamos la base de dato, ya que la diferencia de rendimientos entre el mínimo y el máximo es de 3640 kg.

CAAD del perfil y Profundidad mostraron un alto VIF, indicando que aportan la misma información. Lo mismo sucede con mmR1-R6 y mmR1-R8. En tanto, los mm de agua recibidos como precipitaciones más riego durante el período R4-R6 (período crítico de definición del rendimiento) mostraron un impacto positivo sobre el rendimiento, pero cuantificado como una tendencia ($p \leq 0,07$). Esta información, sumada a la correlación simple entre las variables (Tabla 4) fue la base para la selección de las variables a retener en el modelo que las relaciona con el rendimiento.

Tabla 4

Coefficientes de correlación de Pearson entre las variables del modelo seleccionado y su significancia

	Rend	CAAD_A	CAAD_AB	ProfT	LC	mmR4_R6	mmR1-R6	mmR1-R8	mmVE_R8	RAD VE-R8	T R1-R8 (X)
Rend	1	0,55	0,01	0,01	0,26	2,50E-04	2,70E-04	1,50E-05	7,10E-06	0,13	0,18
CAAD_A	-0,08	1	0,79	0,63	0,07	0,1	0,03	0,01	0,76	0,31	0,5
CAAD_AB	0,3	0,03	1	0	0,51	0,27	0,13	0,31	0,08	0,63	0,98
ProfT	0,31	-0,06	0,98	1	0,77	0,28	0,17	0,31	0,03	0,74	0,85
LC	0,14	-0,23	0,08	0,04	1	0,05	0,04	0,03	0,15	0,01	0,41
mmR4_R6	0,44	0,21	0,14	0,14	-0,2	1	0	0	2,60E-08	0,21	0,23
mmR1-R6	0,44	0,27	0,19	0,17	-0,3	0,78	1	0	0	0,04	0,72
mmR1-R8	0,51	0,33	0,13	0,13	-0,3	0,76	0,87	1	0	0,70	0,9
mmVE_R8	0,52	0,04	0,22	0,26	-0,2	0,62	0,76	0,75	1	0,73	0,97
RAD VE-R8	-0,19	0,13	0,06	0,04	0,33	-0,16	-0,25	-0,05	-0,04	1	0,92
T R1-R8 (X)	-0,17	-0,09	0,0039	-0,02	-0,1	0,15	-0,05	-0,02	0,0046	0,01	1

Nota. Elaborado con Infostat/E.

Las variables, CAAD AB y Profundidad de suelo presentan una correlación de 0,98. Lo mismo pasa con los mm R1-R6 y mm R1-R8, con $r=0,87$.

Debido a que la profundidad del suelo resulta ser una variable más práctica y fácil de obtener a nivel de campo, se mantiene en el análisis y se descarta la CAAD que para su estimación lleva un proceso más largo donde es necesario realizar pruebas de laboratorio. Esto sabiendo que por su alta correlación podemos estimar una a través de la otra.

Para analizar el efecto de la profundidad en diferentes situaciones se descartarán variables correlacionadas, primero la CAAD AB que está altamente correlacionada con la profundidad, y también se descartarán los mm R1-R6 que se encuentran correlacionados con los mm R1-R8 pero presentan menor correlación con el rendimiento. También se sacará CAAD A que es la variable menos correlacionada al rendimiento con un $r=-0,08$ y un $p=0,55$. El modelo final obtenido se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados al modelo sin las variables correlacionadas

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMal lows	VIF
const	3564,99	2730,96	-1903,65	9033,64	1,31	0,20		
ProfT	6,19	3,16	-0,14	12,52	1,96	0,06	9,84	1,1
LC	26,19	7,38	11,42	40,96	3,55	0,01	18,61	1,2
mmR4_R6	1,51	2,76	-4,02	7,04	0,55	0,59	6,3	2,7
mmR1-R8	3,61	1,86	-0,12	7,34	1,94	0,05	9,76	3,6
mmVE_R8	1,98	1,32	-0,66	4,62	1,5	0,14	8,25	2,5
RAD VE-R8	-1,1	0,4	-1,9	-0,29	-2,73	0,01	13,46	1,2
T R1-R8 (X)	-129,55	98,81	-327,4	68,31	-1,31	0,20	7,72	1,1

Nota. Elaborado con Infostat/E. Ref.: ProfT: Profundidad total, LC: Largo de ciclo, mmR4_R6: mm de agua recibidos en el período R4-R6, RAD VE_R8: Radiación acumulada en el período VE-R8, T R1_R8 (X): Temperatura media del período R1-R8.

