



**Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Agrarias**

**BALANCE HÍDRICO DEL CULTIVO DE SOJA *Glycine max* (L.) Merr.
EN SUELOS DE DIFERENTE TEXTURA DEL NORTE BONAERENSE: AJUSTE
DE HERRAMIENTAS MODELIZADORAS**

JOSÉ ANDRÉS LLOVET

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
MANEJO Y CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES**

DIRECTOR:

Ing. Agr. MSc. Laura Ferreras

CO-DIRECTOR:

Dr. Edgardo Guevara

Zavalla, Diciembre de 2014.

Balance hídrico del cultivo de soja *Glycine max* (L.) Merr. en suelos de diferente textura del norte bonaerense: ajuste de herramientas modelizadoras.

Nombre y apellido del autor: José Andrés Llovet.

Título de grado del autor: Ingeniero Agrónomo.

Universidad que lo expidió: Universidad Nacional de Rosario.

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Magister en Manejo y Conservación de Recursos Naturales, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en esta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria durante el período comprendido entre 2009 y 2011, bajo la dirección de la Ing. Agr. MSc. Laura Ferreras y del Dr. Edgardo Guevara.

Nombre y firma del Maestrando

Nombre y firma del Director

Nombre y firma del Co - Director

Defendida: 16 de Diciembre de 2014.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que de alguna manera colaboraron en la realización de este trabajo.

Gracias a Laura Ferreras quien confió en mí y aceptó la responsabilidad de dirigirme. Agradezco a Edgardo Guevara y Santiago Meira quienes también fueron fundamentales para que este trabajo llegue a su fin. A Carlos Pecorari, por sus consejos y apoyo en los inicios del camino transcurrido.

A Manuel Ferrari, por sus valiosos aportes en cada conversación relacionada a esta tesis. A Adrián Andriulo por las determinaciones de laboratorio, facilitación de materiales y comentarios críticos. A Silvia Re, Jorge Rodríguez y personal del Aeródromo de Junín por los datos meteorológicos. A Pablo Micheletti por cederme su establecimiento para los experimentos. A Javier Elisei quien siempre tuvo una palabra de aliento. A todos mis compañeros de la EEA Pergamino quienes brindaron su incondicional apoyo. Al INTA, por permitirme realizar esta capacitación de posgrado en mi ámbito de trabajo. A la Facultad de Ciencia Agrarias de la U.N.R., por permitirme optar por el Magister además de haberme otorgado el título de grado.

A mis padres, por incentivarne a estudiar en todo momento. A Alina y Teo, por permitirme hacer lo que me gusta y perdonarme por todo el tiempo que no les dediqué. A mis abuelos, quienes sin saber en cada charla despertaban en mí la pasión por esta profesión.

INDICE GENERAL

	Pág.
Siglas y abreviaturas utilizadas	1
Resumen	2
Abstract	4
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL	5
Objetivos	9
Hipótesis	9
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	10
1 - Área de estudio.	10
2 - Variables registradas	13
2.1 - Variables de cultivo y manejo	13
2.2 - Variables de suelo	14
2.3 - Variables de clima	21
3 - Modelo utilizado	22
4 - Análisis de la información	27
CAPÍTULO III: RESULTADOS	29
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN	62
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	70
BIBLIGRAFÍA	72
ANEXO I. Descripción de series de suelo.	76
ANEXO II. Humedad volumétrica. Estadísticas descriptivas.	82

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Variables meteorológicas. Estación Meteorológica EEA INTA Pergamino.	11
Cuadro 2. Características de los sitios experimentales.	12
Cuadro 3. Variedad utilizada, grupo de madurez, fecha de siembra, distancia entre surcos, densidad de plantas lograda y fertilización.	13
Cuadro 4. Propiedades de los suelos escogidos para los experimentos. Porcentajes de arcilla, arena, limo y materia orgánica, densidad aparente, punto de marchitez permanente, capacidad de campo y capacidad de agua útil.	29
Cuadro 5. Valores de variables climáticas en distintos subperíodos de desarrollo del cultivo de soja para las tres localidades y las dos campañas evaluadas.	30
Cuadro 6. Valores observados y simulados de número de granos, peso seco de 1000 granos y rendimiento seco en grano. Raíz del cuadrado medio del error y coeficiente de variación sobre el rendimiento.	31
Cuadro 7. Análisis de componentes principales. Valores de autovectores y correlaciones con variables originales.	36
Cuadro 8. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación 1 y 2 para predecir Capacidad de Campo (CC) y Punto de marchitez permanente (PMP) hasta los 2 m de profundidad para los suelos estudiados en el norte de la provincia de Buenos Aires.	38
Cuadro 9. Raíz del cuadrado medio del error, coeficiente de variación, desviación media y coeficiente de determinación para los valores medios simulados y observados de capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente.	41
Cuadro 10. Raíz del cuadrado medio del error, desviación media y coeficiente de variación entre valores medios observados y simulados de humedad volumétrica de suelo a 2 m de profundidad para Junín en dos campañas agrícolas. SLDR (factor drenaje), SLRO (factor curva número) y SRGF (factor crecimiento radical).	45
Cuadro 11. Raíz del cuadrado medio del error, desviación media y coeficiente de variación entre valores medios observados y simulados de humedad volumétrica de suelo a 2 m de profundidad para Pergamino en dos campañas agrícolas. SLDR (factor drenaje), SLRO (factor curva número) y SRGF (factor crecimiento radical).	46
Cuadro 12. Raíz del cuadrado medio del error, desviación media y coeficiente de variación entre valores medios observados y simulados de humedad volumétrica de suelo a 2 m de profundidad para Conesa en dos campañas agrícolas. SLDR (factor drenaje), SLRO (factor curva número) y SRGF (factor crecimiento radical).	47

Cuadro 13. Raíz del cuadrado medio del error, coeficiente de variación y desviación media entre valores observados y simulados de humedad volumétrica de suelo por estrato producto de la combinación escogida de SRGF (factor crecimiento de raíces) y SLRO (factor curva número) y SLDR (factor drenaje).	51
Cuadro 14. Componentes del balance hídrico en mm según la ecuación 3 en el período S-R7 para Junín, Pergamino y Conesa en las campañas 2009/2010 y 2010/2011. Humedad inicial a la siembra (S), humedad final a madurez fisiológica (R7), precipitaciones en el período S-R7, evapotranspiración del cultivo calculada, drenaje y su partición estimada.	59
Cuadro 15. Evapotranspiración de referencia (ET _o), evapotranspiración del cultivo (ET), rendimiento seco de grano y eficiencia del uso del agua (EUA) para Junín, Pergamino y Conesa en las campañas 2009/2010 y 2010/2011.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Área de estudio. Ubicación de los sitios: Junín, Pergamino y Conesa	11
Figura 2. Calicatas de las cuales se obtuvieron los parámetros para el presente estudio. Detalle de la secuencia de horizonte.	15
Figura 3. Prensa hidráulica para muestreo de densidad aparente.	16
Figura 4. Membrana de Richard para determinar el Punto de Marchitez Permanente.	17
Figura 5. Cilindros de muestreo para la determinación de Capacidad de Campo.	17
Figura 6. Mesa de tensión para la determinación Capacidad de Campo.	18
Figura 7. Esquema de muestreo para las 3 localidades en cada uno de los 4 momentos de muestreo.	20
Figura 8. Esquema de muestreo en cada localidad. Detalle de la ubicación en el entresurco de las 5 repeticiones para cada una de las 4 fechas.	20
Figura 9. Relación entre el número de granos y el peso de granos con el rendimiento de soja observado. Número de granos en función de las precipitaciones acumuladas. Localidades de Junín, Pergamino y Conesa. Campañas 2009-2010 y 2010-2011.	31
Figura 10. Humedad volumétrica en suelo para Junín durante los períodos 2009-2010 y 2010-2011. Siembra (S), inicio de floración (R1), inicio de llenado de granos (R5) y madurez fisiológica (R7). Las barras indican el error estándar de la media.	33

Figura 11. Humedad volumétrica en suelo para Pergamino durante los períodos 2009-2010 y 2010-2011. Siembra (S), inicio de floración (R1), inicio de llenado de granos (R5) y madurez fisiológica (R7). Las barras indican el error estándar de la media.	34
Figura 12. Humedad volumétrica en suelo para Conesa durante los períodos 2009-2010 y 2010-2011. Siembra (S), inicio de floración (R1), inicio de llenado de granos (R5) y madurez fisiológica (R7). Las barras indican el error estándar de la media.	35
Figura 13. Biplot del análisis de componentes principales de variables de suelo en horizontes de los tres suelos estudiados.	37
Figura 14. A) Relación entre la Capacidad de Campo (CC) calculada mediante la ecuación 1 y la CC observada ($R^2=0,90$). B) Relación entre el Punto de marchitez permanente (PMP) calculado (ecuación 2) y el PMP observado ($R^2=0,91$). Datos originados de los perfiles descritos en Junín, Pergamino y Conesa.	39
Figura 15. Valores para Junín, Pergamino y Conesa, observados y simulados por el modelo. Capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente.	40
Figura 16. Capacidad de agua útil en mm para Junín, Pergamino y Conesa observada y simulada.	41
Figura 17. Contenido de agua útil observada y simulada para la localidad de Junín. Campaña 2009-2010. Campaña 2010-2011.	43
Figura 18. Contenido de agua útil observada y simulada para la localidad de Pergamino. Campaña 2009-2010. Campaña 2010-2011.	43
Figura 19. Contenido de agua útil observada y simulada para la localidad de Conesa. Campaña 2009-2010. Campaña 2010-2011.	44
Figura 20. SRGF (factor crecimiento radical) utilizados para el análisis de sensibilidad. SRGF 2 función por "default". SRGF 1,5 y SRGF 1 generan crecimientos radicales ascendentes.	44
Figura 21. JUNIN, campaña 2009-2010. Comparación entre valores observados y simulados. SRGF 1, SLRO 73 y SLDR 0,7. Agua disponible en mm. Humedad volumétrica en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ por estratos de suelo.	52
Figura 22. JUNIN, campaña 2010-2011. Comparación entre valores observados y simulados. SRGF 1, SLRO 83 y SLDR 0,5. Agua disponible en mm. Humedad volumétrica en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ por estratos de suelo.	53
Figura 23. PERGAMINO, campaña 2009-2010. Comparación entre valores observados y simulados. SRGF 1,5, SLRO 91 y SLDR 0,8. Agua disponible en mm. Humedad volumétrica en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ por estratos de suelo.	54

Figura 24. PERGAMINO, campaña 2010-2011. Comparación entre valores observados y simulados. SRGF 1,5, SLRO 81 y SLDR 0,6. Agua disponible en mm. Humedad volumétrica en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ por estratos de suelo.	55
Figura 25. CONESA, campaña 2009-2010. Comparación entre valores observados y simulados. SRGF 1,5, SLRO 91 y SLDR 0,6. Agua disponible en mm. Humedad volumétrica en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ por estratos de suelo.	56
Figura 26. CONESA, campaña 2010-2011. Comparación entre valores observados y simulados. SRGF 1,5, SLRO 81 y SLDR 0,6. Agua disponible en mm. Humedad volumétrica en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ por estratos de suelo.	57
Figura 27. Precipitación y componentes estimados del drenaje para Junín, Pergamino y Conesa en las campañas 2009/2010 y 2010/2011.	59
Figura 28. Evapotranspiración del cultivo (ET) en función de la fecha de siembra. Junín, Pergamino y Conesa. Campañas 2009-2010 y 2010-2011.	61

SIGLA Y ABREVIATURAS UTILIZADAS

Sigla/abreviatura	Significado	Unidad
ACP	Análisis de Componentes Principales	---
CAU	Capacidad de agua útil	mm
CC	Capacidad de Campo	g.g^{-1} o $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
CV	Coefficiente de variación	%
DA	Densidad aparente	g.cm^{-3}
DE	Desvío estándar	mm o $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
EE	Error estándar	mm o $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
EH	Espesor del horizonte	cm
Eq	Ecuación	---
ET	Evapotranspiración	mm.d^{-1}
ETo	Evapotranspiración de referencia	mm.d^{-1}
FPT	Función de pedotransferencia	---
G	Gramo	g
Ha	Hectárea	ha
HG	Humedad gravimétrica	g.g^{-1}
HV	Humedad volumétrica	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
Kg	Kilogramo	kg
L	Lámina	mm o cm
M	Metro	m
μm	Micrón	μm
MD	Desviación media	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ u otra
MPa	Megapascal	MPa
PMP	Punto de Marchitez Permanente	g.g^{-1} o $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
R1	Inicio de floración	---
R5	Inicio de llenado de granos	---
R7	Madurez fisiológica	---
R8	Madurez comercial	---
RLD	Densidad longitudinal de raíces	cm.cm^{-3}
RSME	Raíz del cuadrado medio del error	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ u otra
S	Siembra	---
SLDR	Factor drenaje	0-1
SLRO	Factor de escurrimiento superficial	0-100
SRGF	Factor crecimiento de raíces	0-1
T	Tonelada	t

RESUMEN

El agua es el principal factor limitante para lograr los rendimientos alcanzables en planteos agrícolas de secano. Es importante comprender la capacidad de almacenamiento y abastecimiento de agua de los suelos ya que es el único reservorio que brinda cierta independencia climática al cultivo. La evaluación cuantitativa del agua en el suelo constituye una herramienta fundamental para comprender las interacciones suelo-planta-atmósfera y establecer pautas de manejo que optimicen su uso en el sistema productivo. En este punto, los modelos de simulación de balances hídricos se posicionan como una alternativa para inferir la evolución de la humedad edáfica durante el ciclo del cultivo, además de permitir plantear escenarios futuros.

La finalidad de este trabajo fue generar conocimientos sobre i) parámetros relacionados con el balance hídrico en suelos Argiudoles típicos, Argiudoles vérticos y Hapludoles típicos, ubicados en el norte de la provincia de Buenos Aires bajo siembra directa y cultivo de soja *Glycine max* (L.) Merr., y ii) el seguimiento perfiles hídricos y evaluación del ajuste de su simulación temporal, mediante un modelo de balance hídrico complejo dentro del modelo de simulación de cultivos DSSAT V.4.5, analizando el grado de adaptabilidad ambiental o local.

El estudio se realizó durante las campañas 2009/2010 y 2010/2011 en tres localidades: Junín (Serie Junín, Hapludol típico), Pergamino (Serie Pergamino, Argiudol típico) y Conesa (Serie Ramallo, Argiudol vértico). Se relevaron y ajustaron las variables de suelo, climáticas y genotipo para poder realizar las simulaciones con el modelo de referencia. Se determinó el agua útil a la siembra, floración, inicio de llenado de granos y madurez fisiológica. Se modificaron en el modelo tres parámetros de suelo que caracterizan el crecimiento radical (SRGF), el drenaje (SLDR) y el escurrimiento superficial (SLRO) y mediante un análisis de sensibilidad se visualizaron las combinaciones de mejor ajuste con los valores observados. Además, se generaron modelos de estimación de constantes hídricas, se analizó la capacidad predictiva del agua útil por parte del modelo y se evaluaron los componentes del balance hídrico.

Se puede concluir que i) la variación de los balances hídricos pudo ser explicada con el modelo utilizado existiendo un comportamiento diferencial según tipo de suelo, año climático y combinación de parámetros SRGF, SLDR y SLRO, ii) en el Hapludol típico se observó una sobrestimación del agua disponible por subestimar el drenaje interno y se logró mejor ajuste utilizando el mayor enraizamiento (SRGF1), iii) para el Argiudol típico y el Argiudol vértico, en la campaña de mayores precipitaciones, el modelo sobreestimó el agua

disponible producto de simular entradas de agua en el perfil mayores a las reales, iv) en el año de menores precipitaciones, el Arjudol típico mantuvo el mismo comportamiento, pero el Arjudol vértico, se mostró insensible a la variación de parámetros.

ABSTRACT

Water balance of soybean *Glycine max* (L.) Merr.
in different soils of northern Buenos Aires: adjusting modeling tools

Water is the main limiting factor for achieving higher yields in rainfed agriculture. Quantitative evaluation of soil water is a fundamental tool for understanding the soil-plant-atmosphere interactions and to establish management guidelines that will optimize their use. At this point, the simulation models of water balances are an alternative for understanding the evolution of soil moisture during the growing season, besides it allows to consider future scenarios

The objectives of this study were i) to study parameters related to the water balance in typical and vertic Argiudolls and typical Hapludoles soils in the north of Buenos Aires province under no tilled soil and soybean *Glycine max* (L.) Merr and ii) to monitor the hydrological profiles and to evaluate the fitting of its temporary simulation, through a complex hydrological balance model within the DSSAT V.4.5 crop simulation model, and analyzing the local adaptability degree.

The soil, climate and genotype variables were surveyed and adjusted to perform the simulations. The available water at sown land, flowering, early grain filling and physiological maturity were determined. Three soil parameters that characterize the root growth (SRGF), drainage (SLDR) and surface drainage (SLRO) were modified in the model. Through a sensitivity analysis the best fit combinations with the observed values were analyzed. Also hydrological constant estimation models were generated, the predictive capacity of available water for the model was analyzed and the hydrological balance components were evaluated.

We conclude that i) the variation of the water balances could be explained with the model used, considering that there was a differential behavior as regards soil type, climatic year and SRGF, SLDR and SLRO parameter combination, ii) in the typical Hapludol an overestimation of the available water was observed for underestimating the internal drainage and a better fit was achieved using the highest rooting (SRGF1), iii) for typical and vertic Argiudolls in higher rainfall station, the model overestimated the available water due to simulating water inputs in the profile higher than the real ones, iv) in the year of lower rainfall, the typical Argiudol kept the same behavior, but vertic Argiudol was insensitive to parameter variation.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

En la agricultura de secano, el rendimiento alcanzable de los cultivos está condicionado por la disponibilidad de factores limitantes como el agua y los nutrientes. En la mayoría de las regiones agrícolas del país el agua es el recurso más limitante de la producción de granos, por lo tanto el principal desafío es conocer cómo el clima, el suelo, la genética vegetal y el manejo pueden ser combinados para aumentar la eficiencia del uso del agua por los cultivos. De todas las vías de entrada y salida del agua en los sistemas agrícolas, solo aquella que es transpirada por las plantas es útil para mejorar el rendimiento y la cantidad de materia seca generada será proporcional al agua transpirada (Gil, 2010). Por lo engorroso de separar el agua evaporada desde el suelo y la transpirada por el cultivo se las denomina en forma conjunta como evapotranspiración (ET), la cual depende principalmente de variables meteorológicas, parámetros morfológicos y fisiológicos del cultivo y características edáficas. En este último punto, comprender la capacidad de almacenamiento-abastecimiento de agua de los suelos es importante ya que es el único reservorio que brinda cierta independencia climática al cultivo. La evaluación cuantitativa del agua en el suelo constituye entonces una herramienta fundamental para comprender las interacciones suelo-planta-atmósfera y establecer pautas de manejo que optimicen su uso en el sistema productivo (Micucci *et al.*, 2002b).

En todos los cultivos regionales y en el caso particular de soja, *Glycine max* (L.) Merr., la variación de su rendimiento se encuentra íntimamente relacionada con la cantidad y distribución de las lluvias (Bettolli, *et al.*, 2004; Purcell y Specht, 2004). Si bien este factor junto a otras variables meteorológicas importantes como radiación y temperatura no puede ser predicho con anterioridad a la siembra del cultivo, salvo estableciendo niveles de probabilidad de ocurrencia, sí podemos cuantificar el agua inicial disponible. Bacigaluppo (2008), confirmó la importancia del agua útil inicial para diferenciar situaciones de distinto comportamiento productivo en el cultivo de soja. Considerar esta variable con anticipación permite ajustar el manejo del cultivo (Andriani, 2002) generando estrategias (fecha de siembra, genotipo, grupo de madurez, arreglo espacial) que sirvan para mitigar períodos de estrés hídrico en los estadios de mayor susceptibilidad en busca de mejores resultados productivos (Andriani *et al.*, 1991; Andrade y Sadras, 2000).

En el área de estudio, norte de la provincia de Buenos Aires, el agua útil de los suelos mantiene una estrecha relación con la proporción de partículas primarias y materia orgánica (Pecorari *et al.*, 1988b). Existe un gradiente textural sudoeste-noreste, de

partículas más gruesas a partículas más finas, con menor a mayor capacidad de almacenamiento de agua, respectivamente. Esta relación radica en el espacio poroso resultante de la textura, estructura y compuestos orgánicos asociados; como así también en las diferencias en la capacidad de imbibición de los materiales coloidales, actuando como límite a la máxima capacidad de almacenamiento de agua. El volumen total de poros surge de la sumatoria de los distintos tamaños de poros, sin embargo no es solamente la cantidad total de poros del suelo lo que define su comportamiento hídrico, sino también las características específicas del sistema poroso, considerando forma, tamaño y distribución.

Existen cuatro categorías de tamaños de poros:

- Microporos menores: de diámetro inferior a $0,2 \mu\text{m}$ con tensiones mayores a $1,5 \text{ MPa}$ y responsables de contener el agua no disponible para los cultivos.
- Microporos mayores: cuyo diámetro es de $0,2$ a $10 \mu\text{m}$ y tensiones de $1,5$ a $0,03 \text{ MPa}$, responsables de la cantidad y capacidad de retener, almacenar y entregar agua a las plantas.
- Mesoporos: de diámetros de 10 a $60 \mu\text{m}$ y tensiones de $0,03$ a $0,005 \text{ MPa}$ responsables de la conducción lenta del agua.
- Macroporos: de diámetros mayores a $60 \mu\text{m}$ y tensiones de $0,005 \text{ MPa}$, gobernando la conductividad hidráulica saturada, el movimiento gravitacional del agua, aireación, infiltración y capacidad de enraizar que tiene un suelo.

Como se indicó anteriormente, el tamaño de poro mantiene una relación inversamente proporcional a la energía con la cual retiene el agua. El agua en el suelo, al igual que otros cuerpos en la naturaleza, puede contener energía en distinta forma y cantidades. Por un lado, la energía cinética del agua en el suelo es despreciable ya que su movimiento es lento. Por otro lado, se encuentra la energía potencial, la cual responde a la condición interna de posición y es de suma importancia para determinar el estado y movimiento del agua en el suelo. Ese movimiento se dará desde lugares de mayor a menor energía potencial tendiendo a alcanzar un equilibrio. En condiciones de campo, el potencial total de agua del suelo surge de la adición del potencial agua y del potencial gravitacional. El potencial agua es la sumatoria del potencial mátrico (relacionado a la matriz sólida del suelo) y de soluto (relacionado con todos los solutos presentes). Considerando, en términos generales, a la cantidad de agua útil o disponible para los cultivos a el agua que se encuentra entre succiones de $0,03 \text{ MPa}$ y $1,5 \text{ MPa}$ (para capacidad de campo y punto de marchitez permanente, respectivamente) serán los suelos con clases texturales franco-limosas a franco-arcillosas los que proporcionen mayor agua útil, ya que brindan una gran proporción de microporosidad caracterizada por cumplir funciones de almacenamiento. El

tamaño, continuidad y estabilidad de los poros, además de la cantidad de agua y de la energía con la cual está retenida en el suelo, caracterizan su conductividad hidráulica y el movimiento del agua en el suelo, hacia la planta y la atmósfera.

