

## COMPORTAMIENTO DEL PROCESO DE INFILTRACIÓN DEL AGUA EN UN SUELO BAJO RIEGO COMPLEMENTARIO

Catalina Romay <sup>1\*</sup>, Claudia Mabel Sainato <sup>1</sup>, Mariano Santiago Iseas <sup>1</sup>, Fabián Lemeillet <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Argentina

### RESUMEN

Dada la diversidad de efectos observados en la infiltración del agua por el riego, resulta de interés profundizar este proceso en un suelo bajo riego complementario y su relación con las propiedades edáficas. El objetivo del presente trabajo fue determinar los cambios en el proceso de infiltración, como consecuencia del riego complementario (pivote central), a través del análisis y modelado de las variables físicas involucradas. Se realizaron veinte ensayos de infiltración (doble anillo), en lotes pertenecientes a la misma unidad cartográfica (serie Chacabuco), con el agua proveniente de las perforaciones. Los tratamientos fueron con riego, y sin riego (secano), en dos momentos del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) (antes de la campaña y posteriores a la cosecha). Se determinó la humedad inicial edáfica, textura, densidad aparente, y se calificó la calidad del agua de riego. Para el análisis se ajustaron los datos de campo a los modelos teóricos de Kostiaikov (1932), Kostiaikov-Lewis (1937), Green and Ampt (1911) y Philip (1957). Se realizó una Prueba t para un diseño apareado de la infiltración básica, conductividad hidráulica y sortividad. Los modelos aplicados y los parámetros obtenidos reflejaron las características texturales de los suelos en estudio. La infiltración ajustada por los modelos de Kostiaikov y Kostiaikov-Lewis, fue coincidente. Inicialmente la tasa de infiltración básica fue mayor en el sector de riego, luego de la campaña disminuyó a valores similares a los de secano. Las mejoras en la infiltración acumulada en el sector de riego debido al cultivo antecesor (trigo (*Triticum aestivum* L.)) no se conservan en el período de tiempo estudiado. La disminución de la tasa de infiltración en el primer minuto se podría explicar por el predominio de iones bicarbonato y sodio del agua de riego y su baja concentración salina, que incrementa el porcentaje de sodio intercambiable en los primeros centímetros de los lotes regados. No se observaron efectos del riego sobre la conductividad hidráulica y la sortividad de los suelos.

**Palabras clave:** flujo en medio poroso, propiedades edáficas, modelos.

## BEHAVIOR OF THE WATER INFILTRATION PROCESS IN A SOIL UNDER SUPPLEMENTARY IRRIGATION

### ABSTRACT

Given the diversity of effects on water infiltration observed under irrigation, it is of interest to deepen the understanding of this process and its relationship with soil properties. The objective of this work was to determine changes in the infiltration process as a consequence of supplementary irrigation (central pivot) through the analysis and modeling of the physical variables involved. Twenty infiltration tests (double ring) were carried out in sites from the same cartographic unit (Chacabuco series) under irrigation with water from the aquifer. The treatments were with and without irrigation (rainfed) at two moments (before corn (*Zea mays* L.) crop season and after corn harvest). Initial water content, texture, and bulk density were determined, and the quality of water was assessed. For the analysis, field data were adjusted to the theoretical models of Kostiaikov (1932), Kostiaikov-Lewis (1937), Green and Ampt (1911), and Philip (1957). A t-test

\* Autor de contacto:  
romay@agro.uba.ar

Recibido:  
00-00-00

Recibido con revisiones:  
00-00-00

Aceptado:  
00-00-00

was performed for a paired design of the steady infiltration rate, hydraulic conductivity, and sortivity. The applied models and the obtained parameters reflected the textural characteristics of the soils under study. The infiltration adjusted by the Kostiakov and Kostiakov-Lewis models was coincident. Initially the steady infiltration rate was higher in the sector under irrigation, but decreased to values similar to those under rainfed conditions at the end of the season. Improvements in the cumulative infiltration in the sector under irrigation due to the preceding crop (wheat (*Triticum aestivum* L.)) were not preserved in the period under study. The decrease in the infiltration rate during the first minute could be explained by the predominance of bicarbonate and sodium ions in the irrigation water and its low saline concentration, increasing of the exchangeable sodium percentage in the first centimeters of the irrigated sites. No effects of irrigation on the hydraulic conductivity and sortivity of the soils were observed.

**Keywords:** flow in porous medium, soil properties, models.

## INTRODUCCIÓN

El suelo y el agua son recursos naturales muy valiosos, donde la intervención humana en su manejo ha conducido a graves consecuencias tanto ecológicas como socio económicas. Hoy existe el desafío de producir alimentos en forma sustentable para una población mundial creciente, lo cual demanda actuar con responsabilidad dentro de la conservación de los recursos suelo y agua (Martínez et al., 2010).

El monitoreo de los cambios en los indicadores de calidad de suelo y del agua podría determinar si un sistema de manejo está en una situación de estabilidad, de mejora o de degradación (Shukla et al., 2006). El conocimiento de las propiedades del suelo tiene una gran utilidad en la planificación de los usos posibles, reflejando la disponibilidad de nutrientes, agua y la dinámica del crecimiento de las raíces y puede ayudar a entender cómo su manejo influye en la calidad del suelo (Demattê et al., 2017).

En los últimos años, el sector agropecuario argentino ha presentado cambios profundos en los sistemas productivos, entre ellos, un incremento notable de la superficie destinada a la producción agrícola en detrimento de las actividades ganaderas, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2015). Por ello, la degradación y deterioro de las propiedades físicas y químicas de los suelos como resultado del uso agrícola, está presente en prácticamente la totalidad de las tierras agrícolas bajo cultivo (Botta et al., 2010).

El productor agropecuario de la región pampeana húmeda, en algunos casos optimizó su actividad económica con la adopción del riego complementario al conjunto de prácticas de manejo agronómico de cereales, forrajeras y oleaginosas, utilizando sistemas mecanizados como el pivote central. El riego complementario consiste en aplicar láminas de agua cuando la humedad del suelo no satisface las necesidades hídricas del cultivo, durante etapas fenológicas sensibles al mismo, y para estabilizar y maximizar los rendimientos (Salinas et al., 2016).

La factibilidad técnica, económica y financiera del riego complementario de cultivos extensivos en la región núcleo maicera, fue demostrada con los resultados del Proyecto del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA, 1988) y la sustentabilidad del sistema de manejo agronómico bajo riego complementario fue garantizada por Génova (2007). A pesar de los efectos positivos del riego, la evaluación del impacto de esta práctica sobre la calidad del suelo constituye un aspecto central para la producción sustentable.

La principal fuente de agua para riego en la Provincia de Buenos Aires es de localización subterránea, alojada en los acuíferos Pampeano, Puelche, siendo en su mayoría de naturaleza química bicarbonatada sódica y, por lo tanto, puede conducir a procesos de salinización y/o sodificación de suelos (Lavado, 2009). Álvarez et al. (2020), evaluando el efecto del riego complementario sobre el suelo y los cultivos en la región sub-húmeda pampeana, concluyeron que el agua subterránea disponible para riego en dicha área contiene sales (entre 0,2 y 4,7 dS m<sup>-1</sup>), generalmente con predominio de bicarbonatos y una relación de adsorción de sodio (RAS), entre 0,4 y 58.

Richmond (2012) expresó que, en una agricultura moderna, es fundamental mejorar la calidad de diagnóstico del funcionamiento físico del suelo con la finalidad de elaborar mejores estrategias de manejo. Una de estas metodologías de diagnóstico es la medición de la capacidad de infiltración de los suelos.

Shukla (2014) definió la infiltración, como la entrada de agua en la zona no saturada a través de la interface suelo-aire, siendo un proceso físico importante para la ciencia del suelo, en el campo agronómico y en las ciencias ambientales. Interviene en la mayoría de los modelos de transporte de agua y solutos, e influye en varios procesos, como predicción de escurrimientos, transporte de sedimentos y control de inundaciones. Además, dicho proceso es utilizado para la estimación de la disponibilidad de agua para el crecimiento de los cultivos, constituyendo un parámetro esencial en la planificación, diseño y operación de los sistemas de riego en la parcela (Grassi, 1988). También, la capacidad de infiltración es ampliamente usada en la evaluación de la calidad física del suelo, como estimaciones de recarga y evaluación del potencial de contaminación de acuíferos (Márquez Molina, 2020).

A su vez, la infiltración depende de las propiedades físicas y químicas del suelo. Desafortunadamente, es un proceso difícil de determinar con confiabilidad y precisión, debido a la influencia de múltiples factores, asociados a la ocurrencia de cambios en las características de los suelos, a la posición que ocupan los mismos en el paisaje, a la profundidad analizada, a los instrumentos y métodos de medición, como así también al error experimental, al diferente uso de la tierra y fundamentalmente a las variaciones de las propiedades edáficas en el espacio y en el tiempo. Dentro de los factores naturales que pueden afectar la tasa de infiltración, además del contenido de agua edáfico inicial y la intensidad de la lluvia, se incluyen la textura, estructura, y profundidad del suelo, tamaño, forma y conectividad de los poros, actividad biológica de lombrices (galerías) y contenido de materia orgánica (Shukla et al., 2006).