La profundidad del suelo tuvo un efecto positivo y significativo al 6 %, de 6,19 kg por cm de aumento, esto marca una diferencia en el rango de profundidades de la base de datos de 650 kg entre el mínimo y el máximo que se pueden concretar por tener un suelo más profundo.

Los mm recibidos en el período R1-R8 tuvieron un efecto positivo en el rendimiento, la radiación acumulada en el ciclo tuvo efecto negativo, debido a que es radiación incidente, no radiación interceptada.

Los mm de agua (precipitaciones+riego) recibidos durante el período crítico de definición del rendimiento (mmR4-R6), así como los acumulados entre VE y R8 y la temperatura media entre R1 y R8 no tuvieron un efecto significativo sobre el rendimiento.

4.3 Efecto de las variables seleccionadas bajo distintos escenarios de aporte de agua

4.3.1 Efecto de la profundidad del suelo bajo diferentes niveles de oferta hídrica recibida en el período crítico de definición del rendimiento.

Utilizando el modelo seleccionado se realizaron los análisis de regresión lineal en los diferentes rangos de oferta hídrica durante el período crítico (mmR4_R6), la media de rendimiento del tercil bajo fue similar a la del tercil medio, pero los rendimientos máximos alcanzados fueron menores cuando la oferta hídrica fue baja (tabla 6).

Tabla 6

Medias y rangos de los terciles correspondientes al período crítico

Terciles	Variable	Media	Mín	Máx
Alto	mmR4_R6	142,17	98	241
	ProfT	96,9	55	125
	Rend	3449,05	1820	5110
Bajo	mmR4_R6	69,96	19	90
	ProfT	88,04	25	130
	Rend	3006,09	2110	4280
Medio	mmR4_R6	93,14	91	98
	ProfT	90,95	35	130
	Rend	3008,1	1470	5010

Nota. Elaborado con Infostat/E. Ref.: mm R4_R6: agua recibida en el período R4-R6, ProfT: Profundidad total del perfil de suelo, Rend: Rendimiento en kg ha⁻¹

Los rangos de profundidad de suelo entre los terciles fueron variables, el tercil con mayor amplitud fue el bajo y el de menor amplitud fue el alto donde la mínima profundidad fue 55cm.

Tabla 7

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados a los niveles de oferta hídrica del período crítico

Tercil alto									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	-6573,5	6673,09	-20989,8	7842,86	-0,99	0,34			
ProfT	-2,48	6,4	-16,3	11,34	-0,39	0,70	6,15	1,41	
LC	30,57	31,71	-37,94	99,09	0,96	0,35	6,93	10,4	
mmR4_R6	4,01	10,02	-17,63	25,65	0,4	0,69	6,16	15,4	
mmR1-R8	4	6,57	-10,19	18,19	0,61	0,55	6,37	17,1	
mmVE_R8	2,55	4,07	-6,26	11,35	0,63	0,54	6,39	9,94	
RAD VE-R8	-0,93	1,03	-3,15	1,3	-0,9	0,38	6,81	4,33	
T R1-R8 (X)	255,3	211,57	-201,78	712,38	1,21	0,25	7,46	1,37	
Tercil bajo									
const	-4039,8	6383,23	-17645,3	9565,77	-0,63	0,54			
ProfT	8,25	4	-0,29	16,78	2,06	0,05	10,24	1,46	
LC	100,37	54,99	-16,83	217,58	1,83	0,09	9,33	16,9	
mmR4_R6	-4,94	9,66	-25,53	15,64	-0,51	0,62	6,26	6,13	
mmR1-R8	7,02	4,58	-2,73	16,77	1,53	0,15	8,35	3,03	
mmVE_R8	-1,51	3,91	-9,84	6,82	-0,39	0,70	6,15	10,9	
RAD VE-R8	-3,46	2,48	-8,75	1,82	-1,4	0,18	7,95	21,6	
T R1-R8 (X)	135,45	268,07	-435,92	706,82	0,51	0,62	6,26	8,01	
Tercil medio									
const	980,03	18222,3	-38386,9	40346,92	0,05	0,96			
ProfT	9,09	5,74	-3,3	21,48	1,58	0,14	8,51	1,16	
LC	59,59	40,33	-27,53	146,71	1,48	0,16	8,18	15,8	
mmR4_R6	-152,82	189,21	-561,59	255,95	-0,81	0,43	6,65	10,6	
mmR1-R8	-86,88	67,81	-233,36	59,61	-1,28	0,22	7,64	113	
mmVE_R8	-38,54	57,84	-163,49	86,4	-0,67	0,52	6,44	47,5	
RAD VE-R8	11,17	10,31	-11,1	33,43	1,08	0,30	7,17	217	
T R1-R8 (X)	20,6	479,14	-1014,51	1055,72	0,04	0,97	6	6,26	