Estudios llevados a cabo por Pecorari y Balcaza (1988) sobre suelos que se encuentran en la transecta entre Junín y Ramallo (área de estudio similar a la del presente trabajo), determinaron que la capacidad de almacenamiento de agua útil hasta los dos metros de profundidad fluctuaba entre 250 a 330 mm, respectivamente.

El seguimiento del agua del suelo fue siempre uno de los monitoreos productivos de mayor complejidad por lo dificultoso, por las calibraciones necesarias o por su costo. Entre los métodos para la determinación de agua en el suelo se destacan: muestreo a campo expresando el resultado en peso seco, en volumen, utilización de radiación (neutrones, rayos gamma), medidores de capacitancia, tensiómetros, bloque de resistencia eléctrica y lisímetros. De los métodos mencionados, la estimación en peso seco o gravimétrica es un método de bajo índice de error y tomado como referencia (Micucci *et al.*, 2002b).

En este punto, los modelos de simulación de balances hídricos se posicionan como una alternativa para inferir la evolución de la humedad edáfica durante el ciclo del cultivo, además de permitir plantear escenarios futuros. La mayor parte de estas herramientas se basan en parámetros de suelo, cultivo y clima, presentando diferentes grados de complejidad al momento de obtenerlos o simularlos. En cuanto a suelo se refiere, muchos investigadores lograron relaciones matemáticas entre variables de fácil obtención para explicar comportamientos complejos (Saxton y Rawls, **2006**). Estas relaciones se denominan funciones de pedotransferencia (FPT). Mundialmente, existen gran cantidad de FPT (Timlin *et al.*, 1996) utilizadas en modelos, ajustadas para sus regiones de origen y muchas veces extrapoladas a otras áreas con adaptabilidad poco probada sin considerar por ejemplo, el origen geológico de los suelos (Bastet *et al.*, 1997; Minasny *et al.*, 1999). Localmente, Damiano y Taboada (2000) confirmaron un desempeño aceptable de las funciones de pedotransferencia comparadas en la Región Pampeana, pero sostuvieron que la mejor respuesta se encontró en aquellos suelos para los cuales fueron desarrolladas. Por otra parte, cuando la proporción de partículas finas se incrementa, muchos modelos aumentan sus errores, transformándolos en herramientas menos confiables (Gijsman *et al.*, 2003). Además del incremento de las proporciones de arcilla hacia el este de la región considerada en el presente trabajo, se presentan horizontes subsuperficiales Bt (Soil Taxonomy, 2006) los cuales alteran la dinámica del agua en el suelo (Pecorari y Balcaza 1988; Castiglioni *et al.*, 2007).

Los sistemas productivos en la Región Pampeana se han modificado en las últimas décadas por diferentes razones. En el área de estudio se ha dado una marcada conversión productiva, con un incremento de los sistemas basados en la agricultura continua. Para que estos esquemas sean sustentables y permitan mantener los rendimientos en grano a lo largo del tiempo, es necesario que estén diseñados sobre la base de tres pilares: la rotación de cultivos, la siembra directa y la fertilización (Ferrari, 2010). En los últimos años, la posibilidad de realizar rotación de cultivos ha estado cada vez más limitada debido al constante incremento del cultivo de soja de primera como único cultivo anual en detrimento de otros. Según las estadísticas del Sistema Integrado de Información Agropecuaria (SIIA, 2013), en la campaña 2000/2001 se registraron para los partidos de Junín, Rojas, Pergamino y San Nicolás la cantidad de 40.000 has, 38.000 has, 136.000 has y 33.000 has sembradas con soja de primera, respectivamente (restando a soja total la superficie de trigo). Mientras que para la campaña 2011/2012 en los mismos partidos se sembraron 120.000 has, 94.000 has, 178.350 has y 39.550 has logrando a una relación estimada de soja de primera:maíz:trigo de 5:1:1, 5:1:1, 14:1:1 y 12:2:1, respectivamente. Con respecto a la siembra directa, este sistema de labranza ha tenido un crecimiento incesante en el país desde principio de la década del '90. Para la campaña 2010/2011, se estimó que el área bajo esta práctica de manejo fue aproximadamente el 78.5% de la superficie cultivada en Argentina (AAPRESID, 2013) siendo muy probable que esta proporción sea mayor en el área de estudio. En cuanto a la fertilización, también ha registrado un incremento marcado en los últimos años. A nivel nacional se ha pasado de utilizar unas 300.000 t de fertilizantes en 1991 a aproximadamente 3.700.000 t en 2007. A pesar de estos incrementos, las relaciones Aplicación/Extracción de los principales nutrientes (N, P, K y S) en los cultivos extensivos indican balances negativos en todos los casos (Ferrari, 2010).

Por lo expuesto, en busca de incrementar la eficiencia en el uso de un recurso escaso como el agua en los sistemas agrícolas de secano regionales, es de importancia trabajar sobre el ajuste de herramientas simuladoras y su implicancia en la toma de decisiones que colaboren con la sustentabilidad de los recursos y sostenibilidad productiva.

En el presente trabajo, se planteó:

HIPÓTESIS

1) Los modelos de simulación de balance hídrico y las rutinas de agua incluidas en los modelos de cultivos muestran una menor predicción en la dinámica del perfil hídrico en suelos de texturas más finas.

2) Las herramientas de simulación permiten estimar, con un alto grado de ajuste, el balance del agua del suelo en cultivos de soja bajo siembra directa.

OBJETIVOS

1) Analizar parámetros edáficos y variables climáticas relacionadas con el balance hídrico en un suelo Argiudol típico, un Argiudol vértico y un Hapludol típico, en el cultivo de soja bajo siembra directa ubicados en el norte de la provincia de Buenos Aires.

2) Realizar el relevamiento de la evolución del contenido hídrico en el perfil del suelo y su predicción en los diferentes ambientes mediante un modelo de balance hídrico dentro de rutinas de agua establecidas en el modelo de simulación de cultivos DSSAT 4.5.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

1. Área de estudio

Las experiencias se llevaron a cabo en sitios cercanos a las localidades Junín, Pergamino y Conesa, entre los paralelos 33° 35' - 34° 33' S y los meridianos 60° 56' - 60° 19' O. En la figura 1 se muestra un detalle de la ubicación geográfica de cada uno los sitio.

El área pertenece a la Región de la Pampa Húmeda Argentina y explora dos subregiones: Junín, perteneciente a la Subregión Pampa Arenosa y, Pergamino y Conesa a la Subregión Pampa Ondulada. La Pampa Arenosa comprende un amplio sector que abarca el noroeste de Buenos Aires, noreste de La Pampa, sur-suroeste de Santa Fe y sureste de Córdoba. La Pampa arenosa está constituida por sedimentos loésicos modernos cuyas partículas disminuyen de tamaño de oeste a este, de relieve ondulado atenuado, con una red de drenaje poco definida constituyendo zonas con lagunas permanentes o temporarias y grandes cuencas arreicas muchas veces acompañada de alcalinización y salinización. Los suelos presentan excesiva permeabilidad, susceptibilidad a la erosión eólica y relativa baja fertilidad. La aptitud de la tierra es agrícola-ganadera aproximadamente en proporciones similares. Con respecto a la Pampa Ondulada, abarca el norte de la provincia de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba. Formada por sedimentos loésicos espesos cuya granulometría decrece de sudoeste a noreste. De relieve ondulado, drenado por arroyos y surcos bien definidos. Las principales limitaciones radican en la alta susceptibilidad a la erosión hídrica de algunos sectores agravada por la textura superficial franco-limosa y subsuperficial arcillosa (horizontes Bt). Se encuentran además suelos alcalinos y salinos propios de zonas adyacentes a depresiones. La aptitud de la tierra es agrícola, con rasgos ganaderos cercanos a vías de escurrimiento o sectores anegables, hidromórficos o alcalinos (SAGyP y CFA, 1995).

El clima del área en estudio es templado, con una precipitación media anual de 975 mm \pm 21,4 mm E.E. (serie 1910-2012). El 67% de las lluvias se concentran en el período octubre-marzo. Presenta un período libre de heladas meteorológicas de 253 días con fechas promedio de primera helada del 23 de mayo y de última helada del 12 de septiembre. La temperatura media anual de 16,5 °C, con máximos absolutos para enero cercano a los 38°C y mínimos absolutos para julio de -4°C. En el cuadro 1 se muestran variables meteorológicas medidas en la EEA INTA Pergamino (INTA, 2010).

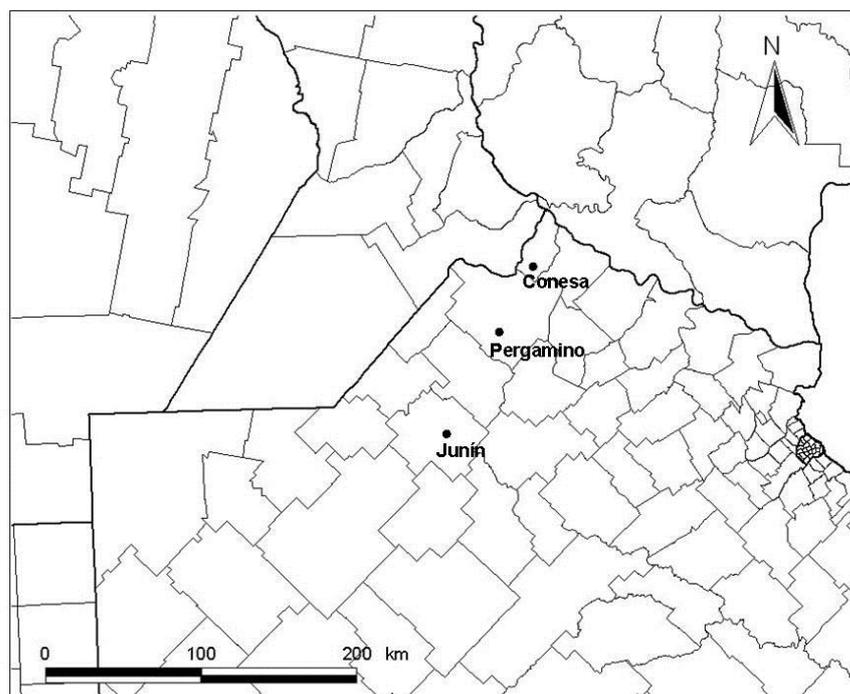


Figura 1. Área de estudio. Ubicación de los sitios: Junín (34°32,602'S 60°56,336'O), Pergamino (33°57,549'S 60°34,642'O) y Conesa (33°35,418'S 60°20,387'O).

Variable	Período	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temp. Máxima (°C)	1967/2012	30,1	28,6	26,7	23,1	19,5	15,7	15,6	17,6	20,2	22,8	26,1	29,2
Temp. Media (°C)	1967/2012	23,4	22,2	20,3	16,7	13,3	10,1	9,9	11,1	13,4	16,5	19,4	22,3
Temp. Mínima (°C)	1967/2012	16,7	15,8	13,9	10,2	7,2	4,6	4,1	4,6	6,6	10,1	12,7	15,4
Precipitación (mm)	1910/2012	108,6	106,2	124,9	96,7	58,7	36,4	35,4	40,6	55,1	105,6	100,3	106,2
Humedad relativa (%)	1967/2012	69	72	74	74	76	78	77	73	70	72	69	66
Heliofanía efec. (h)	1967/2012	9,4	8,9	7,7	6,7	5,9	4,9	5,3	6,5	7,1	7,4	9,1	9,2
Heliofanía relativa (h)	1967/2012	67	66	61	59	54	48	52	57	60	58	63	63
Velocidad viento (km/h)	1967/2012	9,0	8,1	7,9	8,1	8,5	9,7	10,3	10,7	11,4	11,1	10,6	9,7
Heladas Agronómicas (d)	1992/2012	0,0	0,0	0,0	1,9	6,9	11,5	14,8	12,8	7,3	1,2	0,5	0,2
Heladas Meteorológicas (d)	1967/2012	0,0	0,0	0,0	0,2	2,0	5,5	7,0	5,0	2,1	0,2	0,0	0,0

Cuadro 1. Variables meteorológicas: promedios de distintos períodos. Fuente: Estación Meteorológica EEA INTA Pergamino.

Las unidades experimentales fueron macroparcelsas ubicadas en lotes de productores perteneciendo a las series de suelo Junín, Pergamino y Ramallo (Carta de Suelo INTA, hojas 3560-8-3, 3360-32-4 y 3360-27-3). La clasificación taxonómica según el sistema Soil Taxonomy (2006), corresponde a los subgrupos Hapludol típico, Argiudol típico y Argiudol vértico, para las series de suelo Junín, Pergamino y Ramallo, respectivamente. En el Anexo I se muestran en detalle la descripción según Cartas de Suelo de cada una de las series estudiadas.

Los lotes seleccionados en cada localidad presentaban historias de manejo similares. Entre 28 y 18 años de agricultura continua, de 8 a 12 años bajo siembra directa (SD) donde el principal cultivo utilizado fue soja de 1ra. El cultivo antecesor a los experimentos también fue soja de 1ra, a los fines de homogeneizar tipo y cantidad de rastrojo. Las pendientes del área fueron inferiores a 0,3% para disminuir escurrimientos superficiales y sin influencia de napa freática para poder analizar en la zona radical únicamente la recarga de agua proveniente de las precipitaciones. En el cuadro 2 se detallan las características relacionadas al tipo de suelo, cultivo antecesor, historia previa de cada lote en estudio.

Localidad	Suelo		Historia			Pendiente (%)	Profundidad media freática (m)
	Tipo	Serie	AC (años)	SD (años)	Antecesor		
Junín	Hapludol típico	Junín	18 *	12 *	Soja 1ra	0,3 **	3,8 ***
Pergamino	Argiudol típico	Pergamino	28 *	8 *	Soja 1ra	0,2 **	6,2 ***
Conesa	Argiudol vértico	Ramallo	20 *	8 *	Soja 1ra	0,2 **	6,0 *

Cuadro 2. Características de los sitios experimentales. Datos relevados en encuesta a productor (*), observados (**) y obtenidos en estaciones meteorológicas (***). AC: agricultura continua, SD: siembra directa.

2. Variables registradas

En los tres sitios se registraron variables de suelo, cultivo y clima. En cada uno de ellos se delimitaron macroparcels de un área de 75 m² para realizar las mediciones de suelo y cultivo. Cada macroparcels estuvo georreferenciada y estaqueada.

Las mediciones en las macroparcels se llevaron a cabo durante los ciclos agrícolas 2009/2010 y 2010/2011. Se sembraron con soja de primera coincidiendo con fechas, cultivares y manejo consensuado con el productor.

2.1. Variables de cultivo y manejo

Para la localidad de Junín los cultivares utilizados fueron ADM 4210 y SPS 4x99 con fechas de siembra 23/11/2009 y 3/12/2010, respectivamente. Para Pergamino los cultivares fueron DM 50048 y NA 4613 con fechas de siembra del 8/12/2009 y 9/12/2010. Por último y para la localidad Conesa, los cultivares fueron DM 4870 y DM 5.5i sembrados el 11/11/2009 y 9/11/2010. Las distancias entre surcos fueron: de 0,35 m en Junín y de 0,525 m en las otras dos localidades. Se contabilizó la densidad de plantas logradas y se corroboró una adecuada distribución para la ubicación del sitio experimental. Los factores reductores del rendimiento, como malezas, enfermedades y plagas, fueron controlados debidamente según las recomendaciones zonales o umbrales de daño económico. Se fertilizó con mezclas físicas 7-40-0-5 y 0-33-0-6 con dosis de 50 a 70 kg/ha (cuadro 3).

	Ciclo	Variedad	GM	FS	DES	Densidad (pl/ha)	Fertilización
Junín	2009-2010	ADM 4210	4.3	23-Nov	35 cm	360000	50 kg/ha Mezcla física (7-40-0-5)
	2010-2011	SPS 4x99	4.8	03-Dic	35 cm	330000	70 kg/ha Mezcla física (0-33-0-6)
Pergamino	2009-2010	DM 50048	4.8	08-Dic	52,5 cm	325000	65 kg/ha Mezcla física (0-33-0-6)
	2010-2011	NA 4613	4.8	09-Dic	52,5 cm	320000	60 kg/ha Mezcla física (0-33-0-6)
Conesa	2009-2010	DM 4870	4.8	11-Nov	52,5 cm	292000	70 Kg/ha Mezcla física (7-40-0-5)
	2010-2011	DM 5.5i	5 medio	09-Nov	52,5 cm	298000	70 Kg/ha Mezcla física (7-40-0-5)

Cuadro 3. Variedad utilizada, grupo de madurez (GM), fecha de siembra (FS), distancia entre surcos (DES), densidad de plantas lograda y fertilización.

Se determinó la fecha de ocurrencia de los siguientes estadios fenológicos: emergencia, inicio de floración (R1), inicio de llenado de granos (R5) y madurez fisiológica (R7) y madurez comercial (R8) según la escala de Ferh y Caviness, 1977.

En R8 se procedió a realizar la cosecha manual. Se obtuvieron dentro de cada macroparcela muestras representativas al azar de 2 m lineales de surco por cuatro repeticiones. La trilla se realizó mediante una máquina estática marca Wintersteiger modelo 1986 en la EEA INTA Pergamino. De cada muestra se obtuvo el rendimiento en grano y la humedad, como así también sus componentes: peso de 1000 granos (g), y número de granos.m⁻².

2.2. Variables del suelo

En cada sitio experimental se confeccionaron trincheras de 2,5 m de largo por 0,4 m de profundidad para evaluar el estado estructural mediante la realización de perfiles culturales según la metodología propuesta por Manichon (1982), con la finalidad de corroborar la ausencia de áreas con compactaciones extremas en los horizontes superficiales que alteren el sistema poroso y consecuentemente la dinámica del agua.

Se realizaron calicatas de 1m por 1,5m por 2m de profundidad para describir el perfil del suelo, a los fines de confirmar su correspondencia con los perfiles modales mencionados para cada serie de suelo (figura 2). En el caso de Junín se tuvo especial atención debido a que el sitio se encuentra sobre una Unidad Cartográfica combinada (Ju2) donde la serie Junín se encuentra asociada en el espacio con la serie de suelo La Oriental (Carta de Suelo INTA, hojas 3560-8-3).

Se procedió a determinar la secuencia y el espesor de cada horizonte, para luego extraer muestras de cada estrato a las cuales se les realizaron las siguientes determinaciones analíticas:

Densidad aparente (DA): método del cilindro (Blake y Hartge, 1986). Se utilizó un cilindro de acero inoxidable de 70 mm de diámetro y 42 mm de altura. Se extrajeron cuatro repeticiones por horizonte. Para mejorar las condiciones de extracción, principalmente en los horizontes texturales, y evitar alteraciones de la muestra por golpes manuales, se empleó una prensa hidráulica (figura 3).

Carbono orgánico oxidable (CO): método de Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1982). Se produjo la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio en ácido sulfúrico concentrado durante 30 minutos, titulando luego el exceso del agente oxidante con sulfato amónico ferroso. Se calculó el porcentaje de materia orgánica a través de la fórmula: $MO = Cox \times 1,724$, donde MO: materia orgánica; Cox: carbono orgánico oxidable; 1,724: factor de conversión de carbono a materia orgánica, basado en la hipótesis que la materia orgánica del suelo tiene un 58 % de Carbono.

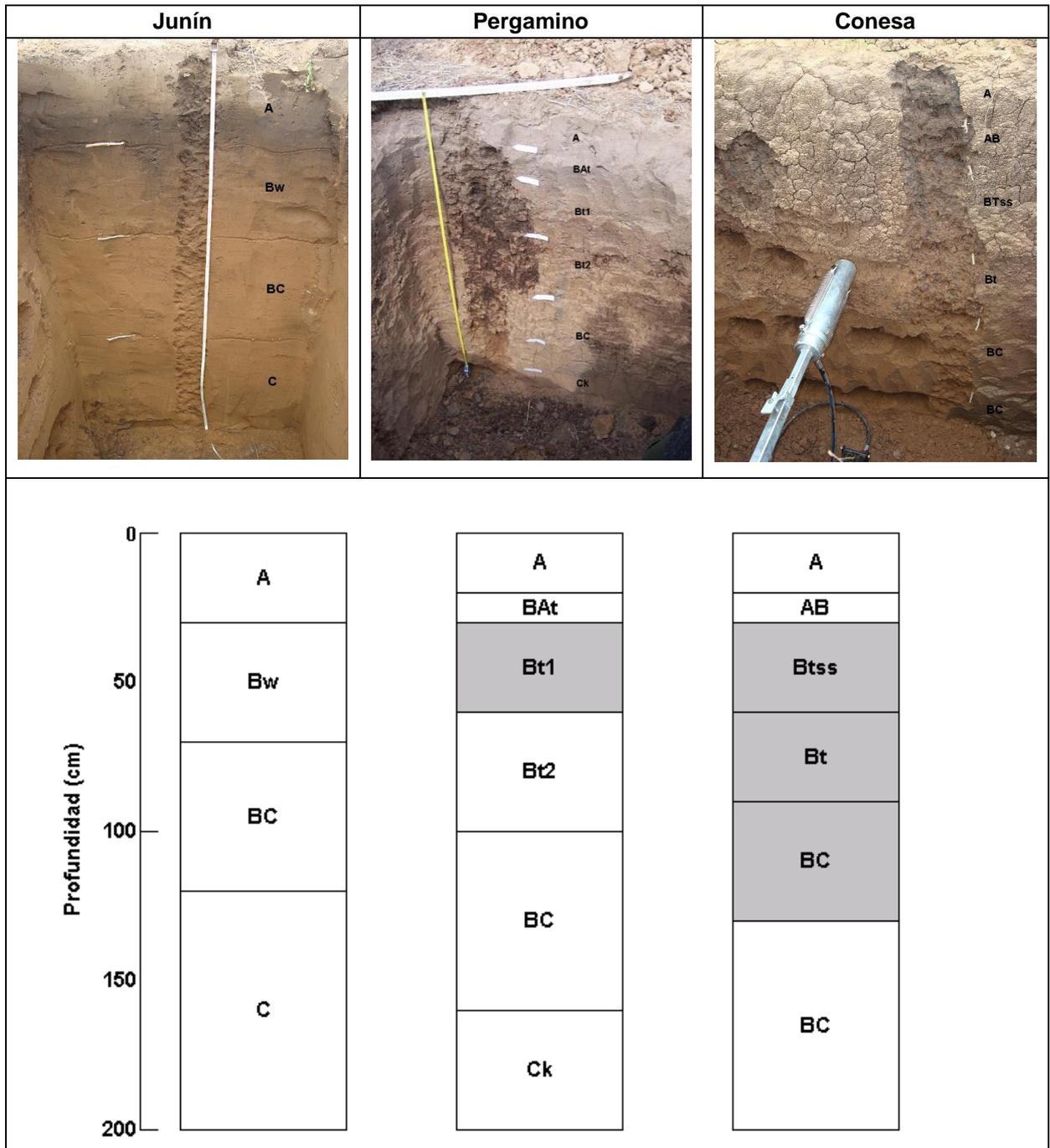


Figura 2. Calicatas de las cuales se obtuvieron los parámetros para el presente estudio. Detalle de la secuencia de horizonte. Los horizontes señalados en color gris presentaron más de 33% de arcilla.