El proceso de infiltración y su efecto sobre las propiedades físico-químicas del suelo, ha sido estudiado en numerosas aplicaciones agropecuarias, con la finalidad de analizar el proceso de degradación de las propiedades edáficas. Martínez et al. (2010) analizaron el proceso de infiltración con anillos de Muntz, para elaborar estrategias de manejo de la producción animal, que tengan en cuenta los riesgos de contaminación. Estos autores determinaron que la tasa de infiltración básica disminuía a la mitad de su valor, en los sectores con muy alta carga animal respecto del suelo testigo. Relacionando las prácticas culturales y la calidad del agua en el proceso de infiltración (Torres Dugan et al., 2012) estudiaron las propiedades físico-químicas de un Argiudol Típico de la Pampa Ondulada con textura franca, bajo siembra directa y riego complementario, siendo el agua utilizada de baja conductividad eléctrica y sodicidad intermedia. Dichos investigadores concluyeron que la tasa de infiltración, determinada por el método Soil Quality Institute (1999), era menor en el tratamiento bajo riego respecto al de secano, aunque al mismo tiempo no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, mostrando una gran variabilidad espacial en los sitios bajo riego. Siguiendo la misma línea de investigación, Lozano et al. (2016) estudiaron la variación temporal de la configuración del sistema poroso del suelo y del flujo de agua bajo siembra directa y labranza convencional, utilizando el infiltrómetro de disco tensión de Perroux and White, (1988). En este trabajo se encontró que el efecto de la labranza sobre estas propiedades tiene poca persistencia, dado que las mejoras en la conectividad de poros inducidas por la maquinaria no se mantienen a través de la temporada de crecimiento. A su vez, el efecto de aumento en la tasa de infiltración debido a la descompactación del suelo previo a la siembra no persistió hasta los últimos estadios de crecimiento del cultivo. Estos resultados se vuelven a apreciar en el trabajo de Sainz et al. (2018), quienes analizaron la infiltración con y sin cobertura en un Argiudol Típico bajo siembra directa con un microsimulador de lluvias. Concluyeron que los parámetros de infiltración no difieren entre un suelo cubierto y desnudo. Por su parte, estos autores señalaron que, debido a la elevada variabilidad posiblemente generada por diferencias estructurales superficiales, serían necesarios más estudios a futuro, incrementando la cantidad de repeticiones a fin de obtener resultados concluyentes sobre el comportamiento de esta variable. Contrariamente Karlim et al. (2019) estudiaron la capacidad de infiltración según el cambio de uso del suelo, determinando que ésta se modifica debido a la alteración de la porosidad, densidad y/o textura de los suelos a nivel superficial o sub-superficial, como consecuencia de disturbios físico-químicos. Además, Karlim et al. (2019) mostraron que la capacidad de infiltración se incrementa a medida que transcurre el tiempo desde la supresión de las actividades agrícolas. Giubergia et al. (2021) investigaron el efecto del riego complementario sobre el suelo y el rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en el centro norte de la provincia de Córdoba. Dichos autores, utilizando el método de anillo único del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA) (1999), determinaron una tasa de infiltración elevada y muy variable, sin mostrar cambios en el suelo después de 17 años de la aplicación del riego.

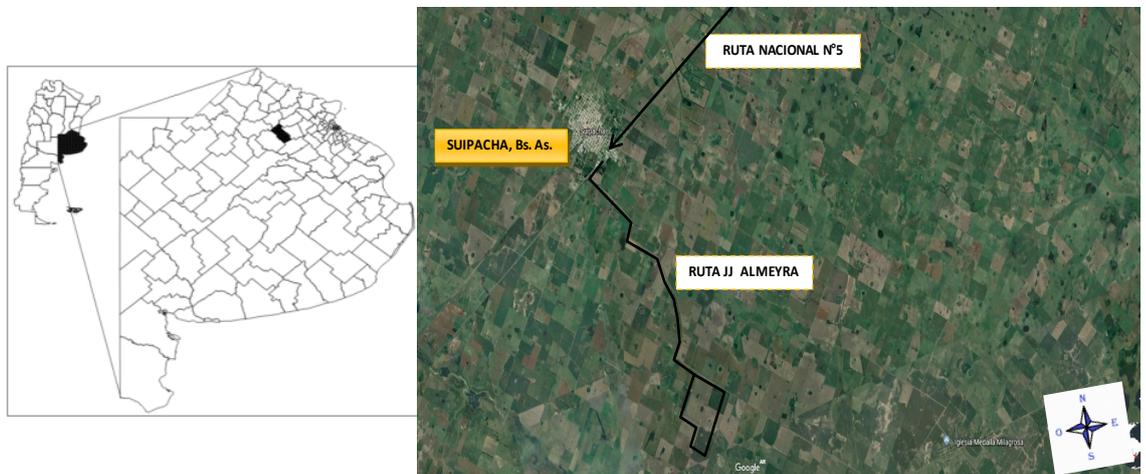
Dada la diversidad de efectos observados en la infiltración del agua por acción del riego, resulta entonces de interés profundizar las características de este proceso en un suelo bajo riego complementario y su relación con las propiedades edáficas. En este sentido, el modelado de las curvas de infiltración proporciona

con mayor precisión los parámetros hidráulicos de interés, brindando información sobre la cantidad de agua disponible en el perfil para los cultivos. Se plantea como hipótesis que la infiltración se verá modificada por la práctica del riego complementario en forma diferencial. El objetivo del presente trabajo fue determinar los cambios en el proceso de infiltración, como consecuencia del riego complementario con sistema de pivote central, en un establecimiento de la Pampa Ondulada, a través del análisis y modelado de las variables físicas involucradas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación y características hidrogeológicas, edáficas, climáticas y de manejo del área de estudio.

El área de estudio es un establecimiento agrícola, (Estancia "La Alicia") ubicado en el partido de Suipacha, Provincia de Buenos Aires, a 10 km S – SE por un camino vecinal de la localidad de Suipacha (Figura 1). Las coordenadas son: 34°51'54,97" S 59°39'28,49"O. Su superficie es de 352,1 hectáreas dividida en cinco sectores. Este establecimiento se encuentra dentro de la Pampa Ondulada, en el límite con la Pampa Deprimida, en un paisaje con suaves pendientes, clima templado húmedo con precipitaciones cercanas a los 1000 mm anuales. El área de estudio se encuentra en una zona alta en el límite de dos cuencas: Salado y Luján, lo que favorece el buen drenaje en la mayor parte del establecimiento. El escurrimiento superficial se produce en sentido sur – suroeste.



**Figura 1:** Mapa de la provincia de Buenos Aires mostrando el partido de Suipacha, e imagen Google Earth detallando la ubicación del establecimiento "La Alicia".

**Figure 1:** Map of the province of Buenos Aires showing Suipacha district and image Google Earth with the location of the field "La Alicia".

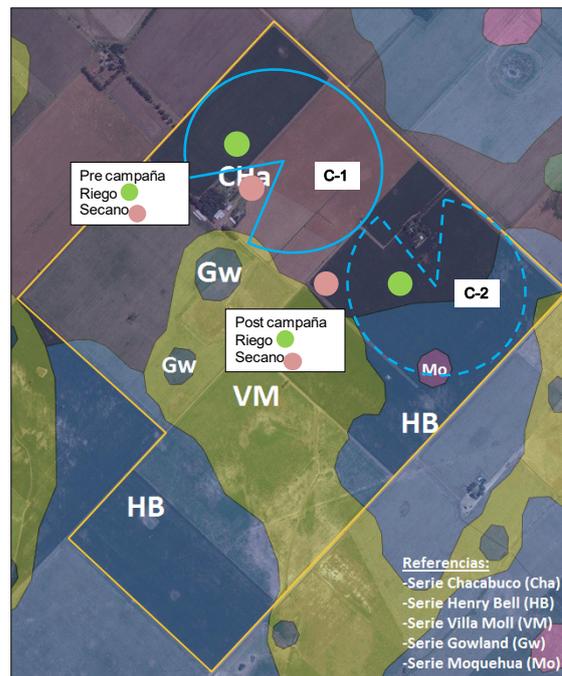
El establecimiento, con cultivos extensivos bajo siembra directa, adquirió dos equipos de riego por pivote central desde la campaña 2010 – 2011, incorporando riego complementario al manejo productivo del maíz comercial, y en menor escala a la producción de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) de primera, o trigo (*Triticum aestivum* L.) con soja de segunda. Los pivotes quedan fijos durante toda la campaña en el círculo de riego destinado a la producción de maíz, no obstante, pueden moverse para completar las necesidades de agua de algún otro cultivo. Las secuencias de cultivos durante las campañas de evaluación fueron maíz/ trigo – soja de segunda /maíz. Siguiendo el esquema tradicional de rotaciones el pivote central aplica agua cada dos años con láminas de riego, que en general no superan los 300 mm por campaña agrícola. Los suelos predominantes son Argiudoles típicos pertenecientes, a la serie Chacabuco, los cuales son de textura franco limosa o franco limo-arcillosa, profundos, bien provistos de materia orgánica, no alcalinos, no sódicos y bien drenados (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 1989), características que coinciden con un análisis del perfil del suelo (comunicación personal del productor). El agua de riego se obtiene de tres perforaciones interconectadas, con una profundidad promedio de 45 m, proveniente del acuífero Pampeano Puelche (Epipuelche) (Auge, 2004).

### Ensayos de infiltración y mediciones de propiedades edáficas:

Entre los métodos para caracterizar el proceso de infiltración se encuentra el infiltrómetro de doble anillo, método de campo tradicional, que responde fundamentalmente al tipo de flujo dominante vertical. La va-

riabilidad en los resultados es menor ya que se abarca un mayor volumen de suelo que el infiltrómetro de disco tensión descritos por Perroux and White (1988), método que permite cuantificar el proceso de infiltración a través de los macroporos. Por su parte, los simuladores de lluvia se utilizan mayoritariamente para tratar de reproducir la disrupción producida por la gota de lluvia sobre el suelo, y evaluar el efecto del golpeo o "splash" (energía cinética) y de la cobertura superficial de los suelos (Castiglione, 2018). La ventaja de la utilización de los infiltrómetros de doble anillo es que el agua está almacenada en la superficie, y es el suelo el que determina la capacidad de infiltración. Mientras que, si el agua es aplicada a una determinada velocidad, como ocurre en el riego por aspersión, la capacidad de infiltración dependerá de la intensidad de la precipitación más que de las características del suelo (Hillel, 2013).

Se utilizó un equipo compuesto por cinco infiltrómetros de doble anillo, (anillo de Muntz, estandarizado por el USDA, "Cylinder Infiltrometers"). Las evaluaciones de infiltración, usando el agua proveniente de las perforaciones, se realizaron en dos círculos de riego C-1 y C-2 (figura 2), correspondiendo a la misma unidad cartográfica (serie Chacabuco). En el círculo C-2, siguiendo el esquema tradicional de siembra y rotaciones del establecimiento, se sembró maíz temprano en primavera verano. En el período de barbecho, en otoño invierno, tres meses posteriores a la cosecha de maíz (identificado como post campaña) se realizaron los ensayos de infiltración, 5 repeticiones que corresponden al área de influencia del círculo de riego (tratamiento Riego, R) y 5 repeticiones en una esquina del lote que no recibe riego – corners - (tratamiento seco, S). Las evaluaciones se realizaron durante dos días consecutivos debido al tiempo que demandan los ensayos. El sistema de riego pivote central se trasladó al círculo C-1, primavera verano, donde se realizaron las evaluaciones previo a una nueva campaña de maíz (identificado como pre campaña) y formando parte de la secuencia de cultivos con trigo y soja de segunda en siembra directa. Allí en el lapso de dos días se realizaron 5 repeticiones correspondientes al área de influencia del pivote central (R) y 5 repeticiones en el área fuera del círculo (S), en este caso se ubicaron cerca del casco. La Figura 2 muestra el esquema de los círculos de riego, el momento de las campañas de evaluación (pre y post campaña) indicando con un punto el lugar donde se realizaron las repeticiones de cada tratamiento (R y S), junto con el mapa de suelos de la zona.