Nota. Elaborado con Infostat/E. Ref.: ProfT: Profundidad total, LC: Largo de ciclo, mmR4_R6: mm de agua recibidos en el período R4-R6, RAD VE_R8: Radiación acumulada en el período VE-R8, T R1_R8 (X): Temperatura media del período R1-R8.

En el tercil medio y alto de suministro de agua, (con ofertas mayores a 91 mm durante el PC) no aparecen variables con efecto significativo sobre el rendimiento, en cambio en el tercil bajo, cuando los mm de agua recibida en el período crítico estuvieron entre 19 y 90mm, la profundidad del suelo tuvo un efecto positivo de 8,25 kg por cm de aumento. Teniendo en cuenta los rangos de profundidades que conforman la base de datos, se puede decir que entre el promedio de profundidad que fue de 92cm y el máximo que fue de 130cm, si la oferta hídrica es menor a 90mm en el período crítico la diferencia de rendimientos es de aproximadamente unos 300 Kg, mayor aún es si tenemos en cuenta todo el rango de profundidades donde la diferencia entre el suelo más superficial y el más profundo bajo estas condiciones ascendería a 866 kg.

4.3.2 Efecto de la profundidad del suelo bajo distintos niveles de oferta hídrica recibida a lo largo del ciclo del cultivo (período VE-R8).

Los terciles de agua recibida en el ciclo tuvieron medias de profundidad y rendimiento que acompañaron el orden de clasificación, donde hubo mayor oferta hídrica se alcanzaron rendimientos más altos y donde la oferta hídrica fue menor, se dieron los rendimientos más bajos (Tabla 8).

Tabla 8

Medias y rangos de los terciles del nivel de oferta hídrica durante el ciclo

Terciles	Variable	Media	Mín	Máx
Alto	mmVE_R8	544,94	453	666
	ProfT	100,24	60	120
	Rend	3470,48	1820	5110
Bajo	mmVE_R8	369,36	317	421
	ProfT	81,82	25	120
	Rend	2654,09	1470	4360
Medio	mmVE_R8	431,18	421	450
	ProfT	93,86	35	130
	Rend	3339,55	2580	5010

Nota. Elaborado con Infostat/E. Ref.: mm VE_R8: agua recibida en el período VE-R8, ProfT: Profundidad total del perfil de suelo, Rend: Rendimiento en kg.ha⁻¹.

Tabla 9

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados a los niveles de oferta hídrica en el ciclo

Tercil alto								
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-9062,3	14413	-40200	22075,2	-0,63	0,54		
ProfT	1,91	8,06	-15,51	19,33	0,24	0,81	6,06	1,3
LC	83,87	82,12	-93,53	261,27	1,02	0,33	7,04	20,6
mmR4_R6	2,22	6,98	-12,86	17,31	0,32	0,76	6,1	10,9
mmR1-R8	0,38	7,02	-14,8	15,55	0,05	0,96	6	15,6
mmVE_R8	7,13	5,05	-3,77	18,04	1,41	0,18	8	6,1
RAD VE-R8	-2,98	3,34	-10,2	4,24	-0,89	0,39	6,8	11,3
T R1-R8 (X)	270,68	503,22	-816,47	1357,83	0,54	0,60	6,29	5,49
Tercil bajo								
const	5727,7	3355,6	-1469,2	12924,7	1,71	0,11		
ProfT	6,74	5,19	-4,39	17,86	1,3	0,22	7,69	1,76
LC	37,98	12,55	11,06	64,91	3,03	0,01	15,15	2,07
mmR4_R6	-62,16	39,26	-146,37	22,05	-1,58	0,14	8,51	14,6
mmR1-R8	13,94	4,58	4,12	23,76	3,04	0,01	15,27	5,57
mmVE_R8	0,37	6,77	-14,16	14,89	0,05	0,96	6	8,16
RAD VE-R8	-0,42	0,63	-1,77	0,93	-0,66	0,52	6,44	1,54
T R1-R8 (X)	-209,81	114,49	-455,37	35,76	-1,83	0,09	9,36	1,28
Tercil medio								
const	12420	24674	-40500	65339,6	0,5	0,62		
ProfT	9,84	4,69	-0,21	19,89	2,1	0,05	10,41	1,41
LC	-6,07	24,18	-57,93	45,78	-0,25	0,81	6,06	8,15
mmR4_R6	3,77	41,9	-86,09	93,62	0,09	0,93	6,01	18,8
mmR1-R8	-1,27	3,59	-8,96	6,42	-0,36	0,73	6,13	2,96
mmVE_R8	-20	35,62	-96,39	56,4	-0,56	0,58	6,32	11,5
RAD VE-R8	-0,37	0,97	-2,45	1,7	-0,39	0,70	6,15	6,11
T R1-R8 (X)	29,24	396,77	-821,75	880,24	0,07	0,94	6,01	6,75