Composición mineralógica: método de la pipeta (Day, 1965). Determinación de las proporciones porcentuales de las agrupaciones por tamaño de las partículas primarias inferiores a 2 mm de diámetro: porcentaje de arcilla, limo y arena. Se procedió a la destrucción de los agentes cementantes que actúan como elementos de unión de partículas

primarias entre sí. Luego se produjo la dispersión de la muestra con solución de hexametáfosfato de sodio que tiene por objeto la actuación individual de las partículas en el seno de un medio líquido, elevando el potencial electrocinético de la fracción coloidal (arcilla), de modo que ésta se mantenga en estado de suspensión. Posteriormente, se realizó la determinación de arcilla y limo a distintos tiempos, mediante el uso del densímetro, fundamentado esto en la velocidad de sedimentación de las partículas en un fluido de viscosidad uniforme, que se obtiene como aplicación de la Ley de Stokes.



Figura 3. Prensa hidráulica para muestreo de densidad aparente. Gentileza Ing. Agr. C. Pecorari.

Punto de marchitez permanente (PMP): en placa extractora de presión a 1,5 MPa (membrana de Richards) con muestra disturbada (figura 4). Se ubicaron las muestras sobre la placa, previamente saturada y se humedecieron por inmersión de la placa. Se cubrió el fondo del extractor con agua para crear una atmósfera saturada y se ubicó un disco plástico en la parte superior de cada muestra para evitar la evaporación. Luego de extraer el exceso de agua, se aplicó la presión deseada mediante los reguladores del compresor de aire mecánico. Una vez que el agua recogida ha llegado a volumen constante, se llevó a estufa y se obtuvo el valor de PMP por diferencia.



Figura 4. Membrana de Richard para determinar el Punto de Marchitez Permanente (PMP).

Capacidad de campo (CC): con muestras sin disturbar mediante mesa de tensión a 0.02 MPa (ISO/FDIS 11274, 1998). Las muestras de suelo fueron tomadas con cilindros metálicos de 30 mm por 50 mm (figura 5). Se extrajeron cuidadosamente tres muestras de cada horizonte para asegurar mínima compactación y disturbio de la estructura, por presión con la mano. Se pesaron y ubicaron los cilindros en una mesa de tensión a la presión mátrica deseada por 2 días (figura 6). Las muestras se pesaron hasta estar en equilibrio y se secaron en estufa obteniendo por diferencia el valor de CC.



Figura 5. Cilindros de muestreo para la determinación de Capacidad de Campo (CC).

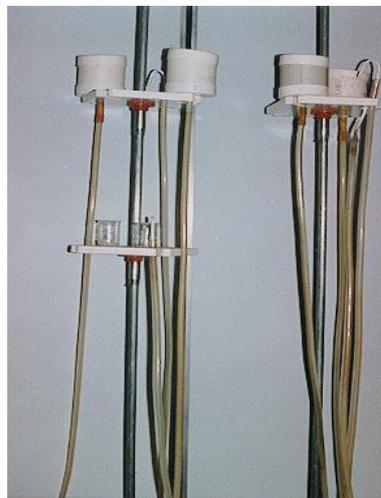


Figura 6. Mesa de tensión para la determinación Capacidad de Campo (CC).

Capacidad de agua útil (CAU): se procedió al cálculo para cada uno de los sitios en estudio de la CAU, mediante la sumatoria de las capacidades individuales de cada horizonte hasta los 2 m de profundidad.

Para el cálculo de la CAU, expresada en mm, se utilizó la fórmula:

$$CAU = \sum \frac{(CC - PMP) * DA * EH * 10}{g * cm^{-3}}$$

donde:

CC = Agua retenida a Capacidad de Campo, expresada en $g \cdot g^{-1}$

PMP = Agua retenida a Punto de Marchitez Permanente, expresada en $g \cdot g^{-1}$

DA = Densidad aparente, expresada en $g \cdot cm^{-3}$

EH = Espesor del Horizonte, expresado en cm

10 = constante para pasar a mm

Agua útil (AU): se calculó la lámina (L) de AU hasta los 2 m de profundidad, en mm. Esta lámina se determinó para cada horizonte como la diferencia entre la humedad gravimétrica (HG) actual menos el PMP multiplicada por la DA a los fines de convertir en humedad volumétrica (HV), y por su espesor. Las muestras se colocaron y conservaron en vasos plásticos herméticos inmediatamente después obtenidas y se transportaron dentro de recipiente aislante hasta el laboratorio. Luego se colocaron en estufa durante 24hs a 105°C (Gardner, 1986) para obtener la HG.

Donde:

HG = (peso húmedo – peso seco) / peso seco ($g \cdot g^{-1}$; $tn \cdot m^{-3}$)

HV = HG . DA ($cm^3 \cdot cm^{-3}$; $m^3 \cdot m^{-3}$)

L = HV . EH (mm; cm)

Para realizar los muestreos se utilizaron dos barrenos de profundidad: uno con una extensión de 1,4 m y otro con 2,15 m de largo. El de menor longitud fue utilizado para el primer metro de profundidad y el segundo para el espesor restante hasta llegar a los 2 m. Ambos barrenos presentaron un colector de 3 cm de diámetro.

Para elegir el momento de muestreo se tuvo en cuenta la fecha de siembra, para cuantificar el AU inicial y el momento de ocurrencia de los estadios fenológicos R1, R5 y R7 contabilizando así cuatro muestreos de AU para cada campaña de análisis. Se tuvo especial cuidado en evitar los muestreos cercanos a lluvias significativas recientes para no contabilizar la presencia de agua gravitacional. El seguimiento del contenido hídrico a profundidad se determinó mediante la obtención de muestras de suelo a intervalos de 10 cm. En cada fecha de muestreo, se realizaron cinco repeticiones. Con la finalidad de contemplar las variaciones en estados estructurales debidas a agentes antrópicos que

podieran modificar la retención del agua del suelo (De Battista *et al.*, 1992), además de la heterogeneidad de los planos de humedecimiento y desecación, cada repetición se extrajo en cinco entresurcos consecutivos en sentido perpendicular a la dirección de siembra (figura 7). Entre fechas de muestreo, se mantuvo la metodología descrita anteriormente con la precaución de avanzar 1,5 a 2 m del muestreo anterior en el sentido de siembra. Para esto, además de la georreferenciación, fue necesario marcar con estacas el muestreo anterior. Además, se controló que las plantas a ambos lados del muestreo sean representativas en cantidad y distribución (figura 8).

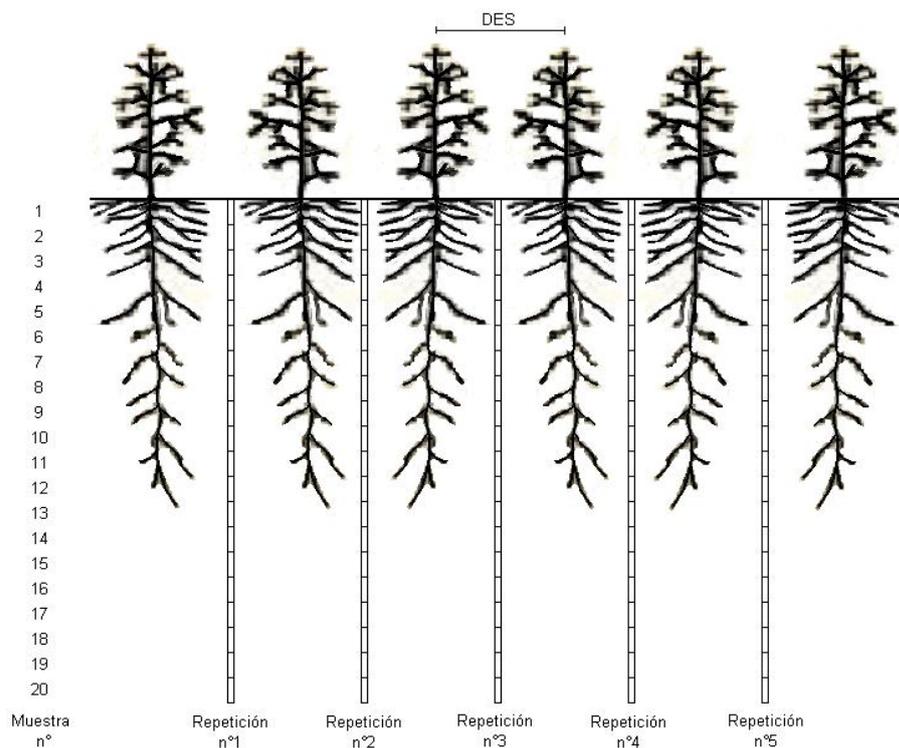


Figura 7. Esquema de muestreo para las 3 localidades en cada uno de los 4 momentos de muestreo. Detalle de las 5 repeticiones por fecha, las 20 muestras por repetición y la distancia entre surcos (DES).

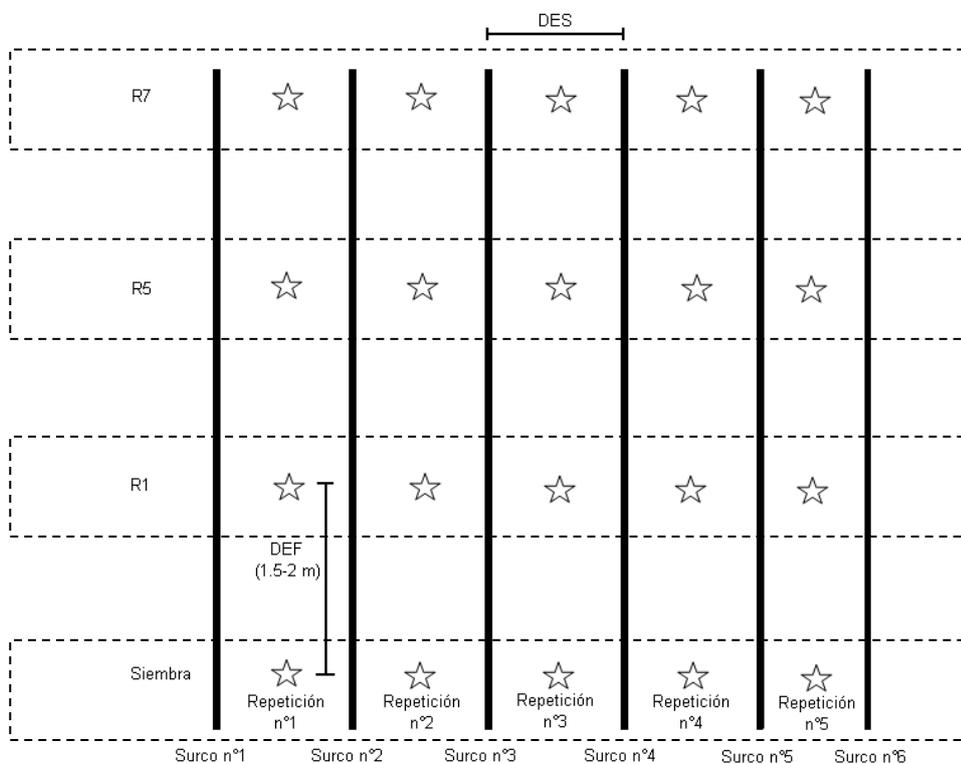


Figura 8. Esquema de muestreo en cada localidad. Detalle de la ubicación en el entresurco de las 5 repeticiones (estrellas) para cada una de las 4 fechas (zona punteada). Detalle de la distancia entre fechas (DEF) de muestreo.

2.3. Variables de clima

Se registraron variables climáticas y meteorológicas en dos estaciones meteorológicas y dos pluviómetros aledaños a las macroparcels de Pergamino y Conesa.

Los sitios fueron:

- 1) Estación meteorológica del aeródromo de Junín (34°33,152'S, 60°55,876'O).
- 2) Estación meteorológica de la EEA INTA Pergamino (33°56,668'S, 60°34,124'O).
- 3) Pluviómetro en el campo del productor de Conesa (33°35,069'S 60°20,875'O).
- 4) Pluviómetro en la macroparcels de Pergamino (33°57,549'S, 60°34,642'O).

La toma de datos de lluvia se realizó en forma diaria en las estaciones 1 y 2. En el caso de los sitios 3 y 4, un informante calificado realizó las lecturas de los valores de lámina precipitada.

El resto de las variables registradas diariamente en las estaciones 1 y 2 fueron:

- Temperatura máxima y mínima tomadas en casilla meteorológica con termómetros de máxima y mínima a las 9, 15 y 21 hs.
- Humedad relativa del aire, máxima y mínima tomadas con psicrómetro (termómetro seco y húmedo) a las 9, 15 y 21 hs.
- Heliofanía efectiva mediante el registro de un heliofanógrafo. El análisis de la faja de dicho instrumento fue diario. Permitió calcular las horas de insolación y caracterizar la radiación incidente.
- Velocidad del viento tomada por anemómetro a 2 m. de altura a las 9, 15 y 21 hs., obtención del valor medio diario.

La justificación del uso de dichas variables radica en su implicancia sobre los balances hídricos: salidas y entradas del sistema. Se pudieron calcular los aportes por lluvia, la demanda evapotraspirativa, control sobre el desarrollo y crecimiento, entre otros.

3. Modelo utilizado

Se utilizó el sistema de simulación agronómica DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) versión 4.5 y su modelo CROPGRO-soybean. El DSSAT es un sistema modular en el cual se relacionan diferentes bases de datos, modelos de cultivos, aplicaciones y software (Jones, et al. 2003). Su principal objetivo es simular el crecimiento y el desarrollo de cultivos considerando clima, genotipo, suelo y manejo, pudiendo realizar análisis para una campaña o en rotaciones, constituyendo una herramienta que permite predecir posibles comportamientos y así ajustar las prácticas de manejo para definir estrategias productivas. El CROPGRO-soybean es un modelo de cultivo funcional para simular crecimiento, desarrollo, y rendimiento de soja bajo diferentes climas, suelos y condiciones de manejo. Varios estudios lo han utilizado para diferentes propósitos (Hoogenboom *et al.*, 1992; Boote *et al.*, 1997; Meira y Guevara, 1997), algunos de los cuales destacan la importancia de ajustes metodológicos relacionados con el crecimiento radical y los componentes de extracción de agua para lograr un buen desempeño del modelo en producciones de secano (Calmon *et al.*, 1999a; Dardanelli *et al.*, 2003.; Mercau *et al.*, 2007).

Para poder trabajar con este modelo, se requiere de la carga de un conjunto mínimo de datos. A continuación se presentan los componentes principales del modelo utilizado.

Descripción de componentes

Módulo suelo

Se encuentra representado por un conjunto de capas horizontalmente homogéneas y constituido por un número determinado de estas capas (horizontes) dispuestas verticalmente. Este módulo integra la información de cuatro submódulos: agua, carbono y nitrógeno, temperatura y dinámica.

Submódulo agua

Calcula los cambios diarios en el contenido de agua del suelo por horizonte, considerando la infiltración de la lluvia o del riego, el drenaje vertical, el flujo no saturado, la evaporación del suelo, los procesos de toma de agua de raíz y transpiración de las plantas. Utiliza parámetros que describen las condiciones de superficie y de cada horizonte. Aplica un enfoque de tipo "cascada" donde el agua pasa de horizonte a otro cuando en el primero se supera el límite superior de drenaje o CC. También considera de manera conservadora el flujo ascendente insaturado. Particiona la precipitación en escorrentía e infiltración teniendo en cuenta el método del Servicio de Conservación de Suelos sobre la base de una curva número. Permite analizar las condiciones de infiltración mediante el método de Ritchie o sin considerar los efectos del rastrojo. El drenaje a profundidad se realiza sobre un parámetro

global el cual se supone constante a profundidad, no obstante considera el valor de conductividad hidráulica saturada de cada horizonte para contabilizar y controlar el agua que pasa a través de él. La evaporación desde la superficie del suelo y la absorción de agua por la raíces se computan por medio del módulo suelo-planta-atmósfera y por los balances energéticos intervinientes.

Submódulo balance de carbono y nitrógeno

El DSSAT posee dos opciones para simular los balances de materia orgánica del suelo (MOS) y nitrógeno: una basada en la metodología de Godwin y la otra denominada Century. Esta última permite simular la MOS según la rotación de cultivos, considerando largos periodos de tiempo y el carbono inicial. Además, divide la MOS en tres fracciones: una fácilmente degradable, otra de degradación intermedia (lignina, paredes celulares, etc.) y una tercera de difícil degradación, cada una de las cuales tiene una relación C:N y pueden mineralizar o inmovilizar nutrientes. La velocidad de descomposición depende de la textura, temperatura y contenido de agua.

La mayoría de las variables de entrada a este submódulo provienen de la interfaz con los submódulos agua y temperatura de suelo. La lixiviación o transporte de N a través del suelo a las capas más profundas se basa en valores de flujo de agua obtenidos a partir del submódulo agua del suelo. De la interacción con el submódulo planta se considera el aporte de materia seca superficial diaria producto de la senescencia del cultivo o partes de él.

Submódulo temperatura

La temperatura del suelo se calcula a partir de la temperatura del aire y a profundidad a través de la temperatura media anual del aire y la amplitud de las temperaturas medias mensuales. También incluye un método simple para calcular el impacto de la radiación solar y el albedo sobre la temperatura superficial del suelo. No se consideran diferencias en la humedad del suelo o condiciones de la superficie (cobertura, etc). La temperatura del suelo se utiliza para modificar algunos procesos del cultivo (por ejemplo, emergencia) y la descomposición de la MOS.

Submódulo dinámica

Considera características de la estructura del suelo por horizonte. Está diseñado para que en un futuro se pueda analizar la respuesta de propiedades del suelo a distintos manejo, por ejemplo, MOS ante distintas labranzas.

Modulo climático

Su principal función es leer o generar información climática diaria. Las principales variables utilizadas son temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación y los

promedios diarios de radiación solar, humedad relativa (o déficit presión de vapor) y velocidad del viento. Permite generar archivos climáticos horarios requeridos por otros módulos. También da la opción de modificar los valores diarios para estudiar el cambio climático o la realización de experimentos simulados variando la radiación solar, la lluvia, las temperaturas, la duración del día, concentraciones de CO₂ en la atmósfera, etc.

Módulo suelo-planta-atmósfera

En base a la relación entre las características de suelo, planta y atmósfera, este módulo calcula en forma diaria la intercepción de luz por el canopeo, la evapotranspiración potencial, la evaporación del suelo, la transpiración del cultivo y la absorción de agua por raíces de cada horizonte. El módulo calcula primero la radiación solar neta diaria, teniendo en cuenta el albedo combinado de suelo y cultivo. Se calcula la evapotranspiración potencial usando alguna de dos opciones disponibles. Una de ellas, utilizada por el modelo por defecto, es la metodología Priestley y Taylor la cual requiere sólo radiación solar diaria y la temperatura. La segunda opción es el método Penman-FAO, en este caso los archivos de datos meteorológicos deben incluir además velocidad del viento y humedad relativa, muchas veces no disponibles en la Región Pampeana (Mercau *et al.*, 2007).

La evapotranspiración potencial se divide en evaporación potencial del suelo y la transpiración potencial del cultivo. La evaporación actual del suelo variará según el contenido hídrico superficial y de la demanda atmosférica. Para determinar si el suelo o la atmósfera limitan la transpiración de las plantas, el módulo calcula la absorción potencial de agua por las raíces previo cálculo del flujo máximo del agua a las raíces por horizonte y su sumatoria. Estos cálculos consideran por horizonte la densidad longitudinal de raíces y el contenido de agua. La transpiración actual del cultivo se calcula en función de la mínima tasa de transpiración potencial de la planta y la absorción potencial de agua por las raíces. Este método de cálculo de la evapotranspiración proporciona un excelente enfoque funcional para la determinación de estrés hídrico en la planta sin modelar el contenido hídrico en cada componente de la planta. Si la relación evapotranspiración real / evapotranspiración potencial es inferior a 1, en algún momento del día el intercambio gaseoso estomático tendría que disminuir para evitar el desecamiento de la planta. Esta relación es utilizada para reducir la fotosíntesis en proporción a la disminución relativa en la transpiración. Del mismo modo, se utiliza una relación de la absorción potencial de agua por la raíz y de la transpiración potencial del cultivo para reducir la turgencia de la planta y el crecimiento del cultivo. Esto está explicado porque a medida que el agua del suelo se convierte en un factor más limitante, disminuye la turgencia en las hojas y afecta la expansión de las hojas con posterior reducción de la tasa fotosintética y fijación de carbono.

Módulo patrón de cultivo (CROPGRO)

Este presenta una estructura modular versátil la cual funciona con archivos de entrada que definen las características de la especie. Poseen información sobre las temperaturas base y temperaturas óptimas para los procesos de desarrollo y el crecimiento; parámetros que regulan procesos como fotosíntesis, respiración, uso de carbono y nitrógeno, fijación de nitrógeno y senescencia. También utiliza parámetros de partición de materia seca con jerarquía a los distintos órganos según su aparición.

Módulo de manejo

Considera la fecha de siembra. Determina la fecha de cosecha según las características de crecimiento, condiciones climáticas, entre otras. Permite manejar el riego, determina el riego diario, basado en lectura de los valores o en modo automático sobre cálculos según umbrales de agotamiento del agua en el suelo. Contempla la adición de nutrientes vía fertilizantes inorgánicos o abonos orgánicos de manera indicada o simulada en rotación de cultivos.

Variables utilizadas para operar el modelo

En base a la descripción de los sitios experimentales se ajustaron los distintos requerimientos de variables de entrada y se generaron los archivos necesarios de clima, suelo y genotipo de cada localidad y ciclo agrícola. A saber:

Sitio: latitud, longitud, altitud, temperatura media anual, amplitud térmica promedio anual, pendiente, sombreado por algún obstáculo, obras o tipo de drenaje, profundidad máxima de exploración radical.

Clima: información diaria de temperatura del aire máxima y mínima, radiación global, precipitaciones, velocidad del viento y punto de rocío.