**Figura 2:** Mapa de suelos del establecimiento "La Alicia" mostrando los sectores donde se hicieron los ensayos de infiltración bajo los dos tratamientos.

**Figure 2:** Soil map of the farm "La Alicia" showing the sites where infiltration tests were done under the two treatments.

Para complementar cada evaluación, se tomaron muestras compuestas de suelo a las profundidades de 0-20 y 20-40 cm para la caracterización de su textura por el método del volumen de sedimentación (VS), (Nijenshon 1978). Además, se extrajeron muestras sin disturbar mediante cilindros metálicos de volumen

conocido, para determinar la densidad aparente (DAP) en ambas profundidades. Con barreno y pesafiltros de aluminio se extrajeron muestras para determinar la humedad gravimétrica ( $W_g$ ). Estas se pesaron con el suelo húmedo para luego llevarlas a estufa donde se secaron a 105°C, determinando peso seco (Page et al., 1982). Se calculó la humedad volumétrica ( $W_v$ ) a partir de  $W_g \cdot DAP$ . Se calculó la porosidad total (P) utilizando la información de DAP y densidad real (DRE). La DRE es una propiedad que no depende del manejo pero sí de la contribución del material constitucional. Se consideró como valor representativo de DRE 2650 kg m<sup>-3</sup>. Se extrajeron muestras de agua de las tres perforaciones para determinar su calidad y clasificarla a partir de FAO (Ayers & Westcot, 1987) e INTA (proyecto IPG, 1999). Esta última clasificación se ajusta mejor a las condiciones edafoclimáticas de la región pampeana.

#### Modelos de infiltración:

La infiltración está gobernada por dos factores: la tensión superficial y la fuerza de la gravedad y está limitada por la fuerza viscosa involucrada en el flujo de ingreso en los poros del suelo cuantificado en términos de la permeabilidad (Shukla, 2014). Se han desarrollado modelos matemáticos para describir este movimiento del agua por la porosidad media, particularmente la porosidad vertical. Para el análisis propuesto en este trabajo se aplicaron los siguientes modelos para determinar las variables físicas involucradas de interés agrícola:

(a) Modelos de Kostiakov (1932):

$$i = at^b \quad (1)$$

$$I = At^B \quad (2)$$

Siendo:

$i$  = tasa de infiltración (mm min<sup>-1</sup>)

$I$  = infiltración acumulada (mm)

$t$  = tiempo (min)

$a$  en (mm min<sup>-(1+b)</sup>),  $b$ ,  $A$  en (mm), y  $B$  son los coeficientes empíricos.

(b) Modelo de Kostiakov-Lewis (1937):

$$I = At^B + i_b t \quad (3)$$

Siendo:

$I$  = infiltración acumulada (mm)

$t$  = tiempo en (min)

$i_b$  = tasa de infiltración básica (mm h<sup>-1</sup>)

$A$  y  $B$  son los parámetros de ajuste empírico.

(c) Modelo simplificado de Green and Ampt (1911):

$$i = K_s + \frac{B}{t} \quad (4)$$

Siendo:

$i$  = tasa de infiltración, (mm min<sup>-1</sup>)

$I$  = infiltración acumulada, (mm)

$K_s$  = conductividad hidráulica saturada, (mm min<sup>-1</sup>), y

$B$  = constante

(d) Modelo de Philip (1957):

$$i = \frac{1}{2} St^{-1/2} + C \quad (5)$$

Siendo:

$i$  = tasa de infiltración ( $\text{mm min}^{-1}$ )

$t$  = tiempo (min)

$S$  = sortividad ( $\text{mm min}^{-1/2}$ )

$C$  = coeficiente empírico ( $\text{mm min}^{-1}$ )

#### Análisis de datos:

Los datos de los ensayos (tasa de infiltración) se representaron en gráficos de dispersión, y se les ajustó una función de acuerdo al modelo potencial propuesto por Kostiakov, (1937), (ec. 1). El parámetro,  $a$ , está vinculado a las condiciones iniciales de humedad del suelo y se puede asociar al valor de la tasa de infiltración en el primer minuto, mientras que el exponente  $b$ , adimensional, con valores entre 0 y -1, depende del tipo de suelo (textura y estructura) y del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo;  $b$  no es constante, se incrementa con el tiempo ya que la fuerza mátrica disminuye con el tiempo mientras que la fuerza gravitatoria sobre la solución del suelo permanece constante. Sin embargo,  $b$  puede asumirse constante para valores de láminas acumuladas de 25 mm a 125 mm. Si se integra la  $i$ , entre los límites 0 y  $t$  se obtiene la infiltración acumulada ( $I$ ), (ec. 2), con  $A$  y  $B$ , coeficientes empíricos que expresan, la infiltración acumulada en el primer minuto y un exponente adimensional con valores entre 0 y 1, respectivamente.

De acuerdo con el Servicio de Conservación de Suelos del USDA, la tasa de infiltración constante ó básica ( $i_b$ ), es el valor instantáneo, cuando su velocidad de cambio para un período estándar es de 10 % o menor de su valor. Los datos de  $i_b$ , de cada repetición, se obtuvieron de las últimas lecturas constantes de los ensayos de campo de la tasa de infiltración.

Del Barrio (1984), al medir la capacidad de infiltración de los principales grandes grupos de suelos de la Región Pampeana, concluyó que la ecuación de Kostiakov-Lewis (1937) era la más aconsejable para representar el proceso de infiltración medido a campo con doble anillo. A través del procedimiento de optimización no lineal, minimizando los errores entre los valores del modelo teórico y los datos medidos, se estimaron los parámetros de la ecuación de infiltración acumulada de Kostiakov-Lewis (1937), (ec. 3).

La ecuación de infiltración de Green and Ampt (1911) (ec. 4), asume varias simplificaciones físicas para desarrollar una relación matemática que permite calcular la infiltración acumulada ( $I$ ) y la tasa de infiltración ( $i$ ). Mediante la representación gráfica de la tasa de infiltración ( $i$ ) en función de la inversa de infiltración acumulada ( $I^{-1}$ ), se estimó la  $K_s$ . Por último, en la ecuación proporcionada por Philip (1957) (ec. 5) la infiltración acumulada ( $I$ ) y la tasa de infiltración ( $i$ ), se expresan en función de la sortividad ( $S$ ) y un coeficiente ( $C$ ), relacionado con la capacidad del suelo de transmitir agua. A partir de la representación gráfica de la tasa de infiltración ( $i$ ) en función de la inversa de la raíz cuadrada del tiempo ( $t^{1/2}$ ) se estimó la  $S$  (Shukla, 2014).

#### Análisis estadístico:

Se presenta un análisis descriptivo de las variables respuestas de las propiedades físicas de los suelos VS, DAP, P y Wv%, presentando sus coeficientes de variación (%). La calidad del agua resume el promedio de los resultados de las muestras extraídas de las tres perforaciones ya que las mismas están interconectadas para dar agua al sistema de riego.

Se ajustó un modelo potencial promedio de Kostiakov (ec. 1, y 2), obteniendo sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) correspondientes. Se acompaña estos resultados con un gráfico de caja de los parámetros de ajuste empíricos ( $a$ , y  $b$ ).

El ajuste de los modelos obtenidos de infiltración acumulada de Kostiakov-Lewis (1937), (ec. 3), se evaluaron a través de la suma de los cuadrados de los errores (SSE) para los tratamientos R y S, pre y post campaña. Los parámetros de ajuste empíricos ( $A$  y  $B$ ), se presentaron en un gráfico de caja y se realizó un análisis de correlación entre parámetros de ajuste de ambos modelos ( $A$  y  $B$ , ec. Kostiakov (1932),  $A$  y  $B$  ec. Kostiakov-Lewis(1937)) a través de una regresión lineal, para ver el grado de asociación entre los modelos. Se realizó un análisis estadístico para evaluar diferencias significativas entre los tratamientos R y S, para  $i_b$ , (datos de campo y del modelo de Kostiakov-Lewis (1937)),  $K_s$  y  $S$  a través de una Prueba t para un diseño apareado. Se analizaron los resultados de los tratamientos R y S en pre-campaña y post-campaña por separado, y luego se hizo el análisis incluyendo todos los resultados de R y S.

Las correlaciones se hicieron con el programa Excel de Microsoft, y con la herramienta SOLVER la optimización no lineal. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa InfoStat (Di Rienzo et al., 2015).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades físicas del suelo:

La Tabla 1 resume los valores promedio del volumen de sedimentación de las dos profundidades analizadas, y concuerdan con la textura de la Serie Chacabuco (franco limoso), aunque en algunos casos esta fue franco limo-arcilloso.

**Tabla 1:** Valores del volumen de sedimentación del suelo a diferentes profundidades, para los tratamientos Riego y Secano, de pre y post campaña de maíz.

**Table 1:** Volume of soil sedimentation values at different depths for Irrigated (Riego) and Rainfed (Secano) treatments before and after the corn growing season.

Época	Tratamientos	Estrato (cm)	VS promedio	Clasificación textural
			(mL % g)	
Pre campaña	Riego	0 – 20	113 ( $\pm 1$ )	Franco Limoso
		20 – 40	113 ( $\pm 1$ )	Franco Limoso
	Secano	0 – 20	117 ( $\pm 1$ )	Franco Limo Arcilloso
		20 – 40	118 ( $\pm 1$ )	Franco Limo Arcilloso
Post campaña	Riego	0 – 20	107 ( $\pm 1$ )	Franco Limoso
		20 – 40	106 ( $\pm 1$ )	Franco Limoso
	Secano	0 – 20	118 ( $\pm 1$ )	Franco Limo Arcilloso
		20 – 40	115 ( $\pm 1$ )	Franco Limo Arcilloso

VS volumen de sedimentación promedio de las repeticiones expresado en mililitros por cien gramos  $\pm$  su indeterminación absoluta.

VS mean sedimentation volume of replicates expressed in milliliters per hundred grams  $\pm$  its absolute uncertainty.