Nota. Elaborado con Infostat/E. Ref.: ProfT: Profundidad total, LC: Largo de ciclo, mmR4_R6: mm de agua recibidos en el período R4-R6, RAD VE_R8: Radiación acumulada en el período VE-R8, T R1_R8 (X): Temperatura media del período R1-R8.

El efecto de la profundidad se observó en situaciones de oferta hídrica media, cuando los mm recibidos en el ciclo estuvieron entre 421 y 450mm, con un efecto positivo de 9,84 kg por cm de aumento. Para el rango de profundidades que integran el tercil, la diferencia entre el suelo más profundo y el menos profundo supone 934kg de rendimiento concretado por efecto de la profundidad del suelo. En situaciones de alta disponibilidad es esperable que pase a ser secundaria porque el cultivo se encuentra cubierto en cuanto a requerimientos hídricos, en baja disponibilidad la falta de correlación podría deberse a que las precipitaciones no fueron suficientes para recargar de agua el perfil o la poca capacidad de exploración radicular en profundidad documentada ya por Benjamin y Nielsen (2006).

4.3.3 Efecto de la profundidad del suelo contrastando sitios con y sin riego suplementario.

Tabla 10

Medias y rangos vinculados a los sitios regados y no regados

Riego	Variable	n	Media	Mín	Máy
NO	ProfT	55	90,55	25	130
	mmVE_R8	55	418,76	317	526
	Rend	55	2978,36	1470	5010
SI	ProfT	10	99	60	120
	mmVE_R8	10	602,37	421	666
	Rend	10	4093	2730	5110

Nota. Elaborado con Infostat/E. Ref.: mm VE_R8: agua recibida en el período VE-R8, ProfT: Profundidad total del perfil de suelo, Rend: Rendimiento en kg ha⁻¹.

En la base de datos hay 10 sitios que se ubicaron bajo riego y 55 que estuvieron en condiciones de secano, la media de rendimiento de los sitios regados fue 1,02 Mg ha⁻¹ mayor a la media de los sitios sin riego, en cuanto a la profundidad de los suelos los sitios con riego tuvieron una media de profundidad de 99 cm y los sin riego de 90,55 cm, con un rango de variación entre 25 y 130cm para los no regados y entre 60 y 120cm para los regados.

Tabla 11

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados a los sitios sin riego y con riego

Sin riego suplementario								
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	6307,7	2694,7	886,74	11728,6	2,34	0,023		
ProfT	10,38	3,08	4,18	16,57	3,37	0,001	17,35	1,08
LC	28,74	7,68	13,29	44,18	3,74	0,001	20,01	1,31
mmR4_R6	-4,4	3,89	-12,24	3,43	-1,13	0,264	7,28	1,28
mmR1-R8	2,07	2,17	-2,3	6,44	0,95	0,346	6,91	1,46
mmVE_R8	-0,26	1,67	-3,62	3,1	-0,16	0,877	6,02	1,52
RAD VE-R8	-0,73	0,42	-1,58	0,12	-1,73	0,091	8,99	1,41
T R1-R8 (X)	-258,55	99,52	-458,76	-58,34	-2,6	0,013	12,75	1,21
Con riego suplementario								
const	-10851	19858	-96295	74592,4	-0,55	0,639		
ProfT	0,7	26,32	-112,54	113,93	0,03	0,981	6	6,26
LC	152,37	117,87	-354,78	659,52	1,29	0,325	7,67	26,7
mmR4_R6	12,57	21,68	-80,73	105,87	0,58	0,621	6,34	13,4
mmR1-R8	-13,36	14,98	-77,83	51,1	-0,89	0,467	6,8	8,28
mmVE_R8	26,48	23,71	-75,53	128,49	1,12	0,380	7,25	46,9
RAD VE-R8	-10,89	7,87	-44,75	22,96	-1,38	0,300	7,92	13,6
T R1-R8 (X)	663,13	819,02	-2860,8	4187,09	0,81	0,503	6,66	4,38