Suelo: clasificación taxonómica a nivel de familia (USDA-NRCS), coeficiente de drenaje (SLDR), escurrimiento superficial o curva número (SLRO), albedo. Por horizonte se utilizó capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente, carbono orgánico, porcentaje de arena, arcilla y limo, pH, salinidad, conductividad hidráulica saturada y factor de crecimiento de las raíces (SRGF). El SRGF es un parámetro empírico para describir el crecimiento de raíces. Determina la capacidad de las raíces para crecer y explorar una capa de suelo, influyendo sobre la densidad de raíces y sobre la cantidad potencial de agua que puede extraer dicha capa (Boote, K. *et al.*, 2008; Ma, L. *et al.*, 2009). El SLDR se refiere a la rapidez o facilidad con que el agua es eliminada del suelo, tanto por infiltración a la capa freática como por escurrimiento superficial. Por último, el SLRO caracteriza las condiciones de escurrimiento considerando relieve, condiciones físicas,

cobertura vegetal e infiltración. Una vez ajustadas las variables de los distintos módulos, el SRGF, como así también el SLDR y el SLRO, influyen marcadamente en los balances hídricos (Guevara E., comunicación personal).

Condiciones iniciales: humedad volumétrica, nitrógeno de nitrato y amonio por horizonte; cultivo previo con su peso de raíces y rastrojo remanente (Irizar A., comunicación personal). Nodulación del cultivo.

Manejo: fecha, profundidad y tipo de siembra; distancia entre surcos y dirección; plantas logradas. Fertilizantes inorgánico e inoculante aplicados. Tipo de labranza y cosecha.

Genotipo: nombre y tipo de cultivar, coeficientes genéticos ajustados (Meira, comunicación personal).

Variables utilizadas para evaluar el modelo

Fenología: fecha de floración, inicio de llenado de granos y madurez fisiológica.

Agua de suelo: humedad volumétrica en función del tiempo en intervalos de profundidad seleccionados.

Rendimiento en grano por unidad de área, número de granos por unidad de área y peso medio del grano.

4. Análisis de la información

Para evaluar el ajuste entre los datos observados y simulados, se utilizó la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), la desviación media (MD) y el coeficiente de variación (CV), según Hoogenboom *et al.*, 1999.

La RMSE es la raíz cuadrada de la sumatoria de las diferencias al cuadrado entre los valores observados y simulados y refleja la magnitud de la diferencia media entre predicho y los valores medios. La MD indica si existe un sesgo sistemático de los valores simulados. El CV es el porcentaje que el RMSE representa de la media de los valores observados y es una medición relativa de la cantidad de variación no explicada e independiente de la unidad de medida utilizada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}$$

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)$$

$$CV = \frac{RMSE}{\text{media obs}} \text{ donde:}$$

n = es el número de pares de datos.

y_i = es el valor simulado.

x_i = es el valor observado.

media obs = es el promedio de todos los valores observados

Se estudió la relación funcional entre una variable respuesta Y (variable dependiente) y una o más variables regresoras X (variables independientes o predictoras) por medio de Regresión Lineal Simple y Regresión Lineal Múltiple, respectivamente (Draper y Smith, 1998). En estas regresiones se evalúa cómo los cambios en la/s variable/s predictor/a/s afectan a la variable respuesta, mediante el ajuste de un modelo para la relación funcional entre ambas. La relación entre las variables se modela según:

Regresión lineal simple

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

Regresión lineal múltiple

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

y_i = i-ésima observación de la variable dependiente Y

$x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ = i-ésimo valor de las variables regresoras X_1, X_2, \dots, X_k o independientes

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

β_1, \dots, β_k = parámetros desconocidos que representan las tasas de cambio en Y frente al cambio unitario de X_1, X_2, \dots, X_k , respectivamente

ε_i = término de error aleatorio

Por otro lado, antes de determinar un modelo de regresión lineal se redujo la dimensión de variables mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP) para la selección de grupos de variables con baja correlación que ingresarán como predictoras en los modelos de regresión lineal. La selección de los modelos de regresión de mejor ajuste fue realizada mediante análisis de residuos parciales y vía el procedimiento backward de selección de variables (Draper y Smith, 1998). La capacidad predictora de cada modelo fue evaluada en base al error cuadrático medio de predicción, RMSE, MD o CV. Los análisis fueron realizados con el software estadístico InfoStat (InfoStat, 2008).

CAPÍTULO III RESULTADOS

1. Registro de variables

1.1 Suelo, clima y cultivo

La caracterización de variables del suelo para cada uno de los sitios experimentales se presenta en el cuadro 4. Se confirmó la correspondencia de los perfiles escogidos con los perfiles modales y sus variaciones admisibles según carta de suelo (Anexo I). Se observaron diferencias en los parámetros edáficos relacionados a la dinámica del agua tales como capacidad de retención, infiltración, escurrimiento superficial, impedancias al crecimiento radical y abastecimiento hídrico del cultivo, que resultan en comportamientos con diferencias mayores entre Hapludoles y Argiudoles, que entre Argiudoles típicos y vérticos en la relación funcional suelo-planta-atmósfera.

	Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo (%)	MO (%)	DA (g/cm ³)	PMP (cm ³ /cm ³)	CC (cm ³ /cm ³)	CAU (mm)
JUNIN	A	0-30	15,8	52,5	31,7	2,36	1,39	0,139	0,302	269,4
	Bw	30-70	18,2	54,3	27,5	0,57	1,30	0,140	0,306	
	BC	70-120	11,3	60,8	27,9	0,31	1,29	0,111	0,239	
	C	120-200	7,9	65,3	26,8	0,12	1,26	0,097	0,210	
PERGAMINO	A	0-20	22,7	12,3	65,0	2,76	1,26	0,190	0,370	348,6
	BAt	20-30	30,3	12,9	56,8	1,50	1,35	0,196	0,375	
	Bt1	30-63	43,5	9,0	47,5	1,10	1,39	0,230	0,406	
	Bt2	63-100	30,2	13,4	56,4	0,60	1,33	0,217	0,397	
	BC	100-160	17,0	17,5	65,5	0,41	1,24	0,158	0,329	
	Ck	160-200	7,0	23,1	69,9	0,26	1,23	0,151	0,320	
CONESA	A	0-19	29,4	11,6	59,1	3,10	1,27	0,186	0,364	390,7
	AB	19-31	45,1	10,0	44,9	1,31	1,33	0,246	0,462	
	Btss	31-61	55,8	8,9	35,4	0,86	1,40	0,336	0,560	
	Bt	61-89	43,7	11,5	44,7	0,26	1,37	0,305	0,505	
	BC	89-131	33,3	13,9	52,7	0,14	1,27	0,257	0,451	
	BC	131-200	19,0	17,5	63,5	0,02	1,23	0,202	0,385	

Cuadro 4. Propiedades edáficas para los tres sitios experimentales. Porcentajes de arcilla, arena, limo y materia orgánica (MO), densidad aparente (DA), agua retenida a punto de marchitez permanente (PMP), agua retenida a capacidad de campo (CC) y capacidad de agua útil (CAU)

En los tres sitios estudiados, se observó un amplio rango de valores en las variables climáticas (cuadro 5). Las lluvias acumuladas durante el ciclo del cultivo presentaron variaciones entre 481 mm a 1000 mm en ambas campañas estudiadas, destacándose los valores elevados de precipitaciones acumuladas en el subperíodo vegetativo (S-R1) correspondiente a la campaña 2009-2010. De la misma manera, igual de notable y diferente es la precipitación acumulada para Pergamino en el subperíodo R5-R7 y si tomamos R1-R5 sobre todo para la campaña 2009-2010. En cuanto a las temperaturas y a la radiación global acumulada, las variaciones se dieron principalmente por las diferentes fechas de siembra y campañas.

	Unidad	JUNIN		PERGAMINO		CONESA	
		09-10	10-11	09-10	10-11	09-10	10-11
Precipitaciones acumuladas S-R1	mm	498	168	432	248	586	178
Precipitaciones acumuladas R1-R5	mm	197	220	258	220	162	285
Precipitaciones acumuladas R5-R7	mm	212	93	47	65	252	77
Precipitaciones acumuladas S-R7	mm	907	481	737	533	1000	540
Temperatura media S-R1	°C	21,3	23,5	23,4	22,7	21,7	21,6
Temperatura media R1-R5	°C	24,2	22,0	23,6	20,9	23,7	21,2
Temperatura media R5-R7	°C	20,9	19,8	20,9	18,4	22,1	19,1
Radiación global acumulada S-R1	MJ.m ⁻²	1226	1321	1186	1324	1045	1759
Radiación global acumulada R1-R5	MJ.m ⁻²	802	846	678	759	913	879
Radiación global acumulada R5-R7	MJ.m ⁻²	650	730	698	637	944	683

Cuadro 5. Variables climáticas en distintos subperíodos de desarrollo del cultivo de soja para las tres localidades y las dos campañas evaluadas. S: siembra, R1: inicio de floración, R5: inicio de llenado de grano, R7: madurez fisiológica.

En cuanto a las variables de cultivo, el rendimiento logrado del cultivo de soja osciló entre 4209 kg.ha⁻¹ y 2738 kg.ha⁻¹ (cuadro 6). Estos valores se presentaron en la localidad de Junín, correspondientes a las campañas 09/10 y 10/11, respectivamente. A su vez, el mayor y el menor rendimiento logrado se relacionaron con uno de los mayores y con el menor registro de precipitaciones durante el cultivo, respectivamente (cuadros 5 y 6). El componente de rendimiento que más variación manifestó fue el número de granos por m⁻² (figura 9), además de ser el que mejor explicó el rendimiento ($R^2=0,91$). De la misma manera, la mejor relación ($R^2=0,67$) entre este componente y las lluvias se logró al considerar las precipitaciones acumuladas del subperíodo S-R7. En el cuadro 6, se muestran además los valores simulados de NG, P1000 y RS para cada localidad y

campaña. Dichos valores se obtuvieron de los archivos overview.out y fueron generados por el uso de los valores por default del coeficiente de drenaje (SLDR), escurrimiento superficial (SLRO) y factor de crecimiento de las raíces (SRGF).

Localidad	Campaña	Valores Observados			Valores Simulados			Rendimiento	
		NG (m ⁻²)	P1000 (g)	RS (kg/ha)	NG (m ⁻²)	P1000 (g)	RS (kg/ha)	RSME (kg/ha)	CV (%)
CONESA	2009-2010	3266	128	4184	3315	132	4376	192	4,6
	2010-2011	2703	139	3751	3178	122	3861	110	2,9
PERGAMINO	2009-2010	2586	131	3393	3007	128	3858	465	13,7
	2010-2011	2812	144	4052	2481	159	3943	109	2,7
JUNIN	2009-2010	3281	129	4209	2774	159	4417	208	4,9
	2010-2011	2074	132	2738	2250	143	3217	479	17,5

Cuadro 6. Valores observados y simulados de número de granos (NG), peso seco de 1000 granos (P1000) y rendimiento seco en grano (RS). Raíz del cuadrado medio del error (RSME) y coeficiente de variación (CV) sobre el rendimiento.

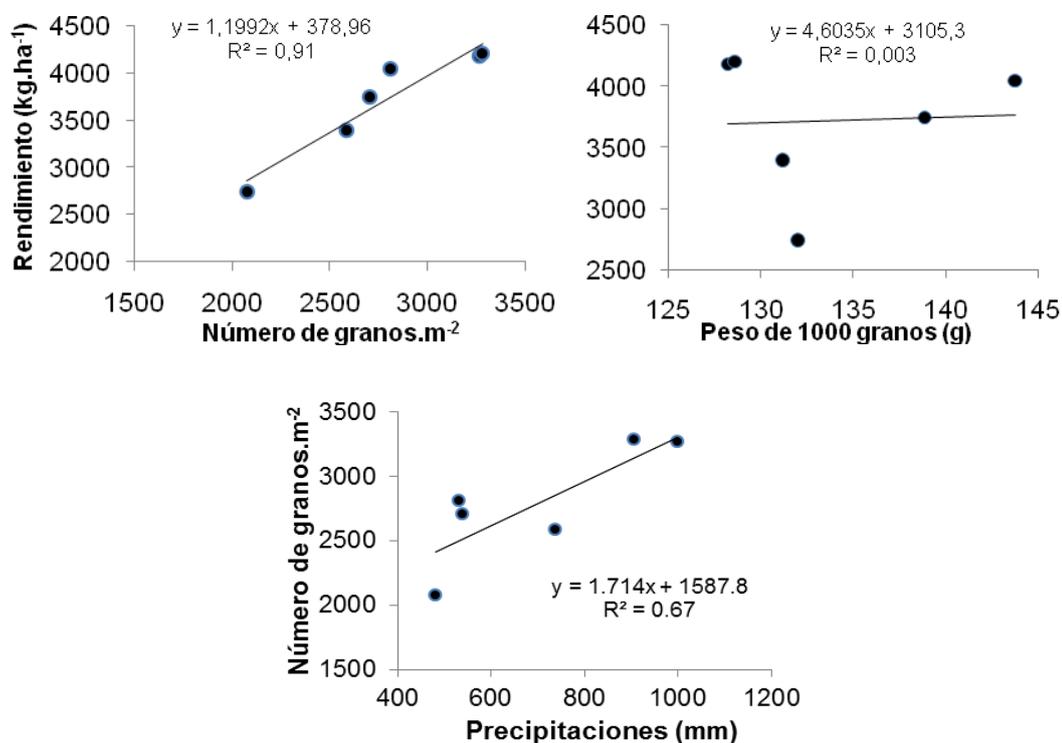


Figura 9. Relación entre el número de granos y el peso de granos con el rendimiento de soja observado. Número de granos en función de las precipitaciones acumuladas entre siembra y madurez fisiológica. Localidades de Junín, Pergamino y Conesa. Campaños 2009-2010 y 2010-2011.

1.2 Evolución de la humedad volumétrica del suelo

Los perfiles de humedad volumétrica del suelo reflejan las variaciones de agua retenida en función de la textura de cada horizonte, de los aportes por parte de las precipitaciones y del consumo del cultivo que hubo en cada etapa relevada. En las figuras 10, 11 y 12 se presentan para las tres localidades los valores medios de HV a profundidad con su respectivo error estándar (EE), obtenidos durante las campañas agrícolas 2009-2010 y 2010-2011 y para los momentos de siembra, inicios de floración (R1), inicio de llenado de granos (R5) y madurez fisiológica (R7).

En el ANEXO II se muestran los valores medios, máximos, mínimos, el desvío estándar, el error estándar y el coeficiente de variación de la HV para todos los experimentos.

Analizando los perfiles hídricos, resultantes de procesos de desecamiento y humedecimiento, se puede observar que para los tres suelos y en las dos campañas se lograron cambios en la HV hasta los 2 m de profundidad. También se observan niveles de desecamiento diferenciales entre los suelos y campañas. De la misma manera, se visualiza distinta dispersión de los datos (EE) en los horizontes.

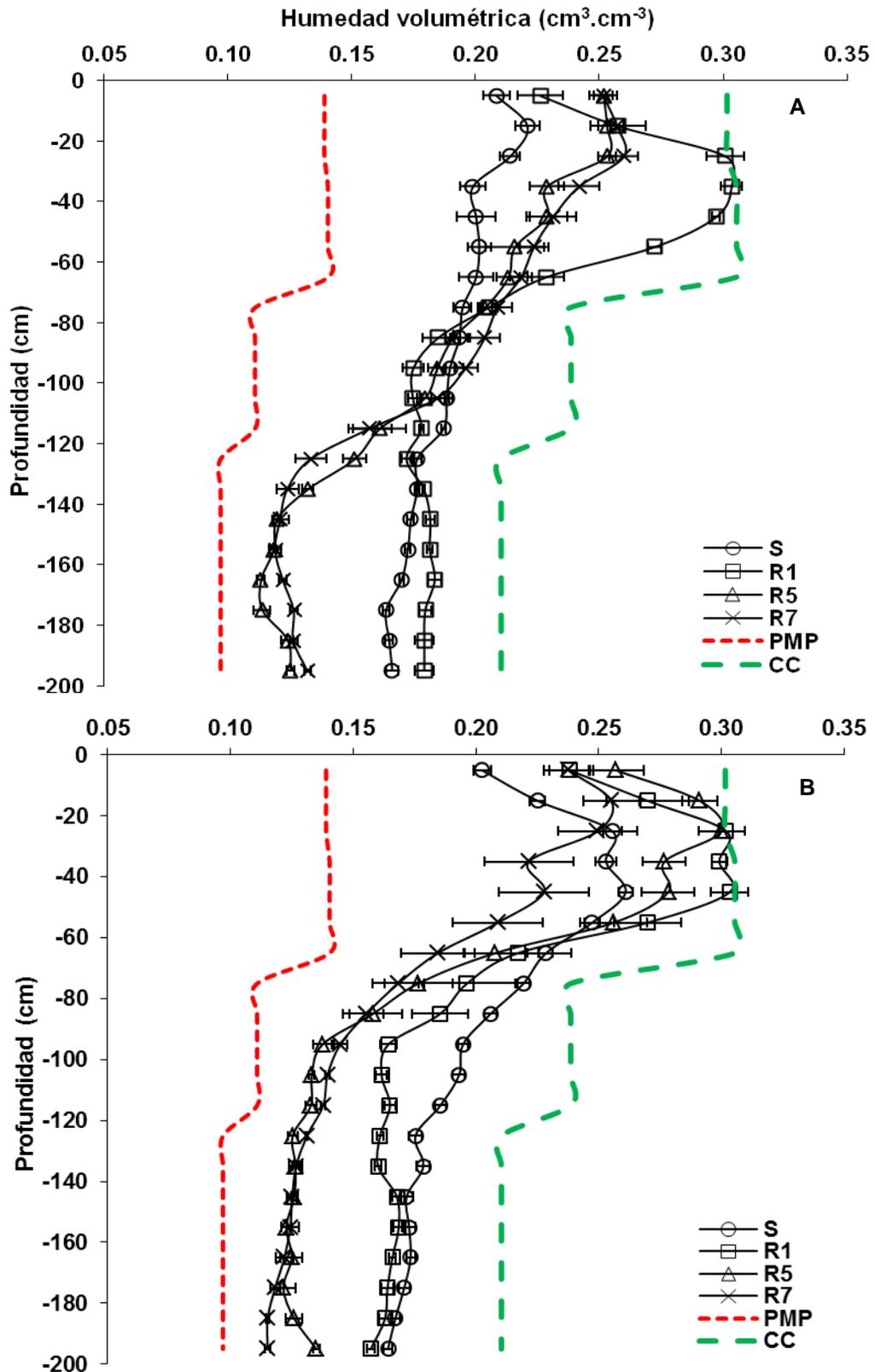


Figura 10. Humedad volumétrica en suelo para Junín durante los períodos 2009-2010 (A) y 2010-2011 (B). Siembra (S), inicio de floración (R1), inicio de llenado de granos (R5) y madurez fisiológica (R7). Las barras indican el error estándar de la media.

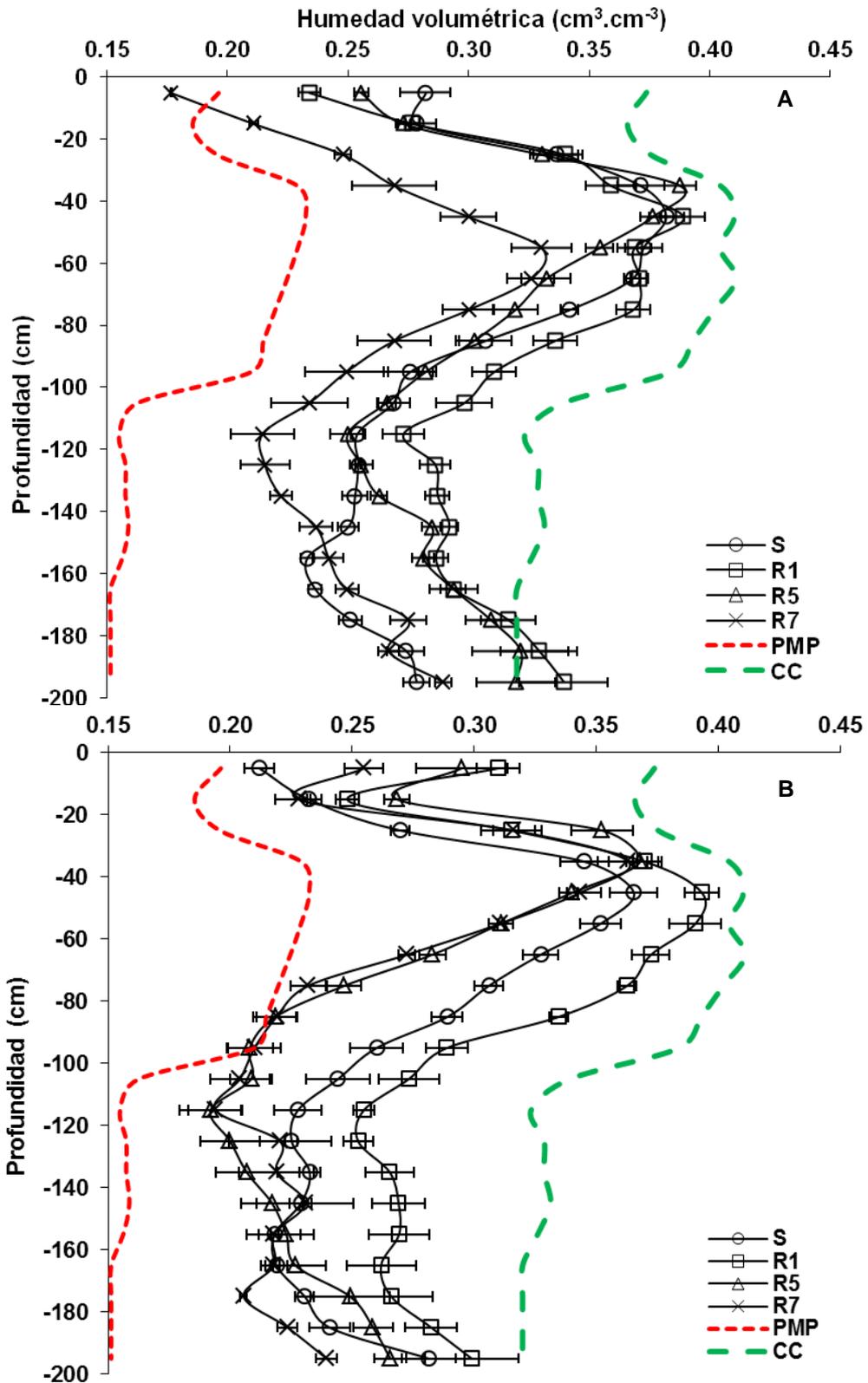


Figura 11. Humedad volumétrica en suelo para Pergamino durante los períodos 2009-2010 (A) y 2010-2011 (B). Siembra (S), inicio de floración (R1), inicio de llenado de granos (R5) y madurez fisiológica (R7). Las barras indican el error estándar de la media.