La DAP y la P correspondiente a los tratamientos R y S, pre- y post-campaña para las dos profundidades analizadas, se resume en la Tabla 2. Los valores de densidad aparente variaron entre 1,12 y 1,49 g cm<sup>-3</sup>, coincidiendo con los generalmente observados en el área de estudio (Álvarez et al., 2021). Tanto los resultados de DAP y P arrojaron un coeficiente de variación (CV) entre 3,6 y 17,8 % mostrando que el conjunto de datos es homogéneo.

**Tabla 2:** Valores de densidad aparente y porosidad del suelo a diferentes profundidades, para las situaciones Riego y Secano pre- y post-campaña del maíz.

**Table 2:** Bulk density and soil porosity values at different depths for Irrigated (Riego) and Rainfed (Secano) conditions before and after the corn growing season.

Época	Tratamientos	Estrato (cm)	DAP (g cm <sup>-3</sup> )	CV <sub>DAP</sub> (%)	P (%)	CV <sub>P</sub> (%)
Pre-campaña	Riego	0 – 20	1,36 (±0,02)	3,6	48,6 (±0,7)	3,9
		20 – 40	1,39 (±0,02)	5,4	47,6 (±0,7)	6,0
	Secano	0 – 20	1,35 (±0,02)	12,6	49,1 (±0,7)	13,1
		20 – 40	1,49 (±0,02)	13,8	43,6 (±0,7)	17,8
Post-campaña	Riego	0 – 20	1,14 (±0,02)	7,1	56,8 (±0,7)	5,4
		20 – 40	1,14 (±0,02)	8,6	56,9 (±0,7)	6,5
	Secano	0 – 20	1,12 (±0,02)	11,4	57,7 (±0,7)	8,3
		20 – 40	1,31 (±0,02)	5,1	50,6 (±0,7)	5,0

DAP: Densidad aparente ± su indeterminación absoluta, CV<sub>DAP</sub>: coeficiente de variación de la densidad aparente, P porosidad ± su indeterminación absoluta, CV<sub>P</sub>: coeficiente de variación de la porosidad.

Las indeterminaciones absolutas presentan el orden de magnitud del instrumental empleado para su determinación.

DAP: bulk density ± its absolute uncertainty, CV<sub>DAP</sub>: coefficient of variation of bulk density, P porosity ± its absolute uncertainty, CV<sub>P</sub>: coefficient of variation of porosity. Absolute uncertainty presents the order of magnitude of the instruments used for their determination.

A partir de los datos de humedad gravimétrica extraídas antes del ensayo de infiltración, se calculó la humedad volumétrica. La Tabla 3 muestra los resultados de esta variable para los tratamientos R y S, pre- y post-campaña.

**Tabla 3:** Valores de humedad volumétrica, para los tratamientos Riego y Secano, pre- y post-campaña.

**Table 3:** Volumetric moisture values for Irrigated (Riego) and Rainfed (Secano) treatments before and after the corn growing season.

Época	Tratamientos	Wv %	CV <sub>Wv</sub> %
Pre-campaña	Riego	37,1 (±0,1)	4,6
	Secano	36,9 (±0,1)	9,2
Post-campaña	Riego	36,6 (±0,1)	3,1
	Secano	36,5 (±0,1)	7,7

Wv: contenido hídrico volumétrico ± indeterminación absoluta; CV<sub>Wv</sub> coeficiente de variación del contenido hídrico volumétrico.

Wv: volumetric water content ± absolute uncertainty; CV<sub>Wv</sub> coefficient of variation of volumetric water content.

El proceso de infiltración se ve afectado por el contenido de humedad del suelo, por lo cual es importante que el contenido de humedad sea el mismo para comparar valores de la tasa de infiltración del mismo sitio. Tanto en pre como en post campaña, en los tratamientos R y S, el contenido hídrico del suelo previo a los ensayos de infiltración resultó similar y cuyo CV % es menor a 9,2 %, mostrando que el conjunto de datos es homogéneo.

#### Calidad del agua:

Los resultados del análisis de calidad del agua representan el promedio de los valores obtenidos en las tres perforaciones que alimentan al sistema de riego, ya que todos extraen agua del mismo acuífero Pampeano. La Tabla 4 muestra los valores de las variables analizadas.

**Tabla 4:** Valores promedio de las variables físico-químicas del agua subterránea utilizada para riego.

**Table 4:** Average values of the physico-chemical variables of groundwater used for irrigation.

Variable	Valor	Variable	Valor
CEa (dS m <sup>-1</sup> )	1,2	pH	8,3
RAS	2,7	CSR (meq L <sup>-1</sup> )	4,0
Calcio (meq L <sup>-1</sup> )	3,8	Carbonatos (meq L <sup>-1</sup> )	1,7
Magnesio (meq L <sup>-1</sup> )	2,8	Bicarbonatos (meq L <sup>-1</sup> )	8,9
Potasio (meq L <sup>-1</sup> )	0,4	Cloruros (meq L <sup>-1</sup> )	1,2
Sodio (meq L <sup>-1</sup> )	4,9	Sulfatos (meq L <sup>-1</sup> )	0,3
Fosfatos (mg L <sup>-1</sup> )	0,3		
Nitratos (mg L <sup>-1</sup> )	2,3	Dureza (mg L <sup>-1</sup> )	6,6

CEa: conductividad eléctrica aparente, RAS Relación de Adsorción de Sodio, CSR Carbonato de Sodio Residual.

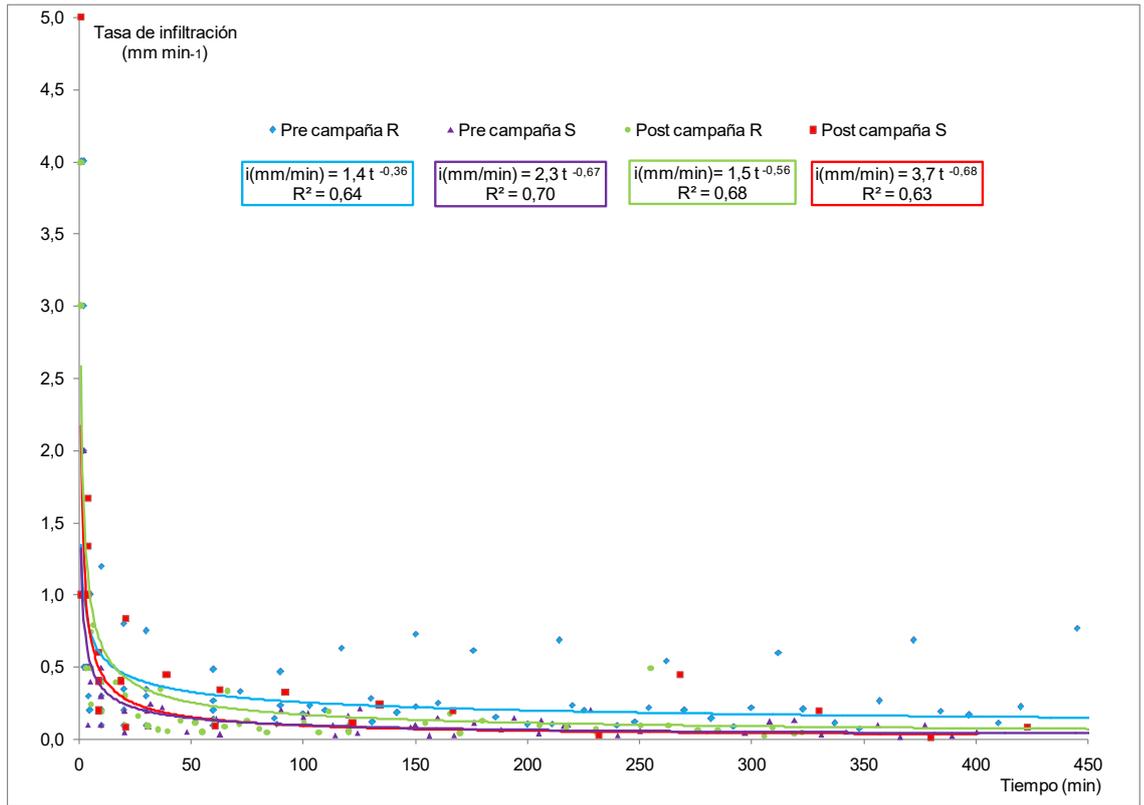
CEa: bulk density, RAS Sodium Adsorption Ratio, CSR Residual Sodium Carbonate.

Se observa que el agua subterránea usada para riego es bicarbonatada sódica. Estos resultados concuerdan con los antecedentes de la región norte de Buenos Aires, (Alvarez et al., 2016). Utilizando la clasificación desarrollada por Ayers and Wetscot (1987), indica un grado de restricción de uso bajo a moderado en salinidad por los valores de conductividad eléctrica del agua (CEa) y ninguna restricción en cuanto al impacto en la permeabilidad del suelo por presencia de sodio en el agua, criterio que surge de la combinación de la relación de adsorción de sodio (RAS) y CEa. La "restricción de uso" indica que el uso del agua puede ser una limitante, y que algún manejo especial se necesite para alcanzar la máxima capacidad de producción. La clasificación específica realizada por INTA (1999) para la región Pampeana, nos indica que esta agua podría clasificarse como "segura" para el riego en función de su salinidad. Por otro lado, de acuerdo con su grado de sodicidad, se clasifica como "aceptables" ya que se encontró un RAS menor a 10 y se cumplen con las condiciones edáficas propuestas en dicha clasificación (Argiudoles bien provistos de materia orgánica y una lámina de riego aplicada entre 100-300 mm año<sup>-1</sup>). Por otro lado, tanto la dureza como las concentraciones de nitratos y fósforo presentan valores bajos y aceptables (Sainato et al., 2006).

#### Infiltración:

Dos de los ensayos de infiltración del sector de secano post campaña fueron desestimados debido al rápido ingreso del agua al perfil, comportamiento atípico para esta clase textural. En estos ensayos se produjeron valores muy altos de velocidad de infiltración, por la presencia de canales o vías de flujos preferencial debajo de los infiltrómetros.

En la Figura 3 se exponen las curvas de tasa de infiltración y el modelo de ajuste de Kostiakov (1932) (ec. 1) diferenciados por tratamiento.



**Figura 3:** Tasa de infiltración obtenida a campo y ajustada con el modelo (ec.1) de Kostiakov (1932), para riego (R) y seco (S), en pre y post campaña de maíz.