Nota. Elaborado con Infostat/E. Ref.: ProfT: Profundidad total, LC: Largo de ciclo, mmR4_R6: mm de agua recibidos en el período R4-R6, RAD VE_R8: Radiación acumulada en el período VE-R8, T R1_R8 (X): Temperatura media del período R1-R8.

Para los sitios con riego la profundidad del suelo no presentó un efecto significativo, en cambio para los sitios sin riego si presentó efecto significativo y positivo de 10,38 kg por cm de aumento, que en el rango de profundidades de los suelos sin riego supone una diferencia de aproximadamente 1000 kg de rendimiento concretado.

Esto demuestra que cuando se cuenta con riego para cubrir las necesidades del cultivo, la profundidad del suelo es menos relevante.

5 Discusión

Los suelos que componen la base de datos varían su CAAD entre 61 mm y 221 mm, con un coeficiente de variación del 25 % y una media de 160mm. Según Molfino y Califra (2001), la mayoría de los suelos del Litoral poseen una CAAD de entre 80 y 160 mm.

El rendimiento promedio para los suelos estudiados fue 3150 kg ha⁻¹, mil kilos superior al promedio del país para las 3 últimas zafras según DIEA (2020).

Según Rizzo (2018), el rendimiento potencial limitado por agua para nuestro país es de 3600 kg ha⁻¹ para cultivos de primera, por lo que la brecha de rendimiento para la zafra en estudio fue de 450 kg ha⁻¹.

En el análisis de regresión lineal, la CAAD del perfil tuvo un efecto positivo de 21 kg por mm, teniendo en cuenta el rango de los diferentes sitios, se puede decir que entre un suelo de CAAD medio (160mm) y el máximo de la base de datos (221mm) habría una diferencia de aproximadamente 1200 kg en el rendimiento y si tomamos los extremos del rango, la diferencia llega a los 3300 kg. Este dato no resulta extraño si observamos la base de dato, ya que la diferencia de rendimientos entre la media y el máximo es de 1960 kg y entre el mínimo y el máximo es de 3640 kg.

La CAAD está estrechamente relacionada a la profundidad del suelo, lo que resulta de ser una de las variables que componen su estimación. Al ser la variable más simple de medir y menos afectada por el manejo, se la seleccionó como la mejor variable a incluir en los modelos para cuantificar el impacto de la CAAD de los suelos.

En el análisis de regresión lineal teniendo en cuenta las variables que modularon el rendimiento se puede ver efecto de la profundidad bajo determinadas condiciones.

Cuando se realizó el análisis utilizando el modelo con el total de la base de datos, la profundidad del suelo tuvo un efecto positivo de 6 kg por cm. Este valor debe interpretarse en el marco de un año con lluvias durante todo el ciclo que promediaron 447 mm. Sadras y Calviño (2001) encontraron respuesta a la profundidad medida como pérdida de rendimiento por cm de suelo que disminuya.

El efecto en el período crítico de definición del rendimiento cuando la oferta hídrica fue menor a 90mm, fue superior al hallado para toda la base de datos, fue positivo y de 8 kg por cm. Esto se acerca al resultado obtenido por Calviño y Sadras (1999), donde encontraron respuesta en condiciones de oferta hídrica menores a 100 mm.

Al considerar los terciles de lluvia en el ciclo (mmVE-R8), la respuesta a la profundidad del suelo fue cuantificada solo en las condiciones de precipitaciones + riego del tercil medio, que abarcó entre 421-450 mm recibidos. Bajo tales condiciones, la respuesta en rendimiento de soja fue de 10 kg por cada cm de profundidad que aumente el suelo. Este efecto resulta superior al encontrado en condiciones de baja oferta durante el período crítico.