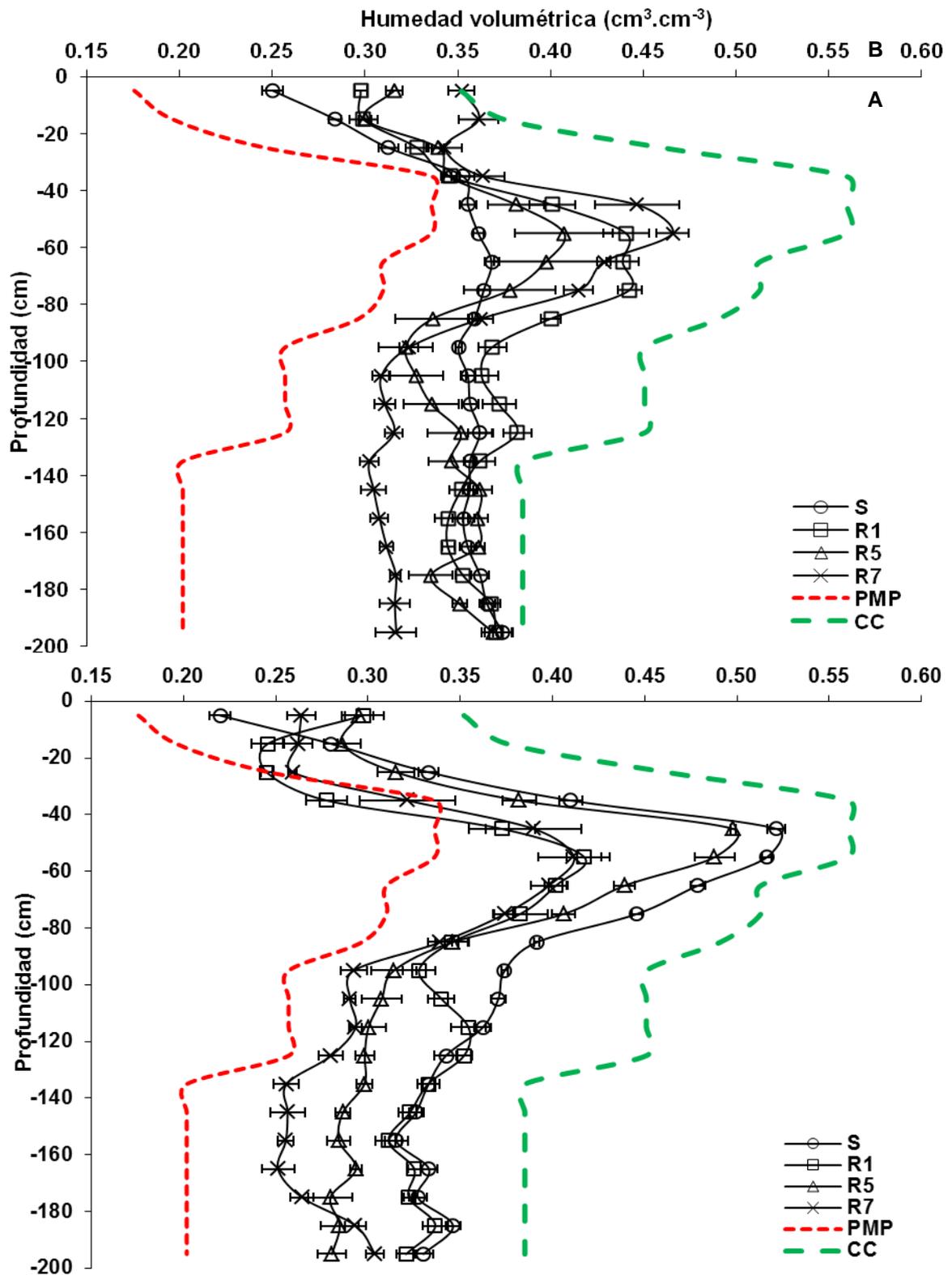


Figura 12. Humedad volumétrica en suelo para Conesa durante los períodos 2009-2010 (A) y 2010-2011 (B). Siembra (S), inicio de floración (R1), inicio de llenado de granos (R5) y madurez fisiológica (R7). Las barras indican el error estándar de la media.

2. Relación entre los parámetros evaluados de suelo y la capacidad de agua útil

Del análisis de componentes principales (ACP) se determinó por medio de la matriz de correlación (ya que los datos deben ser estandarizados por tener distintas unidades de medida) que todas las variables aportaron a la generación de los componentes sin necesidad de eliminación de alguna de ellas. A través del ACP se logró reducir la dimensión de los datos a los fines de facilitar su interpretación manteniendo la mayor información. Las nuevas variables denominadas componentes principales (CP) consistieron en la combinación lineal de las variables observadas, conservando la mayor variabilidad posible.

El análisis de las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2, respectivamente) que relacionó las variables de suelo relevadas con los horizontes, explicó el 83% de la variación total (figura 13). Los autovectores, la correlación con las variables originales (cuadro 7) y la interpretación gráfica sugieren una correlación positiva entre CC, PMP y arcilla, mientras que estas tres variables mantienen una correlación negativa con el contenido de arena. La MO y el limo generan variabilidad en las observaciones, pero no tan importantes ya que aportan en mayor medida a la segunda componente principal (siendo esta la que menos aporta a la variación total).

Variables	Autovectores		Correlaciones con las variables originales	
	e1	e2	CP 1	CP 2
PMP	0,50	-0,22	0,96	-0,26
CC	0,51	-0,17	0,97	-0,19
MO	0,07	0,43	0,13	0,49
Arcilla	0,47	-0,28	0,90	-0,33
Limo	0,19	0,74	0,37	0,85
Arena	-0,48	-0,34	-0,91	-0,39

Cuadro 7. Análisis de componentes principales. Valores de autovectores y correlaciones con variables originales.

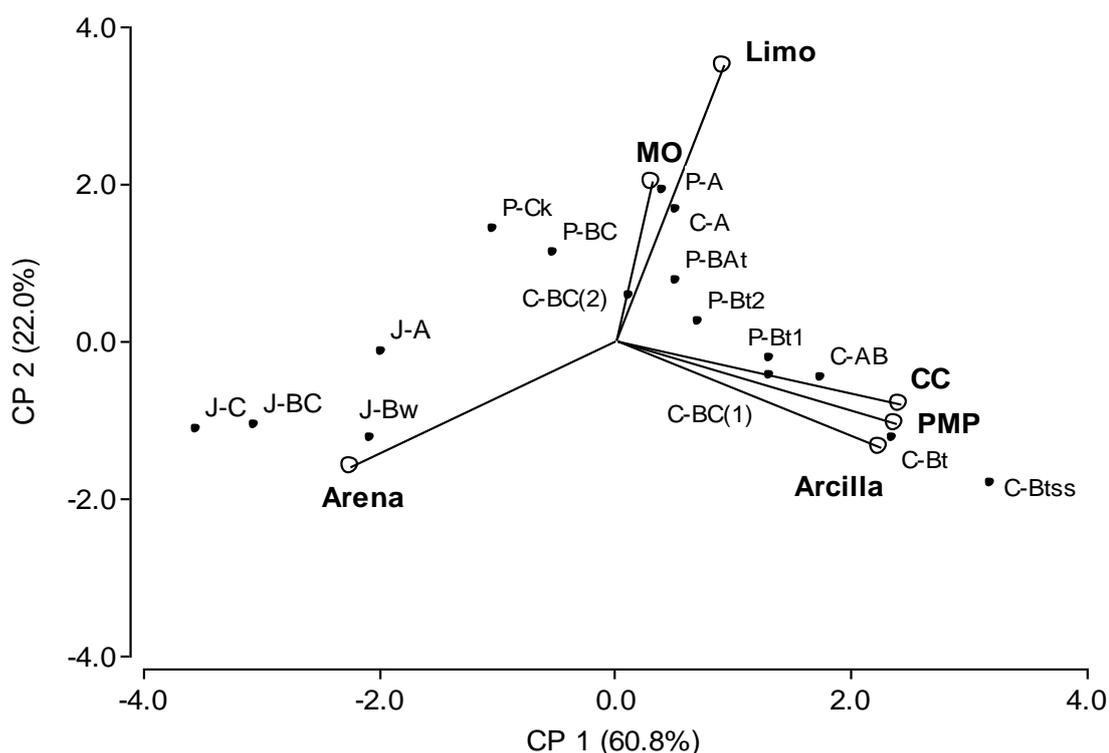


Figura 13. Biplot del análisis de componentes principales de variables de suelo (círculos vacíos) en horizontes (círculos llenos) de los tres suelos estudiados. Los horizontes se encuentran precedidos por una primer letra que indica localidad: J (Junín), P (Pergamino) y C (Conesa).

En el cuadro 7, los autovectores presenta la contribución relativa de cada variable en las dos componentes principales. Para la CP1 los autovectores de todas las variables estudiadas, excepto la variable arena, tienen valores positivos destacándose lo elevado de PMP, CC y arcilla, por lo tanto significa que han tenido mucho peso en definir la CP1. A esta nueva variable le corresponderán valores positivos cuando las variables PMP, CC y arcilla presenten valores elevados. En el caso de la CP2, solo limo y MO presentaron valores de autovectores elevados y de signo positivo, mientras que el resto presentó autovectores con signo negativo. Por lo tanto, se interpreta que esta segunda nueva variable (CP2) tomará valores positivos cuando los valores de las variables limo y MO presenten valores altos.

Se observó una elevada correlación positiva de tres de las seis variables originales con la CP1, siendo PMP, CC y arcilla. En el caso de la CP2, la correlación positiva fue con limo y MO, siendo negativa con PMP, CC, arcilla y arena.

Luego de los resultados observados en el ACP, donde surgen claras correlaciones entre las variables, se ajustaron modelos de regresión lineal para la estimación de la CC y el PMP a partir del resto de los parámetros obtenidos en la descripción del perfil. Para cada

regresión múltiple se graficaron los residuos parciales de CC y PMP respecto a cada variable predictora, entendiéndose la necesidad de la existencia de dicha variable en el modelo siempre que presente un patrón lineal en la distribución de los residuos.

Según el set de datos originados a partir de los tres suelos evaluados y para la profundidad de 0 cm a 200 cm, el mejor modelo de regresión obtenido para estimar CC ($R^2=0,9$) incluyó las variables explicativas arcilla, arena y MO, siendo la primera la de mayor peso en el modelo según el estadístico Cp de Mallows (cuadro 8) (InfoStat, Manual de usuario, 2008). El modelo de regresión se presenta en la ecuación (eq.) 1 y permitió predecir la variabilidad del valor de CC con una RMSE entre los valores observados y simulados de $0,007 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, un CV de 2% y una MD de $0,05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. De la misma manera, el mejor modelo de regresión obtenido para estimar PMP ($R^2=0,91$) incluyó las mismas variables (cuadro 8). Este modelo se presenta en la ecuación (eq.) 2 y permitió predecir la variabilidad del valor del PMP con una RMSE entre los valores observados y simulados de $0,005 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, un CV de 2,5% y una MD de $0,047 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

En la figura 14 se muestra la correspondencia gráfica entre las ecuaciones planteadas y parámetro relevados. Estas relaciones funcionales permiten obtener para suelos similares a los del presente estudio, una primera aproximación de las constantes hídricas a partir de la descripción de la composición textural y el contenido de materia orgánica.

	Coeficiente estimado		valor-p		Cp de Mallows	
	eq.1	eq.2	eq.1	eq.2	eq.1	eq.2
Constante	0,31	0,14	<0,0001	0,0001		
MO	-0,01	-0,01	0,1462	0,055	5,31	7,25
Arcilla	0,0044	0,0035	0,0001	<0,0001	32,07	39,84
Arena	-0,0016	-0,00093	0,016	0,0357	10,31	8,24

Cuadro 8. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación 1 y 2 para predecir Capacidad de Campo (CC) y Punto de marchitez permanente (PMP) hasta los 2 m de profundidad para los suelos estudiados en el norte de la provincia de Buenos Aires.

$$CC_{\text{calculada}} (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) = 0,3 - 0,01 \text{ MO} + 0,0044 \text{ Arcilla} - 0,0016 \text{ Arena} \quad (\text{eq.1})$$

$$\text{PMP}_{\text{calculada}} (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) = 0,14 - 0,01 \text{ MO} + 0,0035 \text{ Arcilla} - 0,00093 \text{ Arena} \quad (\text{eq.2})$$

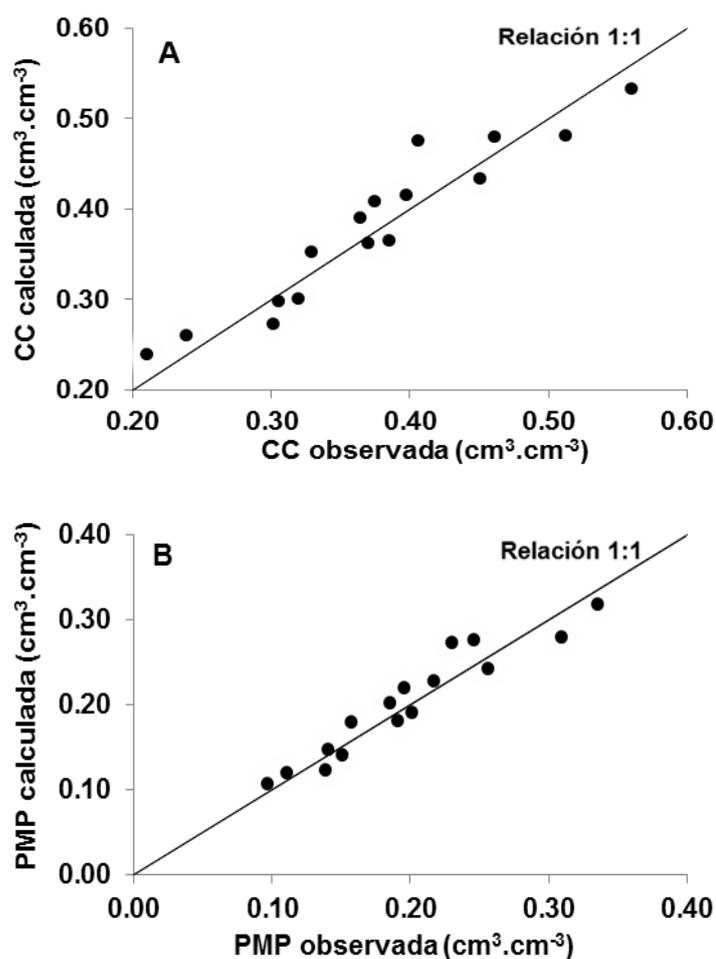


Figura 14. A) Relación entre la Capacidad de Campo (CC) calculada mediante la ecuación 1 y la CC observada ($R^2=0,90$). B) Relación entre el Punto de marchitez permanente (PMP) calculado (ecuación 2) y el PMP observado ($R^2=0,91$). Datos originados de los perfiles descriptos en Junín, Pergamino y Conesa.

3. Adecuación del modelo DSSAT 4.5

3.1. Predicción de la CAU

En la figura 15 se muestra la relación entre los datos observados y simulados de las constantes hídricas y de la densidad aparente, para los tres perfiles descriptos. El modelo DSSAT 4.5 utiliza las relaciones planteadas por Rawls *et al.* (1982) a partir de la textura y el contenido de materia orgánica, para estimar el valor de la CC y el PMP. En el mismo sentido, se obtuvo la densidad aparente según Rawls y Brakensiek (1985). En el cuadro 9 se presenta los estadísticos asociados a la comparación.

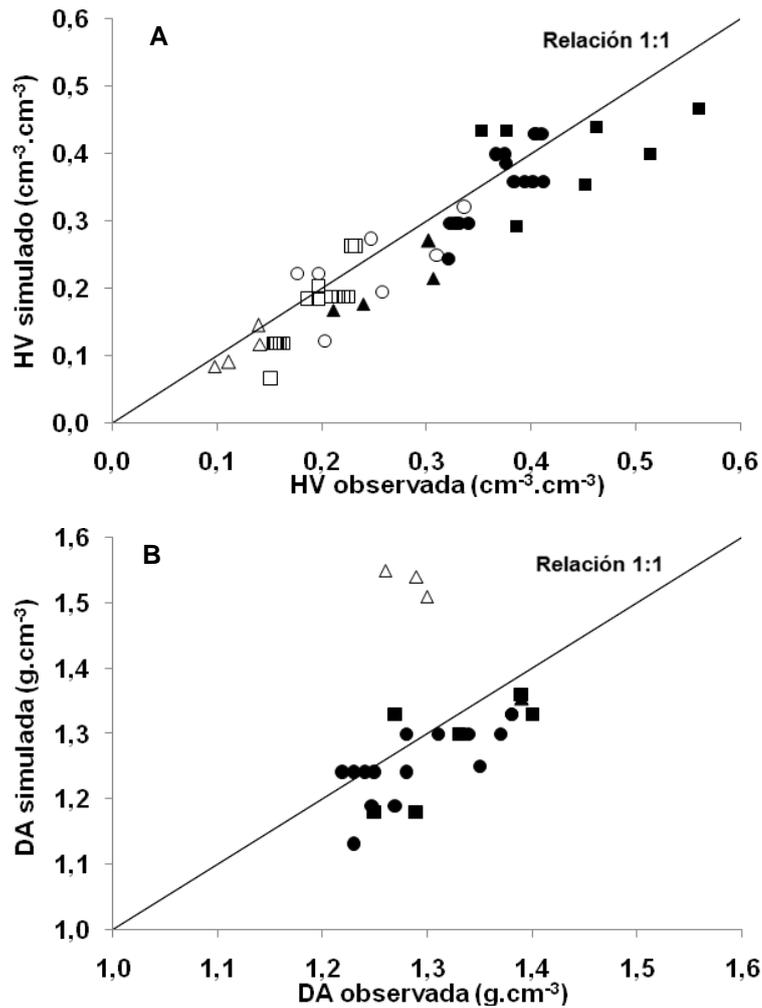


Figura 15. Valores de Humedad volumétrica (HV) para Junín (triángulos), Pergamino (círculos) y Conesa (cuadrados), observados y simulados por el modelo. A) Capacidad de campo (símbolos llenos) y Punto de Marchitez Permanente (símbolos vacíos) y B) Densidad Aparente (DA).

Considerando las constantes hídricas, los menores errores medios entre observados y simulados para el conjunto de los perfiles descriptos, se lograron para PMP (RMSE=0,008). Si bien CC y PMP fueron subestimadas por el modelo de referencia, se encontró mayor diferencia para CC (MD=-0,029). Analizando cada una de las localidades, se observó el menor error medio para CC en Pergamino y para PMP, en Pergamino y Junín. De la misma manera, todas las MD individuales tendieron a subestimar ambas constantes, destacándose los valores extremos de CC para Junín y Conesa.

Con respecto a la DA, los menores errores medios se lograron en Pergamino, seguido de Conesa y por último Junín. En esta última localidad se encontró una clara sobreestimación en los horizontes subsuperficiales (fig. 15B, triángulos vacíos).

	CC (cm ³ .cm ⁻³)			PMP (cm ³ .cm ⁻³)			DA (g.cm ⁻³)		
	Junín	Pergamino	Conesa	Junín	Pergamino	Conesa	Junín	Pergamino	Conesa
RMSE	0,031	0,009	0,032	0,010	0,009	0,019	0,110	0,014	0,024
CV	11,6	2,5	7,2	7,2	4,9	7,7	8,4	1,1	1,9
MD	-0,057	-0,017	-0,040	-0,013	-0,020	-0,017	0,180	-0,040	-0,030
R ²		0,65			0,72			0,55(*)	

Cuadro 9. Raíz del cuadrado medio del error (RMSE), coeficiente de variación (CV), desviación media (MD) y coeficiente de determinación (R²) para los valores medios simulados y observados de Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y Densidad Aparente (DA).(*) No se incluyen los valores extremos (triángulos vacíos, fig. 15B).

La CAU a los 2 m de profundidad resultó subestimada por el modelo para Junín y Conesa, siendo los valores obtenidos 186,5 mm y 330,9 mm, respectivamente. En cambio, para Pergamino la CAU simulada fue de 358,5 mm siendo similar al valor observado. Las MD resultantes fueron -82,9 mm, 9,9 mm y -59,8 mm para Junín, Pergamino y Conesa, respectivamente. En la figura 16 se presenta la comparación en milímetros entre los valores observados y simulados; se divide el perfil en cuatro estratos de 50 cm para su comparación.

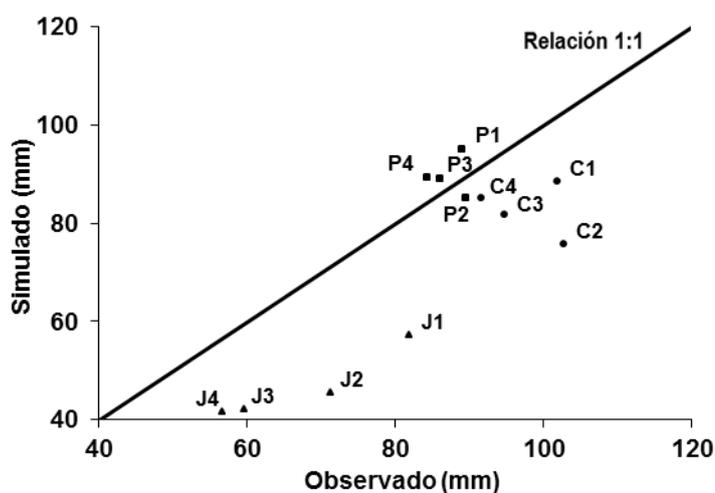


Figura 16. Capacidad de agua útil en mm para Junín (triángulos), Pergamino (cuadrados) y Conesa (círculos) observada y simulada. Los números 1, 2, 3 y 4 indican los estratos 0-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm y 150-200 cm de profundidad, respectivamente.

3.2. Predicción de la humedad de suelo

Las simulaciones resultantes para cada localidad y campaña permitieron lograr distintos ajustes en los valores de humedad del suelo. Los valores simulados se obtuvieron del archivo soilwat.out originado en cada simulación temporal. En las figuras 17, 18 y 19 se representa la evolución comparada entre el agua útil simulada y observada. Estos resultados se lograron sin modificar los factores correspondientes al crecimiento de raíces (SRGF), factor drenaje (SLDR) y factor escurrimiento superficial (SLRO). El DSSAT V4.5 ajusta por "default" dichos factores según la descripción del sitio. Utiliza una función exponencial para estimar a profundidad el SRGF de cada horizonte según Ritchie *et al.* (1989). Si el centro del horizonte para el cual se quiere calcular el factor tiene una profundidad menor a 20 cm, el $SRGF=1$. En cambio, si las profundidades son mayores a 20 cm, el $SRGF=\exp(-0,02 \times z)$ donde z es la profundidad media del horizonte. Para el ajuste de este factor, es necesaria la medición a campo de la densidad longitudinal de raíces (RLD) por horizontes, expresada en $cm.cm^{-3}$ (Wang, 2003). Debido a la falta de consenso en la parametrización de este factor (Ma, 2009) y a la escasez de valores de RLD, se utilizaron tres funciones exponenciales (una por default y dos elegidas) para el cálculo del SRGF a profundidad (figura 20) en busca de exploraciones radicales ascendentes, con la finalidad de simular las restricciones diferenciales al crecimiento radical brindada por los tres suelos evaluados.