**Figure 3:** Infiltration rate fitted to Kostiakov model (1932) (ec.1) under irrigation (R) and rainfed (S) conditions before and after the corn growing season.

La Figura 4 representa el gráfico de caja, herramienta de diagnóstico que muestra la variabilidad, el grado de simetría, y el centro de localización de los parámetros de ajuste empíricos (a, b).

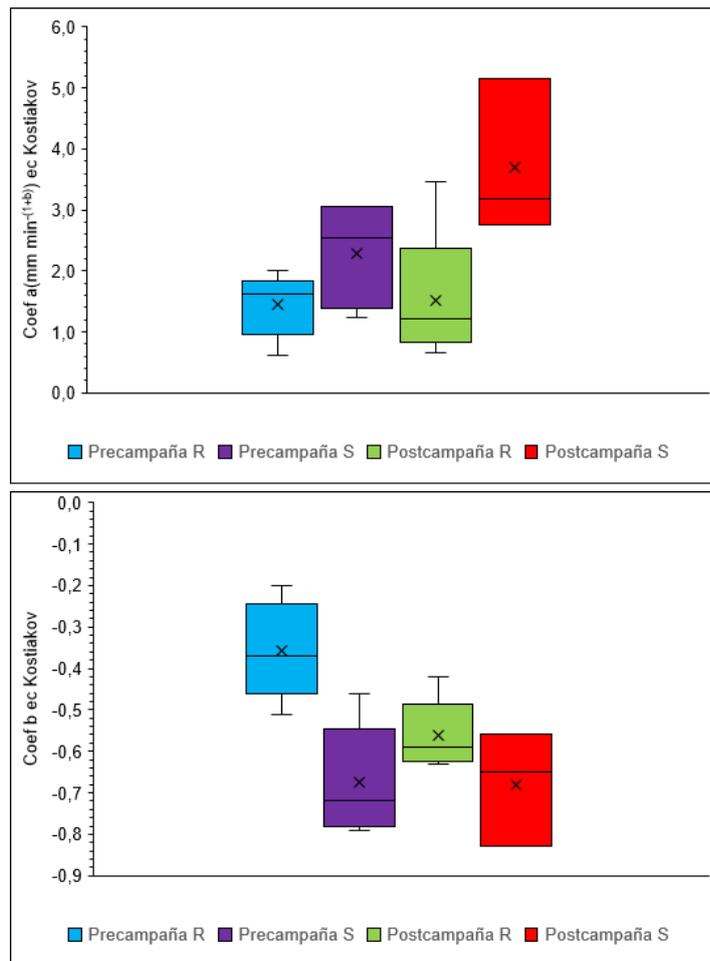


Figura 4: Gráfico de caja de los coeficientes de ajuste empírico (a, b) (ec 1) del modelo de Kostiakov-Lewis (1937).

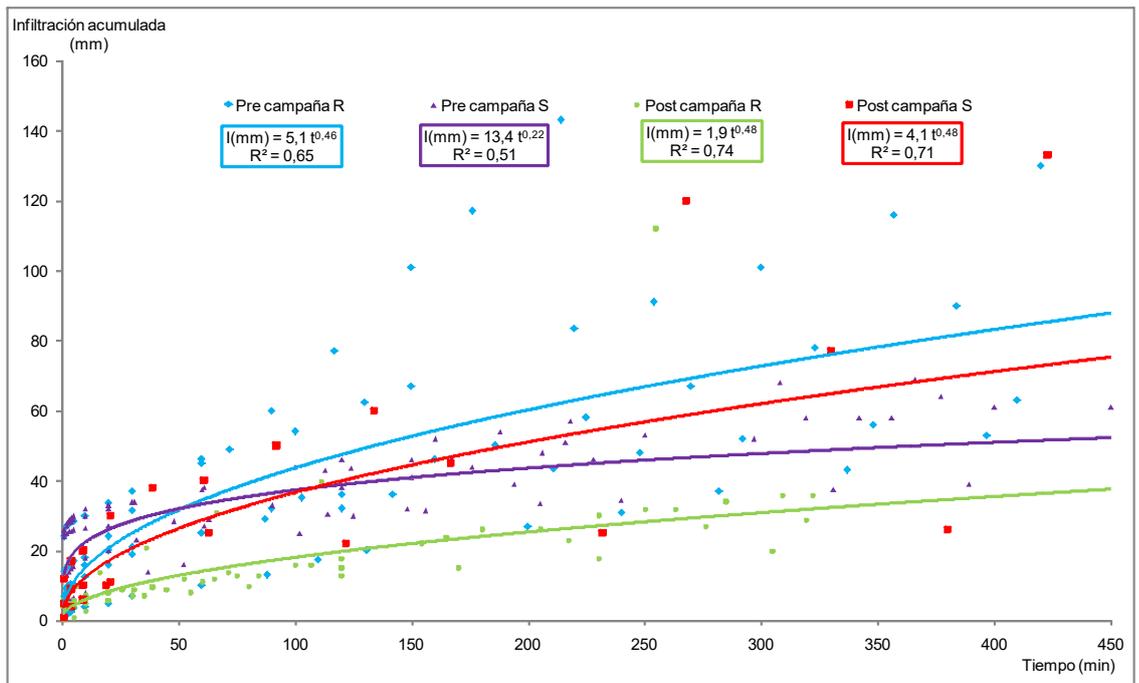
Figure 4: Box plot of the empirical fit coefficients (a, b) (ec 1) of the Kostiakov-Lewis (1937) model.

Los modelos ajustados muestran una tasa de infiltración inicial que disminuye rápidamente. El coeficiente  $a$  de la ecuación ajustada de la tasa de infiltración de Kostiakov representa la velocidad de infiltración en el primer minuto. Depende del contenido hídrico inicial y está relacionado con la sortividad. El gráfico de caja Figura 4, revela una variabilidad pequeña del parámetro de ajuste  $a$ , salvo el caso del tratamiento S post campaña, recordando que dos de los ensayos se perdieron. También se observa que los valores numéricos obtenidos de los modelos en el tratamiento R de pre y post campaña son menor que los de S. El 75 % de los valores obtenidos de  $a$  del tratamiento R en pre campaña y post campaña son menores a  $1,6 \text{ mm h}^{-1}$  y  $2,0 \text{ mm h}^{-1}$  respectivamente, mientras que en S el 75 % son menores a  $3 \text{ mm h}^{-1}$  en S pre-campaña y  $5 \text{ mm h}^{-1}$  en S post campaña. Boers et al. (1992) evaluaron la tasa de infiltración en suelos franco arcillosos y franco arenosos regados por aspersión, encontrando una menor tasa de infiltración en el primer minuto debido al sellado de la superficie del suelo y formación de costra, generalmente asociado con la energía de impacto de las gotas de agua en la superficie del suelo. La energía del impacto de las gotas de agua está directamente influenciada por la presión y el tipo de aspersor, (diámetro de la boquilla, tipo de deflector), y asociado con la presión del agua que puede generar diferentes distribuciones de tamaño de gota y por lo tanto diferentes energías de impacto de dichas gotas. Deberían hacerse estudios específicos para corroborar tal suposición.

El valor promedio del exponente  $b$  de todos los ensayos realizados resultó igual a  $-0,57$ . Comparando este resultado con la familia de curvas de infiltración del Servicio de Conservación del Recursos Naturales del USDA (USDA-NRCS, 2012) el valor refleja la textura predominante de los suelos de los lotes ensayados, franco limosa y franco limo arcillosa. El gráfico de cajas de  $b$ , Figura 4 muestra poca variabilidad de los datos de las repeticiones, pero se observa que el valor de  $b$  es menor (en valor real negativo) en todos los ensayos

en seco. Hay un cambio de pendiente del modelo siendo en promedio de  $b = -0,4$  en R y  $b = -0,7$  en S. Walpode et al. (1998) plantea que no existen ciertas reglas empíricas respecto a cuándo las gráficas de caja proporcionan evidencia de diferencias significativas entre las medias. Sin embargo, una pauta aproximada es que, si la línea del percentil 25 de una variable excede la línea de la mediana de la otra variable, hay fuerte evidencia de una diferencia entre las medias. El 99 % de los valores de  $b$  obtenidos del ajuste en el tratamiento R en pre y post-campaña superan al valor de la mediana de los tratamientos S pre- y post-campaña.

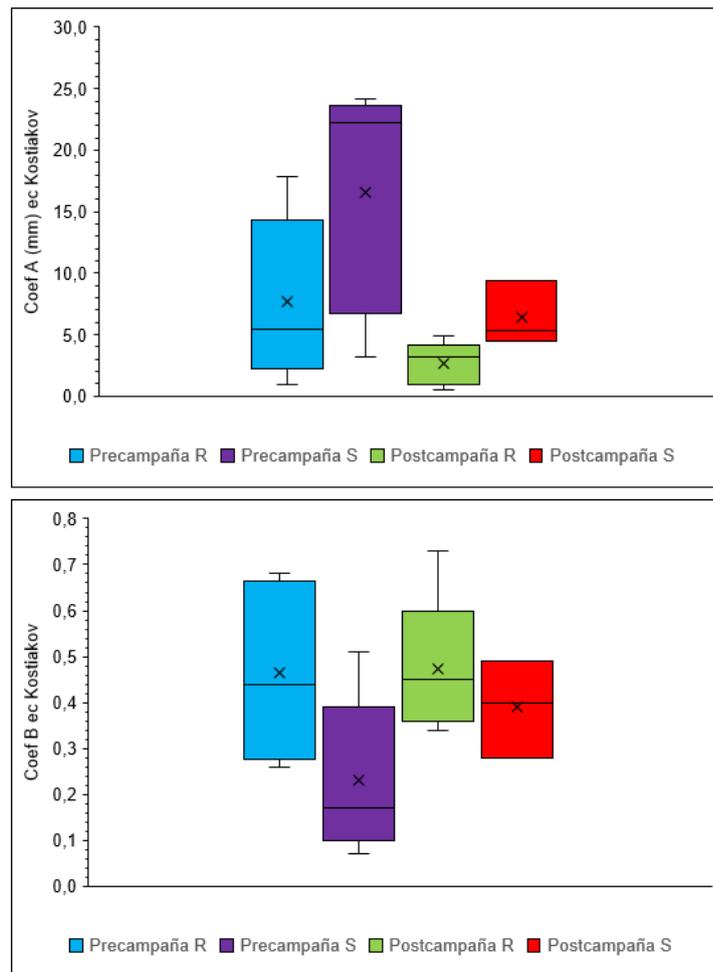
En la Figura 5 se muestran las curvas de infiltración acumulada obtenidas experimentalmente de las cinco repeticiones y ajustadas con el modelo (ec. 2) de Kostiakov (1932), para los tratamientos de riego y seco, pre- y post-campaña.