Para los rangos de profundidades de suelo que están en estudio, de entre 25 cm y 130 cm, en caso de que la oferta hídrica en el ciclo sea de entre 421 y 450mm, el efecto cuantificado marca una diferencia de aproximadamente 1000 kg de rendimiento

concretado entre el suelo más profundo respecto al más superficial y de 374 kg entre el suelo más profundo y la media de profundidad de toda la base de datos.

En condiciones de aporte de agua deficitaria durante todo el ciclo, la CAAD, estimada como profundidad del suelo, no fue una variable relevante para determinar el rendimiento de soja. Esto coincide con lo reportado por Mazzilli y Ernst (2007). Y puede deberse a la escasa capacidad de exploración radicular en profundidad reportada por Benjamin y Nielsen (2006).

El mayor efecto de la profundidad del suelo se constató al modelar los datos de sitios con riego suplementario en contraste con los de secano, hallándose un efecto de 10 kg por cm de aumento. Los sitios sobre secano tuvieron una oferta media de 419 mm durante el ciclo, esto coincide con el rango de oferta hídrica en el cual se encontró respuesta al partir los datos en terciles según mm recibidos en todo el ciclo.

Los mm acumulados durante el ciclo de cultivo tuvieron una media de 447mm y la media de rendimiento fue de 3150 kg ha⁻¹, lo cual generó una equivalencia de 7 kg ha⁻¹ por mm de agua recibido.

6 Conclusiones

Se encontró que la CAAD del perfil del suelo y la profundidad de este son variables que están altamente correlacionadas, presentando un coeficiente de Pearson de 0,98.

Al analizar el modelo seleccionado para modular el rendimiento mediante regresión lineal múltiple, tomando la base de datos de rendimientos completa, la CAAD del perfil tuvo un efecto significativo de 21 kg por cada mm de aumento. Si se compara el rango de los diferentes sitios, se puede decir que entre un suelo de CAAD medio (160mm) y el máximo de la base de datos (221mm) habría una diferencia de aproximadamente 1200 kg en el rendimiento y si tomamos los extremos del rango, la diferencia llega a los 3300 kg de rendimiento concretado por la CAAD del perfil.

Hubo efecto significativo de la profundidad del suelo cuando la oferta hídrica durante el período crítico de definición del rendimiento fue menor a 90mm. El efecto cuantificado para dichas situaciones fue de 8 kg por cada cm de aumento en la profundidad del suelo. Este efecto fue mayor al hallado cuando se tiene en cuenta toda la base de datos, donde el efecto fue positivo y de 6 kg por cm. Esto demuestra que, en circunstancias de baja oferta hídrica durante el período crítico, la profundidad del suelo puede operar para mitigar efectos negativos sobre el rendimiento.

En cuanto a la oferta de agua durante todo el ciclo del cultivo, el efecto de la profundidad del suelo se observó en situaciones de oferta media de entre 421mm y 450mm de agua recibidos durante el período VE-R8, el efecto fue positivo, de 10 kg por cm de incremento en la profundidad del suelo.

Cuando los mm recibidos en el ciclo estuvieron por debajo de 421mm y por encima de 450mm no hubo efecto significativo de la profundidad del suelo. Esto puede estar explicado por la escasa capacidad de exploración radicular para utilizar agua almacenada en profundidad en situaciones donde la oferta hídrica no fue suficiente para recargar el perfil de suelo en el caso de las ofertas inferiores a 421mm y en el caso de las ofertas superiores a 450, es esperable que al encontrarse cubiertas las necesidades del cultivo, la CAAD, evaluada como profundidad de suelo pase a segundo plano.

Al partir los datos entre los sitios regados y los no regados, los sitios regados no presentaron respuesta a la profundidad del suelo, en cambio los no regados sí. La respuesta fue positiva con un valor de 10 kg por cm de aumento. Esto coincide con los resultados obtenidos al partir los datos en terciles por mm en el ciclo, ya que la media de los sitios regados fue de 602 mm, en cambio la media de los sitios no regados fue de 419 mm (tabla10), muy cercano al rango del tercil medio donde se encontró respuesta (a partir de 421mm). Cuando se dispone de riego para cubrir las necesidades hídricas del cultivo, la profundidad del suelo y su capacidad de almacenaje pasan a segundo plano.