En el mismo sentido, el programa asigna un valor al SLDR según el drenaje considerado del sitio en base a ocho categorías (muy pobremente a muy excesivamente drenado). En este caso se tuvo en cuenta la descripción del drenaje de la unidad cartográfica según las Carta de Suelo INTA, hojas 3560-8-3, 3360-32-4 y 3360-27-3. También el programa valoriza el SLRO de acuerdo a la pendiente y grupo hidrológico de suelo (USDA Soil Conservation Service, 1968) coincidiendo su valor con el de curva número asignada.

Luego de observar los resultados de la simulación se decidió realizar un análisis de sensibilidad a los fines de comprender el efecto de cambios en los factores SRGF, SLDR y SLRO sobre la HV del suelo durante el ciclo del cultivo de soja (*G.max*). Dichos cambios se realizaron sobre el archivo .sol del programa de referencia donde además se encuentran el resto de los parámetros de suelo. Se obtuvieron los estadísticos RSME, MD y CV por localidad y campaña para la combinación de valores medios, superiores e inferiores de cada parámetro. Estos resultados se presentan en los cuadros 10, 11 y 12. Para observar el aporte de la variación de un parámetro, se utilizó el promedio de todas las RMSE logradas ante las posibles variaciones de los otros dos parámetros.

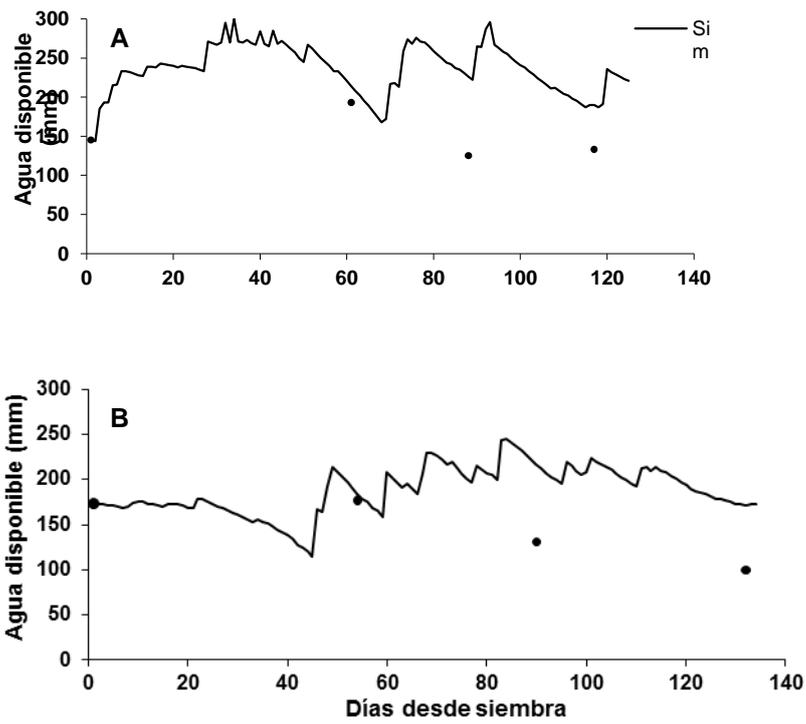


Figura 17. Contenido de agua útil observada y simulada para la localidad de Junín. A) Campaña 2009-2010. B) Campaña 2010-2011.

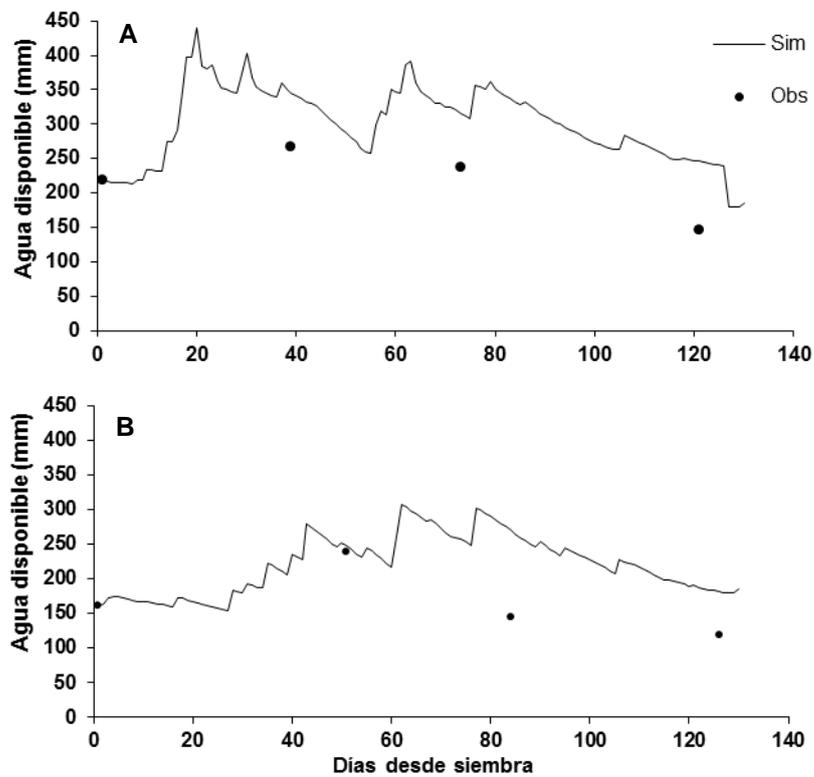


Figura 18. Contenido de agua útil observada y simulada para la localidad de Pergamino. A) Campaña 2009-2010. B) Campaña 2010-2011.

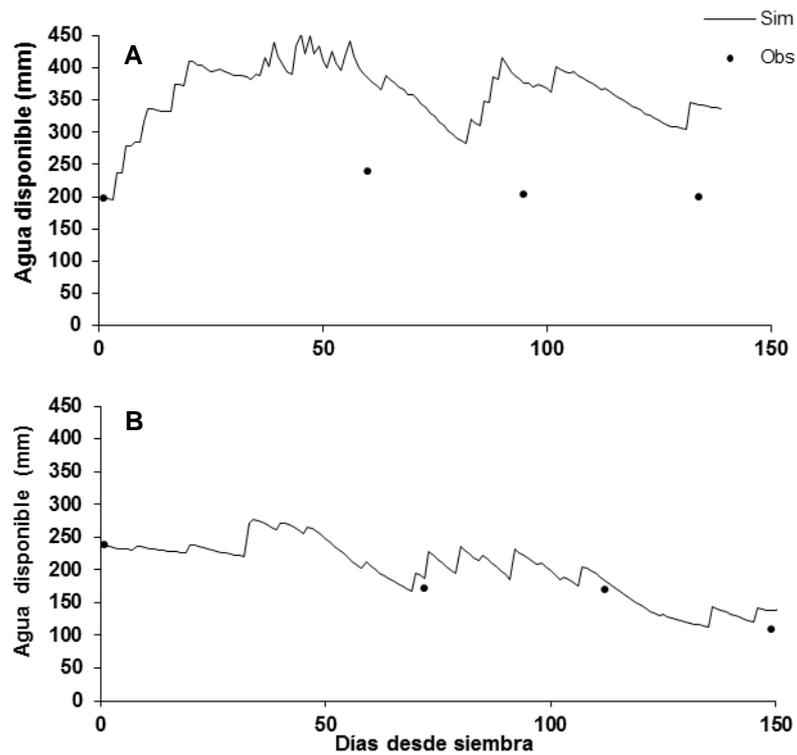


Figura 19. Contenido de agua útil observada y simulada para la localidad de Conesa. A) Campaña 2009-2010. B) Campaña 2010-2011.

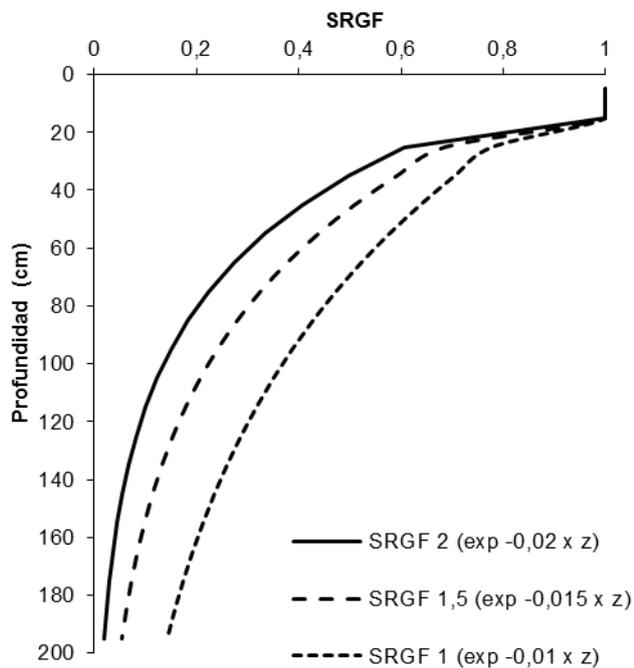


Figura 20. Factor crecimiento radical (SRGF) utilizados para el análisis de sensibilidad. SRGF 2 función por "default". SRGF 1,5 y SRGF 1 generan crecimientos radicales ascendentes.

		JUNIN 2009-2010			JUNIN 2010-2011			
	SLDR	SLRO	SRGF 1	SRGF 1,5	SRGF 2	SRGF 1	SRGF 1,5	SRGF 2
<i>RMSE</i>			0,048	0,051	0,054	0,026	0,028	0,030
<i>CV</i>		63	29,9	31,2	32,4	15,6	16,5	17,6
<i>MD</i>			0,039	0,039	0,039	0,015	0,015	0,016
<i>RMSE</i>			0,049	0,051	0,054	0,026	0,028	0,030
<i>CV</i>	0,5	73	30,0	31,2	32,5	15,6	16,5	17,5
<i>MD</i>			0,039	0,039	0,039	0,015	0,015	0,016
<i>RMSE</i>			0,048	0,051	0,054	0,023	0,024	0,026
<i>CV</i>		83	29,9	31,2	32,4	13,2	13,7	14,4
<i>MD</i>			0,039	0,039	0,038	0,006	0,006	0,007
<i>RMSE</i>			0,048	0,051	0,054	0,028	0,030	0,033
<i>CV</i>		63	29,7	31,1	32,5	16,5	17,9	19,2
<i>MD</i>			0,035	0,035	0,035	0,015	0,015	0,016
<i>RMSE</i>			0,048	0,051	0,054	0,028	0,030	0,033
<i>CV</i>	0,7	73	29,7	31,1	32,4	16,5	17,9	19,2
<i>MD</i>			0,035	0,035	0,035	0,015	0,015	0,016
<i>RMSE</i>			0,048	0,051	0,054	0,024	0,025	0,027
<i>CV</i>		83	29,6	31,0	32,3	13,5	14,3	15,0
<i>MD</i>			0,035	0,035	0,035	0,006	0,006	0,007
<i>RMSE</i>			0,048	0,051	0,054	0,030	0,033	0,036
<i>CV</i>		63	29,7	31,0	32,4	17,8	19,2	20,8
<i>MD</i>			0,033	0,033	0,033	0,015	0,015	0,016
<i>RMSE</i>			0,048	0,051	0,054	0,030	0,033	0,036
<i>CV</i>	0,9	73	29,7	31,0	32,4	17,7	19,1	20,8
<i>MD</i>			0,033	0,033	0,033	0,015	0,015	0,016
<i>RMSE</i>			0,048	0,051	0,054	0,025	0,026	0,029
<i>CV</i>		83	29,6	31,0	32,3	14,0	14,8	15,8
<i>MD</i>			0,033	0,033	0,033	0,006	0,006	0,007

Cuadro 10. Raíz del cuadrado medio del error (RMSE, en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), desviación media (MD, en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) y coeficiente de variación (CV, en %) entre valores medios observados y simulados de humedad volumétrica de suelo a 2 m de profundidad para Junín en dos campañas agrícolas. SLDR (factor drenaje), SLRO (factor curva número) y SRGF (factor crecimiento radical). En negrita, valores por "default".

		PERGAMINO 2009-2010			PERGAMINO 2010-2011			
	SLDR	SLRO	SRGF 1	SRGF 1,5	SRGF 2	SRGF 1	SRGF 1,5	SRGF 2
<i>RMSE</i>			0,049	0,049	0,049	0,066	0,067	0,072
<i>CV</i>		71	17,5	17,4	17,5	25,9	26,4	28,6
<i>MD</i>			0,044	0,044	0,044	0,045	0,045	0,046
<i>RMSE</i>			0,049	0,049	0,049	0,054	0,055	0,057
<i>CV</i>	0,4	81	17,5	17,4	17,5	20,2	21,0	22,4
<i>MD</i>			0,044	0,044	0,044	0,030	0,031	0,031
<i>RMSE</i>			0,041	0,042	0,042	0,036	0,035	0,035
<i>CV</i>		91	14,8	14,9	15,1	13,0	12,8	11,9
<i>MD</i>			0,035	0,035	0,035	0,030	0,028	-0,011
<i>RMSE</i>			0,046	0,046	0,047	0,066	0,067	0,073
<i>CV</i>		71	16,6	16,6	16,7	26,1	26,3	29,2
<i>MD</i>			0,041	0,041	0,041	0,045	0,045	0,046
<i>RMSE</i>			0,046	0,046	0,047	0,054	0,054	0,055
<i>CV</i>	0,6	81	16,5	16,6	16,6	21,0	21,0	21,7
<i>MD</i>			0,041	0,041	0,041	0,031	0,031	0,032
<i>RMSE</i>			0,040	0,040	0,041	0,034	0,033	0,031
<i>CV</i>		91	14,4	14,4	14,5	12,3	12,1	11,9
<i>MD</i>			0,034	0,034	0,033	0,031	0,030	-0,011
<i>RMSE</i>			0,045	0,045	0,046	0,066	0,066	0,074
<i>CV</i>		71	16,2	16,2	16,3	26,1	26,3	29,7
<i>MD</i>			0,039	0,039	0,039	0,046	0,046	0,047
<i>RMSE</i>			0,045	0,045	0,045	0,055	0,055	0,061
<i>CV</i>	0,8	81	16,1	16,1	16,2	22,1	21,3	24,1
<i>MD</i>			0,039	0,039	0,039	0,031	0,031	0,032
<i>RMSE</i>			0,040	0,040	0,040	0,031	0,031	0,031
<i>CV</i>		91	14,2	14,2	18,4	11,309	11,5	11,0
<i>MD</i>			0,033	0,033	0,032	-0,013	-0,012	-0,011

Cuadro 11. Raíz del cuadrado medio del error (RMSE, en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), desviación media (MD, en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) y coeficiente de variación (CV, en %) entre valores medios observados y simulados de humedad volumétrica de suelo a 2 m de profundidad para Pergamino en dos campañas agrícolas. SLDR (factor drenaje), SLRO (factor curva número) y SRGF (factor crecimiento radical). En negrita, valores por "default".

		CONESA 2009-2010			CONESA 2010-2011			
	SLDR	SLRO	SRGF 1	SRGF 1,5	SRGF 2	SRGF 1	SRGF 1,5	SRGF 2
<i>RMSE</i>			0,086	0,086	0,086	0,029	0,029	0,029
<i>CV</i>		71	23,7	23,8	23,8	9,2	9,2	9,4
<i>MD</i>			0,081	0,081	0,081	0,007	0,010	0,012
<i>RMSE</i>			0,085	0,085	0,085	0,029	0,029	0,030
<i>CV</i>	0,2	81	23,7	23,7	23,7	9,2	9,1	9,5
<i>MD</i>			0,081	0,081	0,081	0,006	0,009	0,012
<i>RMSE</i>			0,074	0,075	0,075	0,032	0,031	0,031
<i>CV</i>		91	20,8	20,9	21,0	9,7	9,6	9,5
<i>MD</i>			0,063	0,063	0,063	-0,011	-0,008	-0,005
<i>RMSE</i>			0,080	0,080	0,080	0,027	0,027	0,029
<i>CV</i>		71	22,0	22,0	22,1	8,5	8,6	9,2
<i>MD</i>			0,075	0,075	0,075	0,007	0,009	0,013
<i>RMSE</i>			0,080	0,080	0,080	0,027	0,027	0,030
<i>CV</i>	0,4	81	22,0	22,0	22,1	8,5	8,6	9,5
<i>MD</i>			0,075	0,075	0,075	0,006	0,009	0,013
<i>RMSE</i>			0,068	0,069	0,069	0,031	0,031	0,031
<i>CV</i>		91	19,0	19,2	19,3	9,4	9,3	9,4
<i>MD</i>			0,055	0,056	0,056	-0,011	-0,008	-0,005
<i>RMSE</i>			0,077	0,077	0,078	0,025	0,026	0,027
<i>CV</i>		71	21,3	21,4	21,4	8,1	8,4	8,7
<i>MD</i>			0,073	0,073	0,073	0,007	0,010	0,012
<i>RMSE</i>			0,077	0,077	0,077	0,025	0,026	0,028
<i>CV</i>	0,6	81	21,2	21,3	21,4	8,1	8,4	9,0
<i>MD</i>			0,072	0,073	0,073	0,007	0,009	0,012
<i>RMSE</i>			0,065	0,065	0,066	0,030	0,030	0,030
<i>CV</i>		91	18,1	18,2	18,6	9,2	9,1	9,2
<i>MD</i>			0,052	0,052	0,053	-0,011	-0,009	-0,005

Cuadro 12. Raíz del cuadrado medio del error (RMSE, en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), desviación media (MD, en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) y coeficiente de variación (CV, en %) entre valores medios observados y simulados de humedad volumétrica de suelo a 2 m de profundidad para Conesa en dos campañas agrícolas. SLDR (factor drenaje), SLRO (factor curva número) y SRGF (factor crecimiento radical). En negrita, valores por "default".

Del análisis de sensibilidad se destaca la mejora, en mayor o menor medida, de los valores de ajuste con la variación de los tres parámetros evaluados. Para las condiciones del presente estudio, se encontró un comportamiento diferencial de los suelos evaluados y las campañas analizadas.

Se plantea a continuación el aporte de la variación de cada parámetro sobre la similitud de simulados y observados de la HV en suelo por localidad y ciclo agrícola. Además, se presentan las mejores combinaciones encontradas de parámetros y los estadísticos por estrato de suelo.

Hapludol típico, Serie Junín

La utilización del factor SRGF 1, el cual simula mayor exploración radical del suelo, generó los mejores ajustes independientemente del año evaluado. El pasar de SRGF 2 a SRGF 1 permitió una mejora de la RMSE promedio de $0,054\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ a $0,048\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para el ciclo 2009-2010 y de $0,031\text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ a $0,026\text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para el ciclo 2010-2011. Se entiende como RMSE promedio para el valor de un factor el considerar la suma de los nueve valores obtenidos ante la variación de las tres opciones evaluadas para los otros dos factores dividido el número de valores totales.

Campaña 2009-2010

No se encontró una mejora en el estadístico RMSE medio con la variación de los parámetros SLRO y SLDR. Para ambos, se logró un valor medio de $0,051\text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. A modo de ejemplo, se muestra en la figura 21 los valores observados y simulados para la combinación de SRGF 1, SLDR 0,7 y SLRO 73. En el cuadro 13 se presentan los estadísticos asociados para la anterior combinación. Considerando las posibles combinaciones de los valores escogidos para SRGF, SLDR y SLRO (cuadro 10), los rendimientos simulados presentaron un rango de variación de $4430\text{ kg}.\text{ha}^{-1}$ a $4404\text{ kg}.\text{ha}^{-1}$.

Campaña 2010-2011

Ante el aumento del factor SLRO se logró mejorar los ajustes. El SLRO 83 fue el de mejor comportamiento logrando un valor medio de la RMSE de $0,025\text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ en comparación con $0,030\text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ generado por SLRO 63. Por otro lado, al disminuir el SLDR se generó también los menores errores logrando una RSME media de $0,027\text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para SLDR 0,5 contra $0,031\text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para SLDR 0.9.

Para este experimento, la mejor combinación se obtuvo con SRGF 1, SLDR 0,5 y SLRO 83 ya que los estadísticos RMSE, CV y MD fueron de $0,023\text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, 13,2 % y $0,006\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente, mostrando una leve tendencia a la sobrestimación de la HV del suelo. En la figura 22 se muestra la evolución de los valores observados y simulados durante el ciclo del cultivo y por estratos. En el cuadro 13 se presentan los estadísticos asociados. En cuanto a los rendimientos simulados, los valores oscilaron entre $3232\text{ kg}.\text{ha}^{-1}$ a $3202\text{ kg}.\text{ha}^{-1}$.

Argiudol típico, Serie Pergamino

Campaña 2009-2010

No se lograron mejoras con la variación del SRGF, ya que el RMSE promedio presentó valores de $0,045\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, $0,045\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ y $0,044\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para SRGF 2, SRGF 1,5 y SRGF 1, respectivamente. En este experimento, el SRGF no generó cambios en la HV

simulada. El factor SLRO 91 sí permitió mejorar el ajuste logrando una RMSE promedio de $0,041 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ contra los valores de $0,045 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ de SLRO 71 y 81. En cuanto al SLDR, a medida que aumentó su valor permitió una leve mejora en la simulación logrando para SLDR 0,8 una RMSE media de $0,042 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. En la figura 23 se muestran los valores observados y simulados para la combinación SRGF 1,5, SLDR 0,8 y SLRO 91 por su menor CV y MD, sin dejar de considerar las escasas diferencias con SRGF 1,5, SLRO 91 y SLDR 0,6. En el cuadro 13 se presenta los estadísticos a profundidad. La variación de los rendimientos simulados para las posibles combinaciones de factores (cuadro 11), se encontró entre $3895 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ y $3840 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Campaña 2010-2011

Los factores SRGF 1 y 1,5 permitieron lograr el menor RMSE medio coincidiendo ambos en un valor de $0,051 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ en comparación con SRGF 2 de $0,054 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para el mismo estadístico.