**Figura 5:** Infiltración acumulada obtenida a campo y ajustada con el modelo (ec.2) de Kostiakov (1932), para riego (R) y seco (S), en pre y post campaña del maíz.

**Figure 5:** Cumulative infiltration fitted to Kostiakov model (1932) (ec.2) for irrigation (R) and rainfed (S) treatments before and after the corn growing season.

La Figura 6 representa el gráfico de caja, de los parámetros de ajuste empíricos (A, B) del modelo de infiltración acumulada de Kostiakov (1932).



*Figura 6:* Gráfico de caja de los coeficientes de ajuste empírico (A, B) (ec 2) del modelo de Kostiakov (1937).

*Figure 6:* Box plot of the empirical fit coefficients (A, B) (ec 2) of Kostiakov (1937) model.

El coeficiente A, refleja la lámina acumulada en el primer minuto, correspondiente a los primeros milímetros del perfil. Los resultados muestran una tendencia de los sectores que reciben riego tanto en precampaña como en post campaña de acumular una menor lámina en el primer minuto respecto a los resultados de los sectores de secano. Esto concuerda con los resultados observados en la tasa de infiltración en el primer minuto y con los resultados de la sortividad (Tabla 8). Los gráficos de caja, Figura 6, muestran mayor variabilidad en el coeficiente de ajuste A en precampaña, en donde en el tratamiento R la asimetría es positiva, con un 75 % de los resultados se encuentran en un RIQ (rango inter cuartil) de 7mm acumulados en el primer minuto, mientras que en precampaña S la asimetría es negativa y el 75 % de los resultados se encuentran en un rango inter cuartil (RIQ) de 13 mm acumulados. Los resultados del parámetro de ajuste A en R y S post campaña presenta poca variabilidad con un RIQ de 4 y 5 mm, respectivamente.

El exponente B, pendiente de la recta logarítmica de infiltración acumulada (ec. 2) es representativa de la textura predominante de los suelos (textura fina), y de su almacenaje en el tiempo (USDA-NRCS, 2012). Los gráficos de caja, Figura 6, muestran variabilidad en todos los resultados con valores mínimos de B = de 0,1 hasta valores máximos de B = 0,7. Se observa un claro cambio de pendiente de las curvas de infiltración acumulada en los tratamientos con riego respecto de secano. Esto se ve reflejado si se analiza la lámina infiltrada en el suelo en el tiempo (valor asintótico de las curvas de I). Los resultados muestran que el lote precampaña R almacena una lámina de 85 mm en un tiempo de 450 minutos, mientras que en precampaña S es de 51 mm. Luego de la campaña de riego la lámina almacenada en el círculo de riego fue de 36 mm mientras que para S fue de 77 mm (recordando que solo se procesaron tres repeticiones). Archer et al. (2015), investigaron el proceso de infiltración en varios escenarios y concluyeron que las gramíneas tienden a mejorar la porosidad, generalmente incrementando la capacidad de infiltración de los suelos. Considere-

rando que el cultivo antecesor al maíz fue trigo/ soja de segunda, se podría explicar la mayor capacidad de almacenaje en precampaña. Haghazari et al. (2015), concluyeron que la mejora en el almacenamiento de agua en el perfil podría deberse a una mejora en la estructuración del suelo por colonización de gramíneas y acción de la macrofauna del suelo, reduciendo la compactación y aumentando la conectividad de poros. Giubergia et al. (2021), en el centro norte de la provincia de Córdoba concluyeron que los rendimientos del maíz en el tratamiento irrigado superaron, en promedio, en un 35% a los logrados en el tratamiento seco, y determinaron una tasa de infiltración elevada justificando sus resultados por un mayor desarrollo de raíces y masa vegetal en el tratamiento regado. Sin embargo, los resultados obtenidos en post campaña (Figura 5), no reflejan este comportamiento para el sector regado. La disminución que se observa de la lámina almacenaje del sector riego luego de la campaña agrícola se condice con lo obtenido por Lozano et al. (2016), quienes destacan que los beneficios de la siembra directa tienen poca persistencia en la conectividad de poros inducidos y no se mantienen a través de la temporada de crecimiento. El efecto de la mayor tasa de infiltración del suelo previo a la siembra no persistió hasta los últimos estadios de crecimiento del cultivo de maíz.

La Tabla 5 muestra los coeficientes de ajuste A y B, junto a la tasa de infiltración base ( $i_b$ ) (ec. 3) y la Suma del Cuadrado del Error (SSE), obtenida del análisis de todos los datos de las repeticiones.

**Tabla 5:** Coeficientes de ajuste de las ecuaciones de Kostiakov- Lewis (1937) para todas las repeticiones, de Riego y Secano, en pre y post campaña del maíz.

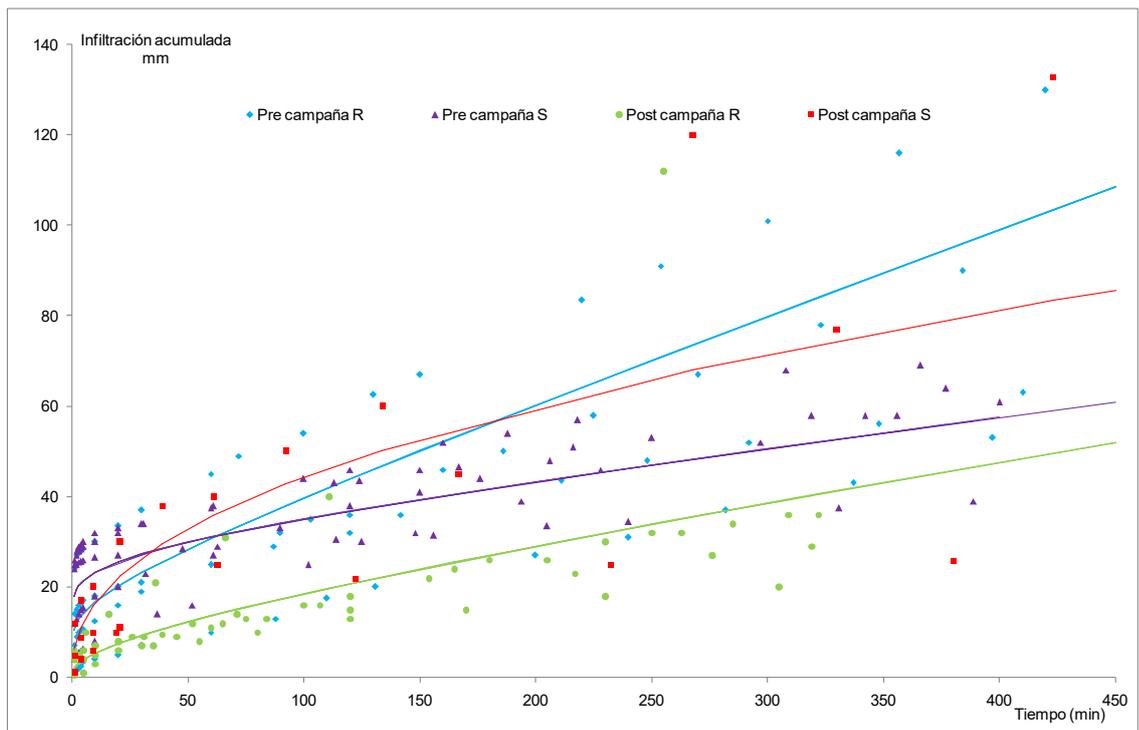
**Table 5:** Fitted coefficients of the Kostiakov-Lewis model (1937) for all replicates of Irrigated (Riego) and Rainfed (Secano) before and after the corn growing season.

Coeficientes		A	B	$i_b$	SSE
Unidades		(mm)		(mm h <sup>-1</sup> )	
Pre-campaña	Riego	10,3	0,16	10,8	65,3
	Secano	17,9	0,11	3,6	56,9
Post-campaña	Riego	1,93	0,38	4,4	5,3
	Secano	6,25	0,42	3,0	38,8

A y B: coeficientes de ajuste,  $i_b$ : infiltración básica, SSE suma del cuadrado del error

A y B: Fitted coefficients,  $i_b$ : steady infiltration rate, SSE Sum of Square Error

La Figura 7 representa los datos de campo y modelos obtenidos de Kostiakov-Lewis cuyos parámetros se resumieron en la Tabla 5.

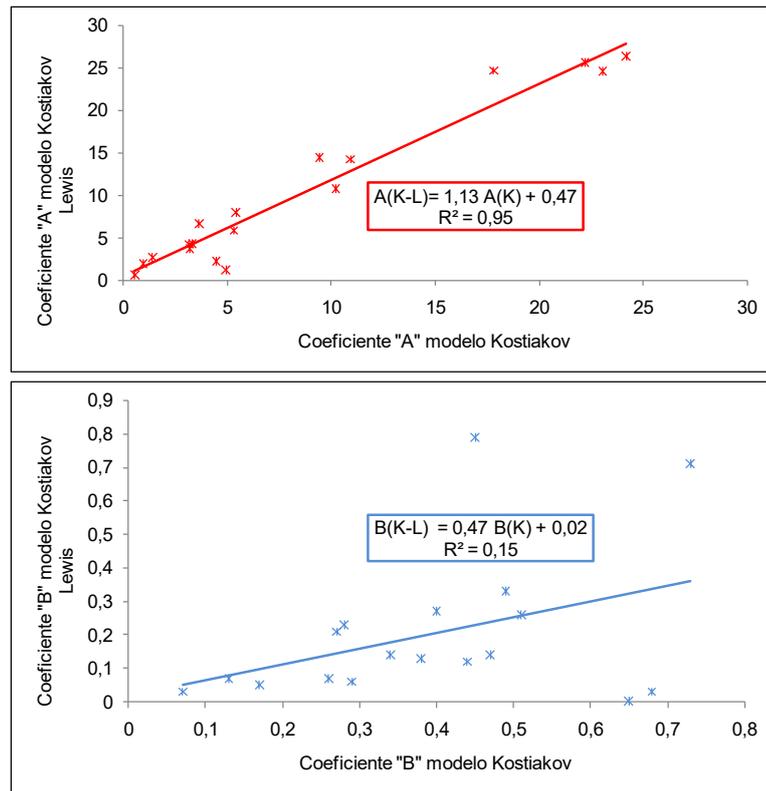


**Figura 7:** Infiltración acumulada ajustada con el modelo de Kostiakov-Lewis (1937) (ec. 3), para riego (R) y secano (S), pre y post campaña del maíz.