Teniendo en cuenta que el efecto de la profundidad del suelo en condiciones de secano es de 10 kg por cm de aumento, en los suelos que se utilizaron para conformar la base de datos entre la profundidad media y la máxima hay una diferencia de 395 kg que podrían concretarse en un suelo profundo respecto a un suelo de profundidad media. Y entre el mínimo y el máximo la diferencia de kg es de 1090.

Quedó demostrado que la profundidad del suelo tiene un efecto sobre el rendimiento que puede ser diferente según el escenario que se presente, lo que es un hecho es que, bajo condiciones desfavorables, sin ser extremas, la profundidad del suelo ofrece un nivel de seguridad extra ante la toma de decisiones, como una forma de mitigar los riesgos asociados a una oferta hídrica con alta variación interanual.

7 Bibliografía

- Andriani, J. M., Andrade, F. H., Suero, E. E., & Dardanelli, J. L. (1991). Water deficits during reproductive growth of soybeans: I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie*, *11*(9), 737-746.
- Bacigaluppo, S., Bodreroa, M. L., Balzarini, M., Gerster, G. R., Andriani, J. M., Enrico, J. M., & Dardanelli, J. L. (2011). Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *European Journal of Agronomy*, *35*(4), 247-254.
- Benjamin, J. G., & Nielsen, D. C. (2006). Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Research*, *97*(2-3), 248-253.
- Calviño, P. A., & Sadras, V. O. (1999). Interannual variation in soybean yield: Interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Research*, *63*(3), 237-246.
- Durán, A., Califra, A., & Molfino, J. H. (1999). *Suelos del Uruguay según soil taxonomy*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/Suelos%20de%20Uruguay%20seg%C3%BAAn%20Soil%20Taxonomy_0.pdf
- Evans, L. T. (1993). *Crop Evolution, Adaptation and Yield*. Cambridge University Press.
- Fehr, W., Caviness, C., Burmood, D., & Pennington, J. (1971). Stage of development descriptions for soybeans, glycine max (L.) Merrill. *Crop Science*, *11*(6), 929-931.
- Fernández, J. C. (1979). Estimaciones de densidad aparente, retención de agua a tensiones de - 1/3 y - 15 bar y agua disponible en el suelo a partir de la composición granulométrica y porcentaje de materia orgánica. En Facultad de Agronomía (Ed.), *2da Reunión Técnica de Facultad de Agronomía* (p. S2). Universidad de la República.
- García Préchac, F., Durán, A., Califra, A., & Hill, M. (s.f.). *Propiedades hídricas de los suelos*. <https://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+hidricas+del+suelo.pdf>
- Giménez, L., & García, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano en dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, *15*(2), 100-108.
- Grzesiak, S., Grzesiak, M. T., Hura, T., Marcinska, I., & Rzepka, A. (2012). Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environmental and Experimental Botany*, *84*, 124-133.
- Kantolic, A. G. (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. 31-44). Servicios y Marketing Agropecuario.

- Kantolic, A. G., Giménez, P. I., & De la Fuente, E. B. (2003). Ciclo ontogénico, dinámica, del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. B. De la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 165-201). Facultad de Agronomía.
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179-204.
- 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.
- Micucci, F. G., & Taboada, M. A. (2006). Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally and zero tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 86(2), 152-162.
- Molfino, J., & Califra, A. (2001). *Agua disponible en las tierras del Uruguay: Segunda aproximación*. MGAP. [https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/Agua%20disponible%20de%20las%20Tierras%20del%20Uruguay%20\(segunda%20aproximaci%C3%B3n\).pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/Agua%20disponible%20de%20las%20Tierras%20del%20Uruguay%20(segunda%20aproximaci%C3%B3n).pdf)
- National Aeronautics and Space Administration. (2021). *Prediction of Worldwide Energy Resources*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2020). *Anuario estadístico agropecuario 2020*. MGAP.
- Rizzo, G. (2018). *Cuantificando las brechas de producción de soja en Uruguay y variables que la determinan* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.
- Sadras, V. O., & Calviño, P. A. (2001). Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. *Agronomy Journal*, 93(3), 577-583.
- Sadras, V. O., Ferreiro, M., Gutheim, F., & Kantolic, A. G. (2002). Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. En F. H. Andrade & V. O. Sadras (Eds.), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja* (pp. 29-60). INTA.
- Silva, A., Ponce de León, J., García, F., & Durán, A. (1988). *Aspectos Metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua en los suelos del Uruguay*. Universidad de la República. https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/31373/1/boletin_de_investigacion_1988_10.pdf