El mayor aporte a la mejora fue dado por el aumento del SLRO lográndose para SLRO 71, SLRO 81 y SLRO 91 un RMSE promedio de $0,069$, $0,055$ y $0,033 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, respectivamente. Con respecto a SLDR, no se observó una tendencia a mejorar los ajustes con la variación de los valores escogidos. En presencia de SLDR 0,6, se obtuvo una RMSE promedio de $0,052 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Para este caso, la mejor combinación se logró con la utilización de SRGF 1,5, SLDR 0,6 y SLRO 91 observándose para los estadísticos RMSE, CV y MD $0,033 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, $12,1 \%$ y $0,03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, respectivamente, mostrando una tendencia a la sobrestimación de la HV del suelo (figura 24, cuadro 13). En cuanto a los rendimientos simulados, se observó un mayor rango de variación siendo este de $3971 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ a $3185 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Los menores rendimientos simulados pertenecieron a SLRO 91.

Argiudol vértico, Serie Ramallo. Conesa.

En términos generales se observó una baja variación de los valores de ajuste ante el cambio de los parámetros evaluados.

Campaña 2009-2010

La variación del SRGF se mostró insensible para lograr mejoras en el ajuste entre los valores simulados y observados. El SLRO sí generó mejoras al utilizarse SLRO 91, ya que se obtuvo para la RMSE promedio un valor de $0,070 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ al comparar con los $0,081 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ de los factores SLRO 71 y 81. En el mismo sentido, el incremento del SLDR también generó mejoras. Se obtuvo para esta variable una RMSE media de $0,082$, $0,076$ y $0,073 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, para SLDR 0,2, SLDR 0,4 y SLDR 0,6, respectivamente. En la figura 25 se muestra, a modo de ejemplo los valores simulados y observados para la combinación de los

parámetros de SRGF 1,5, SLDR 0,6 y SLRO 91. En el cuadro 13 se presentan los estadísticos de la anterior combinación. Por otro lado, los rendimientos simulados originados por las combinaciones de los factores (cuadro 12) presentaron valores entre 4484 kg.ha⁻¹ y 4258 kg.ha⁻¹.

Campaña 2010-2011

Los valores utilizados de SRGF 1 y 1,5 sugieren una muy baja tendencia a mejorar el ajuste con valores de RMSE promedio para ambos de 0,028 cm³.cm⁻³, en comparación con 0,029 cm³.cm⁻³ de SRGF 2. El uso de SLRO 91 no generó mejoras y elevó la RMSE media de 0,028 a 0,031 cm³.cm⁻³. Además, del amplio rango de rendimientos simulados (4175 kg.ha⁻¹ a 1932 kg.ha⁻¹) su utilización se relacionó con los menores rendimientos. Para el factor SLDR, su incremento generó leves mejoras en el grado de ajuste obteniéndose RMSE promedio de 0,030, 0,029 y 0,028 cm³.cm⁻³ para SLDR 0,2, SLDR 0,4 y SLDR 0,6, respectivamente. Para este experimento, se encuentra un grupo de combinación de variables que mejora levemente los ajustes, sugiriendo una exploración radical media y mayor, una curva número media y menor, y el mayor drenaje utilizado. Se presenta en la figura 26 la evolución de los valores simulados y observados para los parámetros SRGF 1,5, SLDR 0,6 y SLRO 81. Se muestra también en el cuadro 13 los estadísticos asociados.

JUNIN						
Estrato (cm)	2009-2010			2010-2011		
	RMSE	CV	MD	RMSE	CV	MD
0-30	0,023	8,8	-0,018	0,008	2,9	-0,007
30-60	0,034	13,7	0,002	0,013	4,8	0,001
60-90	0,021	10	0,016	0,05	25,2	-0,004
90-120	0,048	27,4	0,047	0,019	12,5	0,007
120-150	0,063	43,4	0,061	0,022	14,9	0,014
150-180	0,076	54,6	0,071	0,028	18,4	0,018
180-200	0,072	50,0	0,068	0,021	13,6	0,013
Promedio	0,048	29,7	0,035	0,023	13,2	0,006

PERGAMINO						
Estrato (cm)	2009-2010			2010-2011		
	RMSE	CV	MD	RMSE	CV	MD
0-30	0,046	17,5	0,043	0,042	15	0,052
30-60	0,016	4,5	0	0,056	15,9	-0,008
60-90	0,035	10,6	0,021	0,033	11,5	0,073
90-120	0,051	19,1	0,05	0,024	10,5	0,086
120-150	0,065	24,9	0,062	0,026	11,2	0,031
150-180	0,042	14,8	0,038	0,027	11,2	-0,017
180-200	0,025	8,1	0,015	0,024	9,3	-0,002
Promedio	0,04	14,2	0,033	0,033	12,1	0,03

CONESA						
Estrato (cm)	2009-2010			2010-2011		
	RMSE	CV	MD	RMSE	CV	MD
0-30	0,025	7,8	0,005	0,059	21,6	0,057
30-60	0,105	27,0	0,076	0,03	7,5	-0,015
60-90	0,053	13,2	0,03	0,025	6,5	-0,021
90-120	0,103	30,5	0,102	0,008	2,7	0,001
120-150	0,071	20,8	0,067	0,009	2,9	0,001
150-180	0,052	15,3	0,048	0,021	7,1	0,017
180-200	0,044	12,7	0,038	0,031	10,2	0,025
Promedio	0,065	18,2	0,052	0,026	8,4	0,009

Cuadro 13. Raíz del cuadrado medio del error (RMSE, en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), coeficiente de variación (CV, en %) y desviación media (MD, en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) entre valores observados y simulados de humedad volumétrica de suelo por estrato producto de la combinación escogida de SRGF (factor crecimiento de raíces) y SLRO (factor curva número) y SLDR (factor drenaje).

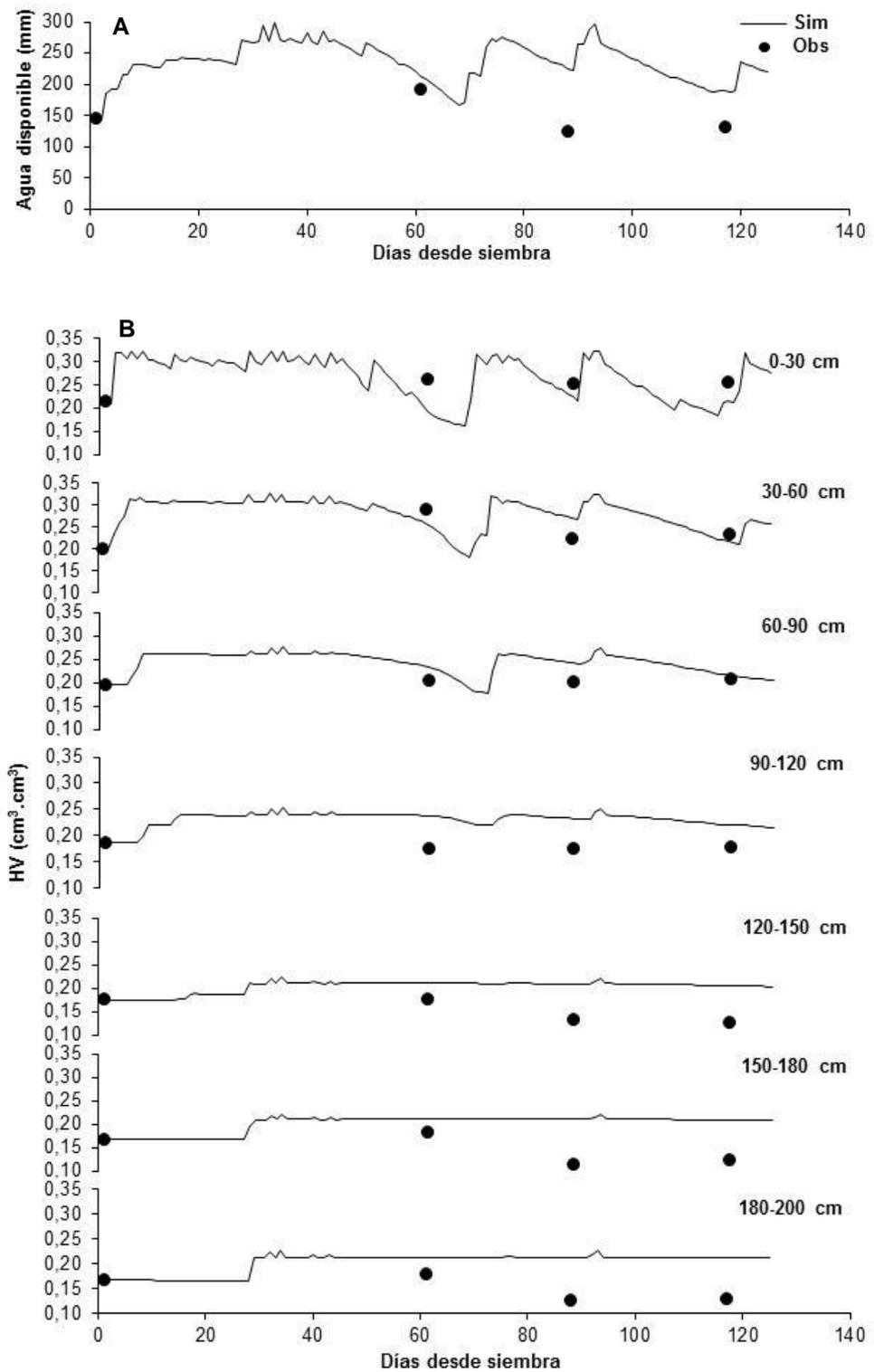


Figura 21. JUNIN, campaña 2009-2010. Comparación entre valores observados (puntos) y simulados (líneas continuas). SRGF 1, SLRO 73 y SLDR 0,7. A) Agua disponible en mm. B) Humedad volumétrica (HV) en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ por estratos de suelo.

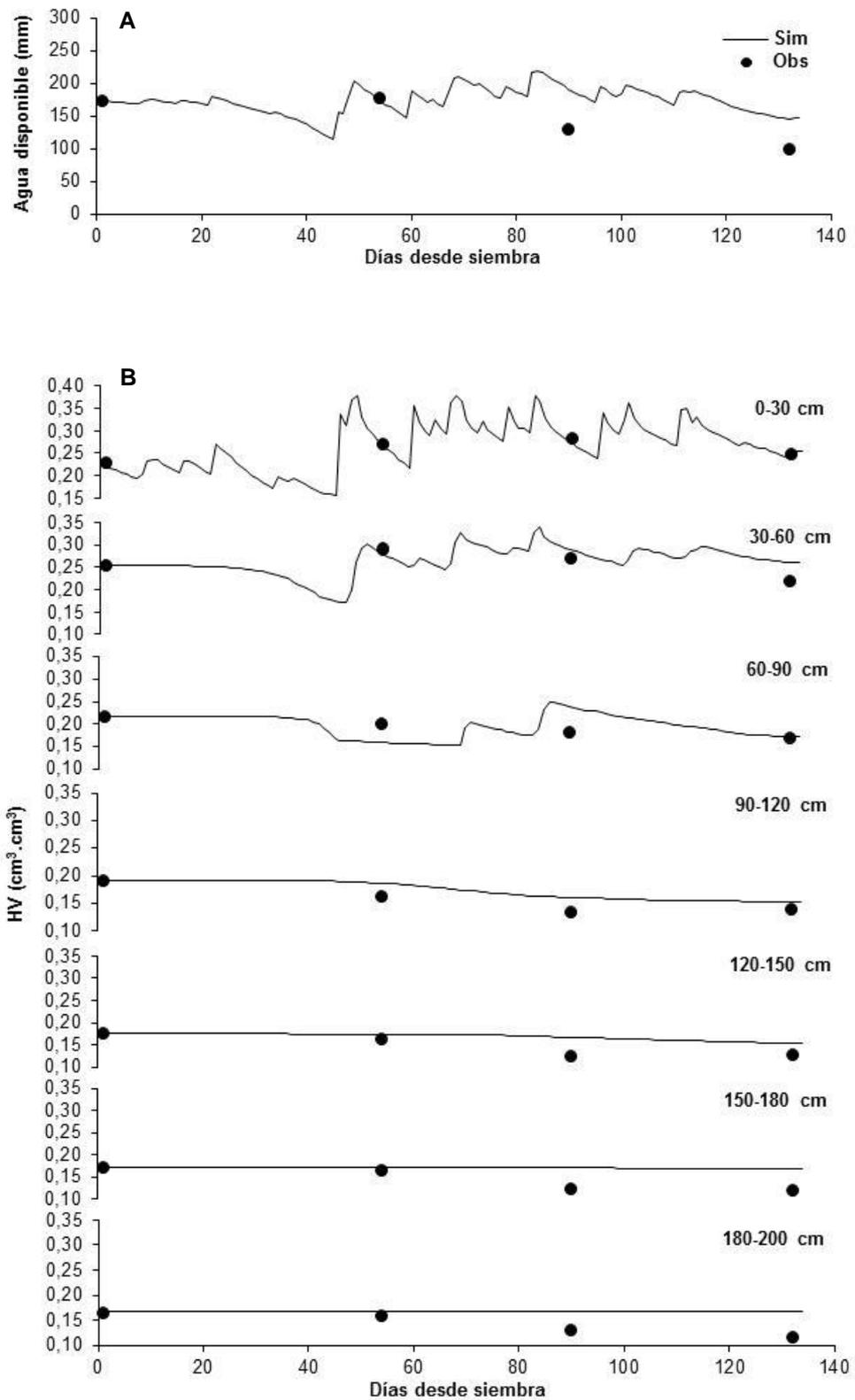


Figura 22. JUNIN, campaña 2010-2011. Comparación entre valores observados (puntos) y simulados (líneas continuas). SRGF 1, SLRO 83 y SLDR 0,5. A) Agua disponible en mm. B) Humedad volumétrica (HV) en cm³·cm⁻³ por estratos de suelo.

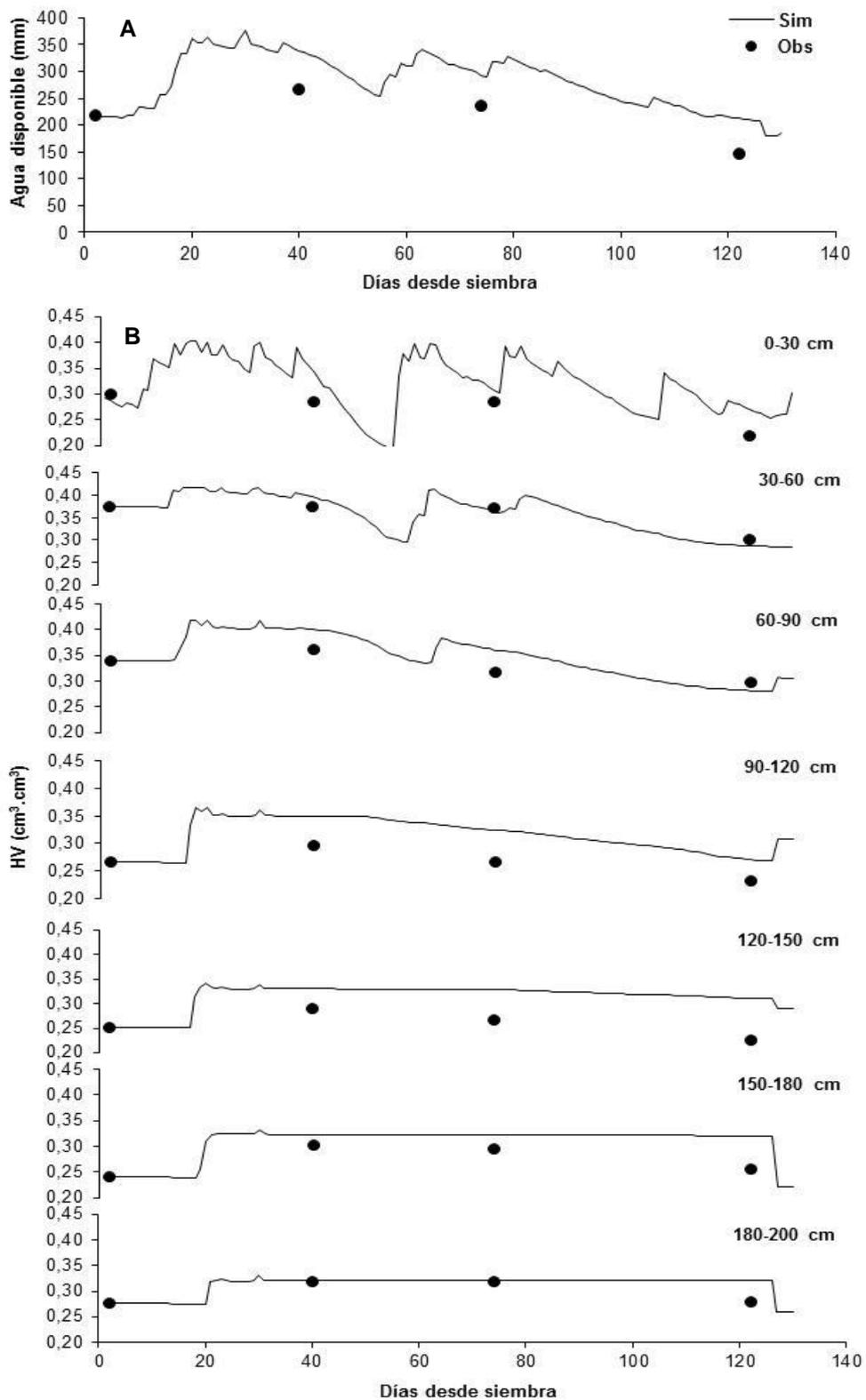


Figura 23. PERGAMINO, campaña 2009-2010. Comparación entre valores observados (puntos) y simulados (líneas continuas). SRGF 1,5, SLRO 91 y SLDR 0,8. A) Agua disponible en mm. B) Humedad volumétrica (HV) en cm³·cm⁻³ por estratos de suelo.

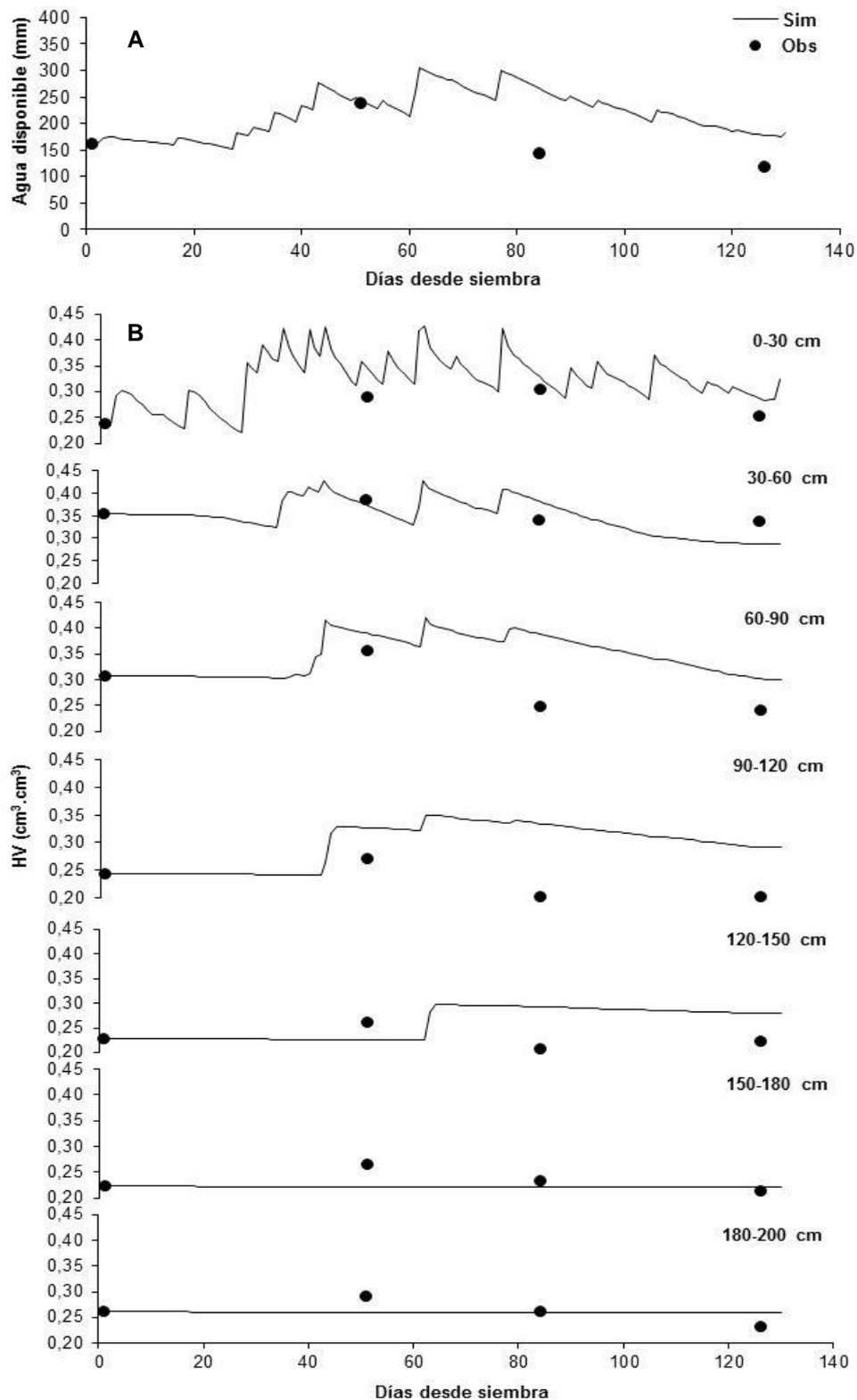


Figura 24. PERGAMINO, campaña 2010-2011. Comparación entre valores observados (puntos) y simulados (líneas continuas). SRGF 1,5, SLRO 91 y SLDR 0,6. A) Agua disponible en mm. B) Humedad volumétrica (HV) en cm³.cm⁻³ por estratos de suelo.