**Figure 7:** Cumulative infiltration fitted to Kostiakov-Lewis model (1937) (ec.3) for irrigated (R) and rainfed (S) before and after the corn growing season.

Se observa un patrón similar al del gráfico de infiltración acumulada de Kostiakov (1932) de la Figura 5. La infiltración acumulada en el tiempo según este modelo fue de 108 mm en precampaña R y solo de 39 mm luego de la campaña. El sector S acumuló 61 mm en pre-campaña y 85 mm en post-campaña para el lapso de tiempo de 450 minutos.

La Figura 8 muestra el resultado del análisis de correlación entre los parámetros de ajuste (A y B) de los modelos de Kostiakov y Kostiakov-Lewis.



**Figura 8:** Análisis de correlación entre los parámetros de ajuste (A y B) de los modelos de infiltración de Kostiakov (1932) y Kostiakov-Lewis (1937)

**Figure 8:** Correlation analysis between the fit parameters (A and B) of Kostiakov (1932) and Kostiakov-Lewis (1937) infiltration models

Los coeficientes A presentan un buen ajuste, cuyo coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es del 95 %. En el caso del coeficiente B el modelo lineal ajusta para la mayoría de los ensayos, pero dando un  $R^2$  bajo debido al resultado de algunos valores extremos.

Las Tablas 6 y 7 presentan los valores promedio de la tasa de infiltración básica (datos de campo y Kostiakov-Lewis), y los resultados del análisis de comparación de medias de los tratamientos R y S en pre campaña y post campaña por separado, y luego el análisis incluyendo todos los resultados de R y S.

**Tabla 6:** Valores medios de la tasa de infiltración básica (datos de campo), su desvío estándar y coeficiente de variación, pre y post campaña del maíz y por tratamiento Riego y Secano.

**Table 6:** Mean values of the steady infiltration rate (field data), its standard deviation and coefficient of variation for irrigated (Riego) and rainfed (Secano) treatments before and after the corn growing season.

Clasificación	Variable	n	Media	D.E.	CV	Valor p
					%	
Pre-campaña	Riego	5	9,7 a	3,0	31	0,0024
	Secano	5	2,8 b	1,9	68	
Post-campaña	Riego	5	3,4 a	2,0	60	0,4417
	Secano	3	4,9 a	3,4	70	
Riego	Todos los datos	10	6,5 a	4,1	63	0,0947
Secano	Todos los datos	8	3,6 a	2,6	72	

n: número de datos, D.E: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos  $P<0,05$

n: number of data, SD: standard deviation, CV: coefficient of variation different letters indicate significant differences between treatments ( $p<0,05$ )

**Tabla 7:** Valores medios de la tasa de infiltración básica (modelo de Kostiakov-Lewis (1937)), su desvío estándar y coeficiente de variación, pre y post campaña del maíz y por tratamiento Riego y Secano.

**Table 7:** Mean values of the steady infiltration rate (Kostiakov-Lewis (1937) model), its standard deviation and coefficient of variation for irrigated (Riego) and rainfed (Secano) treatments before and after the corn growing season.

Clasificación	Variable	n	Media	D.E.	CV	Valor p
					%	
Pre-campaña	Riego	5	7,7 a	3,1	40	0,0320
	Secano	5	3,8b	1,5	39	
Post-campaña	Riego	5	3,8 a	1,8	47	0,2671
	Secano	3	5,9 a	3,3	56	
Riego	Todos los datos	10	5,7 a	3,1	55	0,7851
Secano	Todos los datos	8	5,4 a	2,1	39	

n: número de datos, D.E: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ( $p<0,05$ )

n: number of data, D.E. standard deviation, CV: coefficient of variation; different letters indicate significant differences between treatments ( $p<0.05$ )

Los resultados muestran diferencias significativas en la  $i_b$  datos de campo de pre-campaña entre los tratamientos R y S, siendo la  $i_b$  mayor en R,  $9,7 \text{ mm h}^{-1}$ , respecto a S,  $2,8 \text{ mm h}^{-1}$ , mientras que en los sectores de secano no hubo un efecto significativo. Tampoco hay diferencias significativas al analizar todos los datos por separado tratamiento R y S. Este comportamiento se repite en el análisis de los datos obtenidos por el proceso de optimización del modelo de Kostiakov-Lewis. Dando una diferencia significativa entre R y S en precampaña con valores de  $i_b$  de  $7,7 \text{ mm h}^{-1}$  respecto a  $3,8 \text{ mm h}^{-1}$  respectivamente. El valor en R se asemeja al obtenido por del Barrio (1984) en los suelos pampeanos Argiudoles.

Iseas et al. (2018) observaron en las parcelas evaluadas en este trabajo, que a la profundidad de 0-20 cm hubo un incremento del PSI y del Na y del pH en el tratamiento R respecto a S, como consecuencia de la calidad del agua de riego utilizada, presentando diferencias significativas entre R y S tanto en pre como

post campaña. Shukla (2014) indicó que, como consecuencia de estos fenómenos, las propiedades de transmisión del agua como la infiltración son afectadas negativamente en suelos sodificados. Esto podría ser la causa de una disminución de la  $i_b$  en el sector R post-campaña.

Las Tablas 8 y 9 muestran los resultados de los valores de la sortividad promedio (S) deducidos del ajuste del modelo de infiltración de Philips (ec. 5) y los resultados la conductividad hidráulica saturada (Ks) deducidos del ajuste del modelo de Green & Ampt (ec. 4), junto a los resultados del análisis de comparación de medias en pre-campaña y post-campaña por separado. A posteriori se hizo el análisis incluyendo todos los resultados de R y S.

**Tabla 8:** Valores medios de la sortividad (S), su desvío estándar y coeficiente de variación, determinados pre y post campaña del maíz y por tratamiento Riego y Secano.

**Table 8:** Mean values of sortivity (S), its standard deviation and coefficient of variation, determined before and after the corn growing season for irrigated (Riego) and rainfed (Secano) treatments.

Clasificación	Variable	n	Media	D.E.	CV	Valor p
					%	
Pre-campaña	Riego	5	11,6 a	10,2	88	0,3964
	Secano	5	18,3 a	13,0	71	
Post-campaña	Riego	5	9,5 a	11,6	123	0,8053
	Secano	3	11,6 a	10,7	92	
Riego	Todos los datos	8	10,6 a	10,4	98	0,3553
Secano	Todos los datos	10	15,8 a	11,9	75	

n: número de datos, D.E.: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ )

n: number of data, D.E.: standard deviation, CV: coefficient of variation, different letters indicate significant differences between treatments ( $p < 0,05$ )

**Tabla 9:** Valores medios de la conductividad hidráulica saturada (Ks), su desvío estándar y coeficiente de variación, determinados pre y post campaña del maíz y por tratamiento Riego y Secano.

**Table 9:** Mean values of saturated hydraulic conductivity (Ks), its standard deviation and coefficient of variation determined before and after the corn growing season for irrigated (Riego) and rainfed (Secano) treatments.

Clasificación	Variable	n	Media	D.E.	CV	Valor p
					%	
Pre-campaña	Riego	5	10,1 a	7,5	74	0,5475
	Secano	5	6,7 a	9,4	140	
Post-campaña	Riego	5	1,8 a	1,3	70	0,2440
	Secano	3	4,0 a	3,6	90	
Riego	Todos los datos	8	6,0 a	6,7	112	0,9414
Secano	Todos los datos	10	5,7 a	7,5	132	

n: número de datos, D.E.: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ )

n: number of data, D.E.: standard deviation, CV: coefficient of variation; different letters indicate significant differences between treatments ( $p < 0,05$ )

Los resultados de la sortividad y la conductividad hidráulica saturada no mostraron diferencias signi-

ficativas en ningún caso evaluado. La alta variabilidad de los resultados de  $S$  y  $K_s$  concuerdan con lo determinado por Giubergia et al. (2021), y Torres Duggan et al. (2012). Los valores determinados de  $K_s$  corresponderían, según el United States Bureau of Reclamation (USBR, 1978), a suelos de textura arcillosa. Sainz et al. (2018) plantearon que, debido a la elevada variabilidad espacial de algunos parámetros correspondientes al proceso de infiltración, sería necesario profundizar este tipo de estudios a futuro, incrementando a su vez la cantidad de repeticiones, a fin de obtener resultados concluyentes sobre el comportamiento de este proceso.

### CONCLUSIONES

Para evaluar el efecto del riego complementario sobre distintas variables hidrológicas de interés agrícola, se analizó el proceso de infiltración a partir del uso de modelos teóricos que fueron ajustados a los datos de campo, obtenidos éstos con el método del doble anillo. Los modelos aplicados en este trabajo y los parámetros obtenidos reflejaron las características texturales predominantes de los suelos en estudio. Los resultados de infiltración ajustados por el modelo de Kostiakov (1932) y Kostiakov-Lewis (1937), fueron coincidentes. Si bien inicialmente la tasa de infiltración básica era mayor en el sector de riego, luego de la campaña disminuyó a valores similares a los de secano. Las mejoras en las propiedades hidráulicas originadas en el sector de riego debido al cultivo antecesor (trigo) no se conservan en el período de tiempo estudiado. Así mismo la disminución de la tasa de infiltración en el primer minuto, se podría explicar por el predominio de iones bicarbonato y sodio entre los componentes del agua de riego y su baja concentración salina, incrementando el PSI en los primeros centímetros de los lotes regados. No se observaron efectos del riego sobre la conductividad hidráulica y la sortividad de los suelos.

### AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por el proyecto UBACyT, código20020170100275BA, Programación 2018- 2022.

### REFERENCIAS

- Álvarez, C. R., Rimski Korsakov, H. y Torres Duggan, M. (2016). (27 de Junio - 01 de Julio de 2016). *Calidad de agua e impacto del riego complementario en la Región Pampeana*. [Presentación de trabajo] XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, "Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo". Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Álvarez C. R., Rimski Korsakov, H. y Torres Duggan, M. (2020). Effects of supplementary irrigation on soils and crops in sub-humid areas in the Pampas Region of Argentina. En E. Taleisnik y R. S. Lavado (Eds.), *Saline and Alkaline soils in Latin America: Natural Resources, Management and Productive Alternatives*. (pp. 285-294). Springer Nature.
- Álvarez, R., Steinbach, H. S. y De Paepe, J. (2021). *Fertilidad de suelos: caracterización y manejo en la Región Pampeana*. (pp 97-133). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Archer N. A., Otten, Schmidt, S., Bengough, A. G., Shah, N. & Bonell, M. (2015). Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grass land in a temperate northern climate. *Journal Ecohydrology*9(4) 585-600.
- Auge, M. (2004). Regiones hidrogeológicas de la República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea. Editorial propia, La Plata, Buenos Aires, Argentina. <http://www.alhsud.com/public/ebooks/reghidroarg.pdf>.
- Ayers, R.S., & Westcot D. W. (1987). *Water quality for agriculture*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. Irrigation and drainage, Paper 29 (1), Roma, Italia, pp.174.
- Boers, T. M., van Deurzen, F. J. M. P., Eppink, L. A. A. J. & Ruytenberg, R. E., (1992). Comparison of infiltration rates measured with an infiltrometer, a rainulator and a permeameter for erosion research in SE Nigeria. *Journal Soil Technology*. 5(1), 13–26.
- Botta, G. F., Tolon Becerra, A., Lastra Bravo, X. & Tourn M. (2010). Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research*, 110(1),167-174. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.07.001>
- Castiglioni, M.G., Behrends Kraemer, F., y Marquez Molina, J.J., (2018). Conductividad hidráulica saturada determinada por distintos procedimientos en suelos con alta humedad inicial. *Revista de la Ciencia del Suelo*. 36(2) 158-171. <http://www.suelos.org.ar/sitio/volumen-36-numero-2-diciembre-2018/>
- Deb, S. K. & Shukla, M. K. (2012). Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. *American Journal Environmental. Science*. 8(1), 489- 502.
- Del Barrio, R. A. (1984). Infiltración de agua en suelos de la Región Pampeana. *Reista de Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires* 5(3) 183- 191.
- Demattê J. A. M., Sayão, V. M., Rizzo, R. & Fongaro, C.D. T. (2017). Soil class and attribute dynamics and their relationship with natural

- vegetation based on satellite remote sensing. *Geoderma*, 302, 39-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.019>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzales, L., Tablada, M., Robledo, C. W. (2015). InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina URL <http://infostat.com.ar>
- Génova, L. (2007). *Resiliencia a la degradación salina y sódica de algunos suelos pampeanos, regados complementariamente con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Bibliográfico de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1825/Documento\\_completo.pdf](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1825/Documento_completo.pdf)
- Giubergia, J. P. (2013). *Efectos del riego complementario sobre propiedades del suelo en sistemas de producción con siembra directa*. Tesis Magister Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. [rins@agro.uba.ar](mailto:rins@agro.uba.ar)
- Giubergia, J. P., Salinas, A., Severina, I., Boccardo, M., Aimar, F. y Lavado, R. S. (2021). Efecto del riego suplementario sobre el suelo y el rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en el Centro Norte de la Provincia de Córdoba. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Agronomía & Ambiente*. 41(2) 71-82.
- Grassi, C., (1988). Fundamentos del riego. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDAT) Serie Riego y Drenaje RD – 38 Mérida – Venezuela 409 p.
- Green, W.H. & Ampt, G. (1911). Studies of Soil Physics, Part 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4: 1-24.
- Haghazari, F., Shahgholi, H. & Feizi, M. (2015). Factors affecting the infiltration of agricultural soils. *Int. J. Agron. Agric. Res.* 6(5): 21-35.
- Hillel, D. (Eds). (2013). *Advances in irrigation* (vol 3). Elsevier, 336 pp.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (1989). Carta de suelos de la República Argentina, escala 1:40.000. Instituto de Suelos. CIRN, INTA Castelar. Serie Chacabuco (CHa), 10/437 C. <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/Chacabuco.htm>.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (1999). Recomendaciones para la utilización de aguas para riego en función de su calidad, síntesis de los trabajos realizados en las unidades del INTA-IPG. Seminario de capacitación. Impacto ambiental del riego complementario. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- Iseas, M., Sainato, C. M. Romay, C. y Marquez Molina, J. J. (2018). Evaluación de indicadores de salinización/sodificación en suelos bajo riego complementario, en Suipacha, Provincia de Buenos Aires. [Presentación de trabajo]. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, "Suelo: Legado social de edición limitada". Tucumán, Tucumán, Argentina.
- Karlim, M. S., Bernasconi Salazar, J., Cora, A., Sanchez, S., Arnulphi, S. y Accietto, R. (2019). Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). *Revista de la Ciencia del Suelo*, 37(2) 196-208. <http://www.suelos.org.ar/sitio/volumen-37-numero-2-diciembre-2019/>
- Kostiakov, A. N., (1932). On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transactions Congress International Society for Soil Science*, 6th, Moscow, Part A: 17-21.
- Lavado, R. S. (2009). Salinización y sodificación de suelos de producción agrícola extensiva por riego complementario. En M. A. Taboada y R. S. Lavado (Eds.), *Alteraciones de la fertilidad de los suelos: el halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones* (pp. 45-58). Editorial Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (EFA).
- Lozano, L. A., Soracco, G., Villarreal, R., Melani, E., Filgueira, R. R. y Guillermo G. O. (2016). (27 de Junio - 01 de Julio de 2016). *Variación temporal de la configuración del sistema poroso del suelo y del flujo de agua bajo siembra directa y labranza convencional*. [Presentación de trabajo]. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, "Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo". Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Márquez Molina, J. J., (2020). Caracterización de la contaminación por nitratos y fósforo mediante tomografía de resistividad eléctrica e inducción electromagnética en la zona no saturada y agua subterránea por actividad de engorde a corral. Tesis doctoral: <http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/tesis/document/2020marquezmolinajohnjairo>
- Martínez, D., Landini, A., Soza, E., Sainato, C. y Heredia, O. S. (2010). Efecto del pisoteo animal sobre las propiedades de un suelo. Parte II: infiltración y conductividad hidráulica saturada. *Agro-Ciencia, Revista Chilena De las Ciencias Agropecuarias*. 27(1):15-27.
- Nijensohn, L. (1978). Determinación de la textura del suelo por el método de Volumen de Sedimentación. *Guía de Trabajos Prácticos*, Cátedra de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina (pp. 122).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015). Estudio del Potencial de ampliación del riego en Argentina. *UTF/ARG/017/ARG. Desarrollo Institucional para la Inversión. PROSAP, UCAR, MAGyP*. ISBN 978-92-5-308995-6. <http://cdi.mecon.gov.ar/bases/docelec/az3031.pdf>
- Page, A. L., Miller, R. H. & Keeney, D. R. (1982). Methods of soil analysis. Part 2. *Chemical and microbiological properties*, (2nd ed). American Society of Agronomy, Inc. SSSA.
- Perroux, K.M. & White, I., (1988). Designs for disc permeameters. *Soil Science Society American Journal*, V (52), pp 1205-1215.
- Philip, J.R., (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.* 83, 345–357.
- Proyecto del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (1988). *Estudio sobre la factibilidad técnica, económica y financiera del riego complementario en la zona maicera típica de la Provincia de Buenos Aires*. [Informe final]. Convenio IICA-SAGYP-INTA. Buenos Aires, Argentina. <http://www.iicanet.org/comuniica/n-3/htm>
- Richmond, P. (2012). Compactación del suelo producida por dos máquinas cosechadoras: su efecto sobre la evolución de parámetros ed-

- áficos y del cultivo posterior en suelos hapludoles manejados en siembra directa. En G. Covas (Ed.), *Experimentación en campo de productores, año 2011-2012, proyecto regional agrícola* (pp. 13-18). Editorial talleres gráficos de la EEA INTA Anguil, La Pampa, Argentina.
- Sainato, C. M., Galindo, G., y Heredia, O. (2006). *Agua Subterránea: Exploración y utilización agropecuaria* (1<sup>era</sup> ed.) Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Sainz, D., Eiza, M., Carfagno, P., Behrends Kraemer, F. y Chagas, C. (2018). (15-18 mayo 2018). *Infiltración con y sin cobertura en un argiudol típico bajo siembra directa*. [Presentación de trabajo]. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, "Suelo: Legado social de edición limitada". Tucumán, Tucumán, Argentina.
- Salinas, A., Severina, I., Bocardo, M., Aimar, F. y Giubergia, J. (26-27 de octubre de 2016). *Actualización de resultados productivos con riego suplementario: sistemas de producción en siembra directa continua, módulo demostrativo y experimental, INTA Manfredi*. [5ta Reunión Internacional de Riego: "Uso eficiente del agua de Riego"]. Manfredi, Córdoba, Argentina.
- Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (2012). *Chapter 4, Surface irrigation, Part 623 Irrigation National Engineering Handbook* (3<sup>ra</sup> ed.). Revisión y edición por C. Prestwich, J. Busch, B. Oregon, J. Hester, B. Sandoval, L. Nelson, C. Stoner, y M. Tweffort.
- Shukla, M. K., Lal, R. & Ebinger, E. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research* 87(2), 194-204. <https://doi:10.1016/j.still.2005.03.011>.
- Shukla, M. K. (2014). Water Infiltration into the Vadose Zone. En Taylor y Francis, *Soil Physics, An Introduction* (pp.187-208), Editorial Taylor & Francis Group.
- Torres Duggan, M., Álvarez C. R., Taboada, M. A. Celesti, T., Vignarolli, F. y D'Ambrosio D. (2012). Riego complementario en un argiudol típico de la pampa ondulada argentina bajo siembra directa: efectos sobre algunas propiedades químicas y físicas del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo*, 30(2) 201-207. <http://www.suelos.org.ar/sitio/volumen-30-numero-2-diciembre-2012>
- United States Bureau of Reclamation (1978). *Drainage Manual, a guide to integrating plant, soil, and water relationships for drainage of irrigated lands* (1<sup>ra</sup> ed.). Editor U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, a water resources technical publication, Washington, Denver, United States, 286 p.
- Vera G. S., Obrador Olan J. J., Palma-López, D. J. y Salgado, S. (2003). Densidad aparente en un vertisol con diferentes agrosistemas. *Asociación Interciencia*, 28(6) Caracas, Venezuela, versión impresa ISSN 0378-1844.
- Walpode, E.R., Raymond, H. M., Sharon, L, Myers, L. (1999). Probabilidad y estadística para Ingenieros. Ed. Pearson education, sexta edición. 737pp.