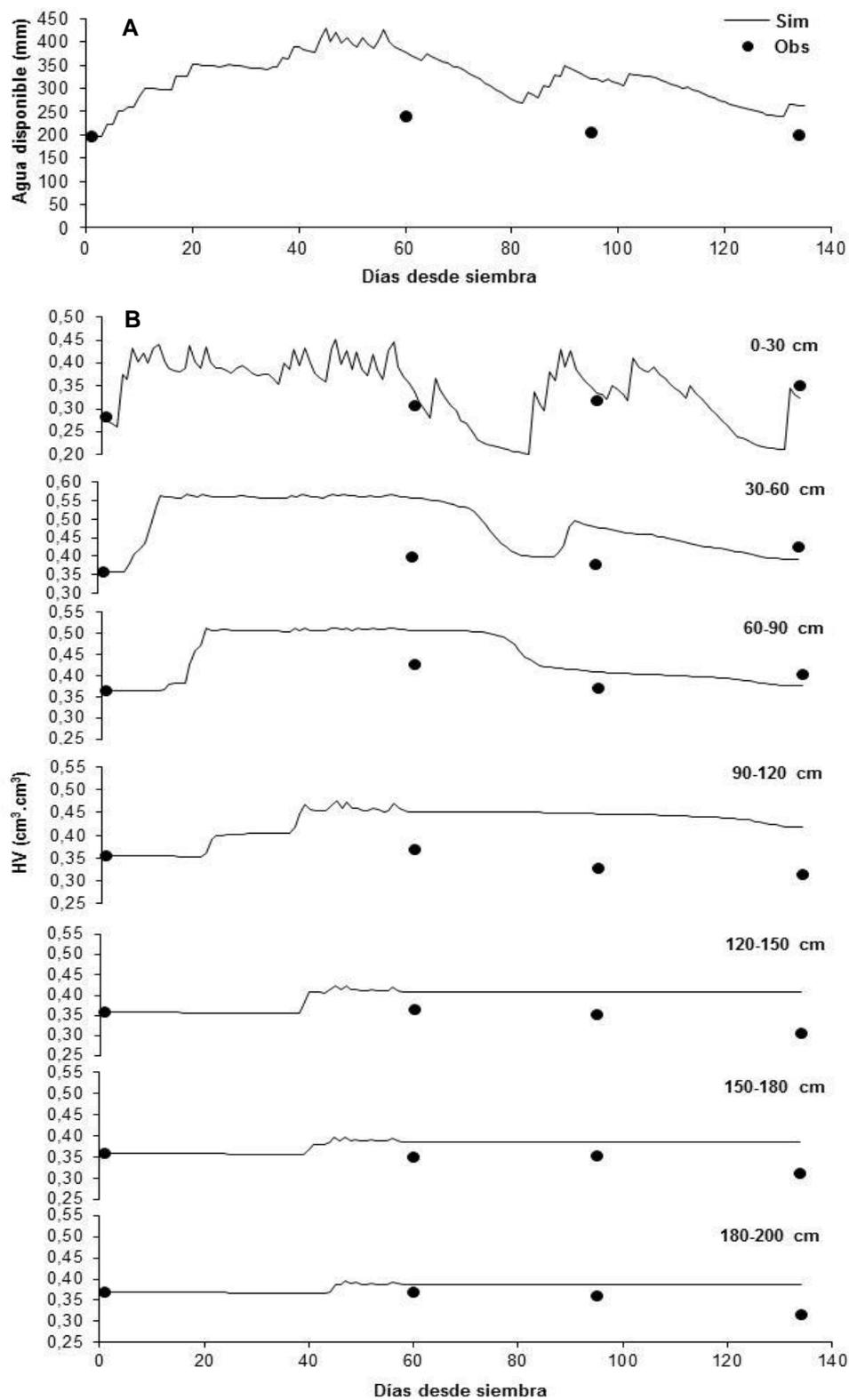


Figura 25. CONESA, campaña 2009-2010. Comparación entre valores observados (puntos) y simulados (líneas continuas). SRGF 1,5, SLRO 91 y SLDR 0,6. A) Agua disponible en mm. B) Humedad volumétrica (HV) en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ por estratos de suelo.

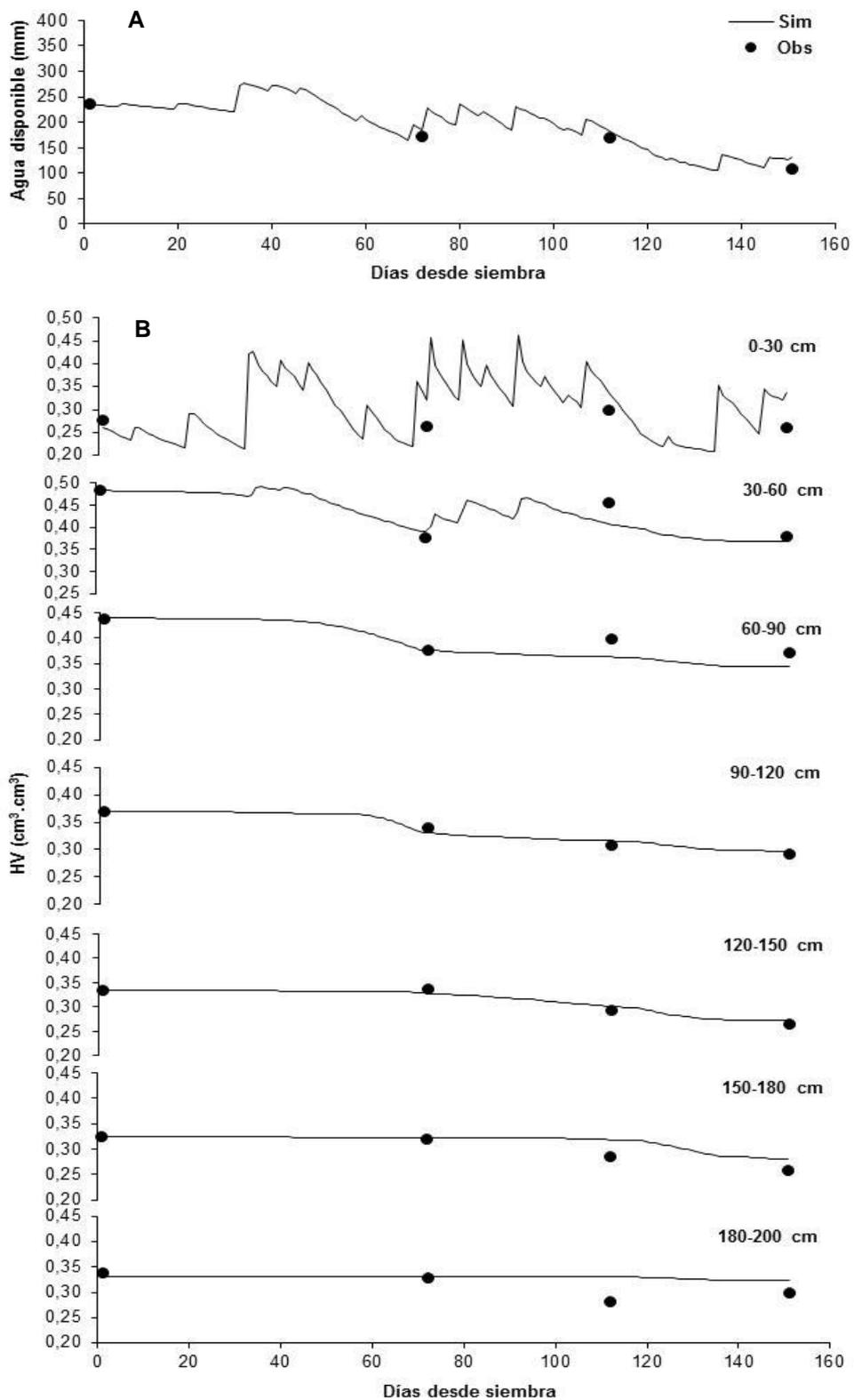


Figura 26. CONESA, campaña 2010-2011. Comparación entre valores observados (puntos) y simulados (líneas continuas). SRGF 1,5, SLRO 81 y SLDR 0,6. A) Agua disponible en mm. B) Humedad volumétrica (HV) en cm³.cm⁻³ por estratos de suelo.

4. Balance hídrico, componentes asociados y eficiencia de uso del agua.

Por medio de la evaluación de los flujos de agua entrante y saliente de la zona radical del cultivo y en un determinado período de tiempo, se puede observar la importancia relativa de cada uno de los componentes del balance hídrico según el tipo de suelo, su uso y año climático:

$$H_f = H_i + P - ET - ES - D \quad (\text{eq.3})$$

donde:

H_f = Humedad final

H_i = Humedad inicial

P = Precipitación

ET = Evapotranspiración del cultivo

ES = Escurrimiento superficial

D = Percolación

La precipitación (P) aporta agua a la zona radical. Parte de la P puede perderse por escurrimiento superficial (ES) y percolación profunda (D), ambos componentes de difícil cuantificación. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo (ET) son los encargados de agotar el agua de la zona radicular. En este caso, la ET se cuantificó mediante el método FAO Penman-Monteith el cual determina la evapotranspiración de referencia (ET_o). La ET bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (K_c) que relacionan la ET con la ET_o . La ET de suelos cultivados bajo condiciones no estándar se ajusta mediante un coeficiente de estrés hídrico (K_s) o modificando el coeficiente de cultivo (FAO, 1998). En el caso del modelo de simulación de cultivo utilizado, se aplica una relación entre la tasa de ET_o y la tasa de absorción de agua por la raíces, para generar un índice de estrés y determinar así la ET .

En este análisis no se consideraron otros flujos de agua por ser inexistentes o ser desestimados tales como riego, ascenso capilar desde napa freática, excesos de agua superficial y movimiento lateral subsuperficial. Por medio del uso de la ecuación 3 se estimó el drenaje total (cuadro 14). Para cuantificar sus componentes, es decir ES y D , se utilizaron las proporciones asignadas por las rutinas de agua del modelo DSSAT 4.5 con los parámetros de crecimiento radical (SLGF), drenaje (SLDR) y escurrimiento (SLRO) que menor error de predicción de la HV de suelo generaron (punto 3.2). Es decir, se utilizaron los

porcentajes calculados por el modelo para ES y D luego de haber intervenido mediante la variación de los tres factores anteriormente citados y después de analizar la sensibilidad en los ajustes entre simulados y observados.

En la figura 27 se representan las precipitaciones (P), el escurrimiento superficial (ES) y el drenaje interno o percolación (D). En la campaña 2009/2010 con elevados registros de P en el período S-R7 se estimó un drenaje total porcentual similar para los tres suelos, cercano a la mitad de las P registradas.

	JUNIN		PERGAMINO		CONESA	
	2009/10	2010/11	2009/10	2010/11	2009/10	2010/11
Humedad inicial	145,3	173,8	217,9	161,8	197,5	237,3
Humedad final	133,1	100,1	145,7	119,2	198,9	108,7
Precipitaciones	907	481	737	533	1000	540
Evapotranspiración del cultivo	485,1	490,0	444,2	461,0	516,1	525,0
Drenaje total	434,1	64,7	365,0	114,6	482,5	143,6
(Drenaje total/precip.)*100	48%	13%	50%	22%	48%	27%
Escurrimiento superficial	38,6	64,7	296,3	114,6	373,2	143,6
(Esc. sup./drenaje total)*100	9%	100%	81%	100%	77%	100%
Percolación	395,5	0	68,7	0	109,3	0
(Perc./drenaje total)*100	91%	0%	19%	0%	23%	0%

Cuadro 14. Componentes del balance hídrico en mm según la ecuación 3 en el período S-R7 para Junín, Pergamino y Conesa en las campañas 2009/2010 y 2010/2011. Humedad inicial a la siembra (S), humedad final a madurez fisiológica (R7), precipitaciones en el período S-R7, evapotranspiración del cultivo calculada, drenaje y su partición proporcional estimada por el modelo DSSAT 4.5.

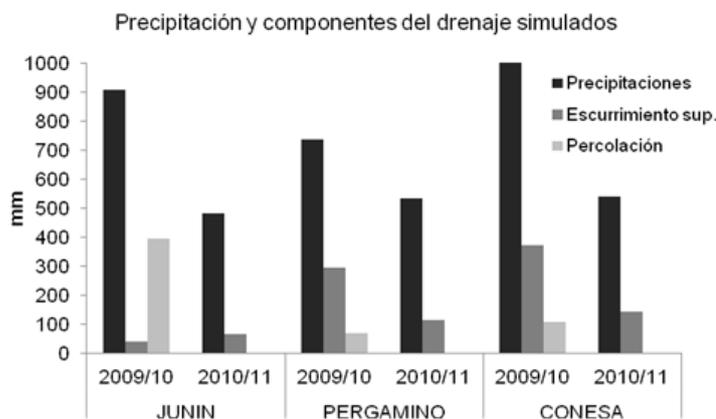


Figura 27. Precipitación y componentes estimados del drenaje para Junín, Pergamino y Conesa en las campañas 2009/2010 y 2010/2011.

No obstante, sus componentes variaron sensiblemente. En el caso del Hapludol típico (Junín) el 9% se asignó a ES y el 91% a D, mientras que para el Argiudol típico (Pergamino) y el Argiudol vértico (Conesa) la relación se invirtió y el ES representó el 81% y 77%, respectivamente. Por otro lado, en la campaña 2010/2011 las P moderadas disminuyeron marcadamente el drenaje total y se estimó en un 13%, 22% y 27% de las P registradas para el Hapludol típico, Argiudol típico y Argiudol vértico, respectivamente. Además, dicha pérdida de agua correspondió solo a ES sin estimarse D a profundidad. Estas modelizaciones estiman diferencias en los flujos de agua que componen el balance hídrico según la abundancia de P y el tipo de suelo: en años de lluvias abundantes la percolación en suelos similares al Hapludol estudiado pueden registrar elevada D mientras que los Argiudoles generan valores relativamente superiores de ES.

Por otro lado, se calcularon los consumos de agua para cada una de las localidades y en las dos campañas analizadas. Dichos consumos se obtuvieron como la ET acumulada calculada por el modelo DSSAT 4.5 y, como se explicó anteriormente, considerando al método FAO Penman-Monteith para la determinación de la ETo. El consumo medio fue de 487 mm con un rango de variación entre 444,2 mm y 525,0 mm (cuadro 15). Los mayores consumos estuvieron relacionados a las fechas de siembra más tempranas y los menores consumos a las fechas de siembra más tardías, explicados por una relación lineal negativa de $R^2=0,69$ (figura 28). Si bien la cantidad de datos es reducida, se observó para la campaña 2009/2010 una relación positiva y de buen ajuste entre rendimiento y consumo, mientras que para la campaña 2010/2011 no existió tal comportamiento.

A partir de estos consumos calculados (ET) se obtuvo la eficiencia del uso del agua (EUA), por medio de la relación entre el rendimiento seco en grano y la ET. El promedio de la EUA para los seis experimentos fue de $7,7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y la media por localidad en orden decreciente fue de $8,2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, $7,6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y $7,2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ para Pergamino, Conesa y Junín respectivamente. En esta última localidad se observó mayor rango de variación entre campañas, siendo notable la baja EUA para la campaña 2010-2011. Probablemente este comportamiento esté asociado con las menores precipitaciones, a las mayores temperaturas en todas las subetapas y a la alta demanda atmosférica registrada, donde la baja retención hídrica de este suelo no pudo satisfacer dicha demanda. También es notable la menor EUA para Pergamino en la campaña 2009-2010. Una posible explicación puede estar relacionada con los altos niveles registrados en la región de Mancha Ojo de Rana (*Cercospora sojina*, Hara) y la susceptibilidad del cultivar, donde si bien se realizaron las aplicaciones según los umbrales existentes, igualmente pudo haber estado afectado el rendimiento en grano.

	JUNIN		PERGAMINO		CONESA	
	2009/10	2010/11	2009/10	2010/11	2009/10	2010/11
ET _o (mm)	570,6	611,8	541,4	589,5	611,4	696,9
ET (mm)	485,1	490,0	444,2	461,0	516,1	525,0
Rendimiento (kg.ha ⁻¹)	4209	2738	3393	4052	4184	3751
EUA (kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)	8,7	5,6	7,6	8,8	8,1	7,1

Cuadro 15. Evapotranspiración de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo (ET), rendimiento seco de grano y eficiencia del uso del agua (EUA) para Junín, Pergamino y Conesa en las campañas 2009/2010 y 2010/2011.

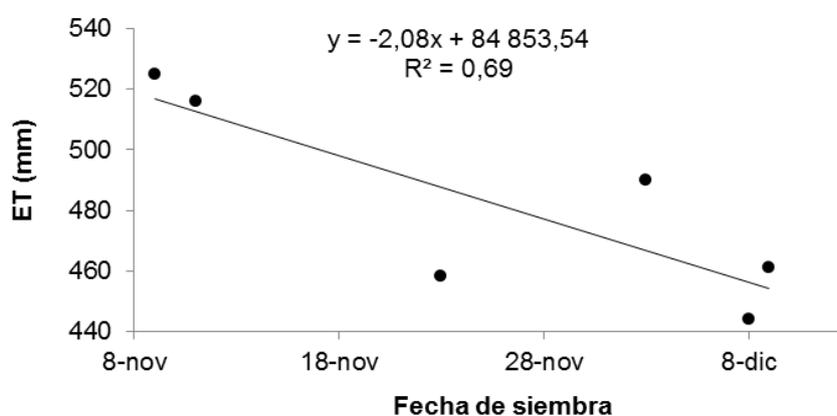


Figura 28. Evapotranspiración del cultivo (ET) en función de la fecha de siembra. Junín, Pergamino y Conesa. Campañas 2009-2010 y 2010-2011.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN

El presente trabajo demuestra la necesidad de ajustar variables para mejorar la capacidad predictiva de los balances hídricos simulados de soja (*G. max*) de primera siembra en Hapludoles típicos, Argiudoles típicos y Argiudoles vérticos del norte de la provincia de Buenos Aires y bajo siembra directa. Múltiples variables de suelo, clima y genotipo deben ser establecidas antes de realizar simulaciones con el programa DSSAT V4.5 que busquen inferir o predecir la humedad volumétrica del suelo a lo largo del ciclo del cultivo. Algunas de estas variables son de fácil disponibilidad como precipitaciones, temperatura, humedad, parámetros superficiales de suelo, velocidad de viento; y otras más difíciles de adquirir, tales como radiación, variables de suelo a profundidad o coeficientes genéticos ajustados.

El uso de parámetros de suelo, que determinan la CAU, simulados a través de textura y materia orgánica, no siempre mantienen una estrecha relación con los resultados de laboratorio. Esto sugiere una valoración local para no incurrir en errores mayores en las simulaciones temporales. Según las estimaciones de CC y PMP por el método de Rawls *et al.* (1982) para los tres suelos evaluados y a los 2 m de profundidad (cuadro 9, figura 15), se observó una subestimación de los valores medios. Estas diferencias probablemente pueden ser atribuidas a distintas condiciones estructurales y a la presencia de arena de tipo muy fina con elevada superficie específica que podrían elevar en parte los valores de CC en los suelos del presente estudio. Además, la presencia en los suelos pampeanos de altos contenidos de limos finos de origen vegetal elevan la porosidad textural (Cosentino y Pecorari, 2002) pudiendo generar diferencias en la estimación de las constantes hídricas por funciones de pedotransferencias, en comparación con suelos que tienen baja proporciones de fitolitos. La mayor RMSE se encontró para CC en el Hapludol típico (Junín) y en el Argiudol vértico (Conesa), donde aumentan las fracciones de arena y arcilla, respectivamente. Por otro lado, el PMP mantuvo desviaciones medias similares para los tres suelos estudiados. Damiano y Taboada (2000) obtuvieron resultados semejantes para la misma función de pedotransferencia (FPT) aplicada a suelos parecidos, observando menor error relativo en texturas franco limosas. En el mismo trabajo los autores determinaron diferente grado de adaptabilidad para cuatro FPT de origen nacional e internacional, recomendando el uso de cada una de ellas para la región donde fueron generadas. Gijssman *et al.* (2002), luego de probar ocho métodos de estimación de parámetros de retención hídrica en suelos de Estados Unidos, encontraron una amplia variación de adaptabilidad

según su composición textural y origen. Con respecto a la DA simulada por el método Rawls y Brakensiek (1985), se observó una mejor adaptación para los Argiudoles estudiados, notándose una leve tendencia a la subestimación de los valores. Este comportamiento puede deberse al diferente origen geológico de los componentes texturales sobre los cuales los autores generaron el método. Por el contrario, en el Hapludol típico se observó una elevada RMSE ($0,11 \text{ g.cm}^{-3}$) y clara tendencia a la sobreestimación de la DA (MD: $0,18 \text{ g.cm}^{-3}$). Probablemente esta diferencia se explique por el elevado contenido de arena muy fina: el 95% de la arena total corresponde a esta fracción (Carta de Suelo INTA, hojas 3560-8-3), presentando un diámetro medio de 50 a $100 \mu\text{m}$, una elevada superficie específica y por ende, no genera aumentos marcados en la DA.

La determinación en laboratorio del PMP mediante placa extractora de presión a 1,5 MPa con muestra disturbada (membrana de Richards) y la obtención de la CC mediante mesa de tensión a 0,02 MPa con muestras sin disturbar, permitió obtener una muy buena aproximación a la CAU de cada uno de los suelos estudiados. En el análisis de los perfiles hídricos periódicos (figuras 10, 11 y 12), durante las dos campañas evaluadas, se pudo observar que la HV se mantuvo en la gran mayoría de los casos dentro de los límites de PMP y CC propuestos. Se corroboró el incremento de la CAU según el gradiente textural sudoeste noreste de la región bajo estudio, obteniéndose hasta los 2 m de profundidad 269,4 mm, 348,6 mm y 390,7 mm de agua útil máxima para las Series de suelo Junín, Pergamino y Ramallo, respectivamente. Además, las ecuaciones propuestas para la estimación de la CC y el PMP (eq.1 y eq.2) en los suelos del presente estudio, generaron altos coeficientes de correlación ($R^2=0,9$ y $0,91$, respectivamente) entre los valores observados a campo y calculados por dichas ecuaciones.

Pecorari *et al.* (1988) obtuvieron para las mismas series de suelo valores similares de PMP. En cuanto a CC reportaron valores semejantes para la Serie Junín, pero inferiores para las Series Pergamino y Ramallo. Como resultado determinaron 251 mm, 310 mm y 272 mm de CAU para las Series Junín, Pergamino y Ramallo, respectivamente. Las diferencias entre estos valores y los calculados en el presente estudio se deben principalmente a la forma en que los autores calcularon la CC, ya que fue determinada a través de la HV a profundidad luego de lluvias abundantes, durante tres años climáticos distintos y diferentes cultivos. Al tratarse de suelos de menor infiltración superficial seguido de horizontes texturales que disminuyen la velocidad del frente de humectación (Argiudoles), se provoca la interrupción del aporte de agua a horizontes inferiores impidiendo que lleguen a saturación, más aún en presencia de cultivos activos, que generan un sistema radical y un determinado volumen de suelo explorado (Pecorari *et al.*, 1988).

Andriani (2009), determinó la capacidad máxima de almacenamiento de agua útil a 2 m de profundidad para series de suelo del sur de Santa Fe y a nivel de Gran Grupo. Los Argiudoles presentaron una CAU aproximada de 300 mm, mientras que para los Hapludoles se obtuvieron valores cercanos a 250 mm. Dentro de los primeros, el análisis se realizó sobre Argiudoles típicos pertenecientes a las series Maciel, Hansen, Clason y Los Cardos; Argiudol ácuico serie Armstrong; y sobre el Argiudol vértico serie Peyrano. En el caso de los Hapludoles, se utilizaron para el análisis las series de suelo Santa Isabel y Maggiolo pertenecientes al subgrupo Hapludoles típicos y la serie Santa Ana correspondiente a los Hapludoles énticos. En comparación a los suelos del presente estudio, las series Santa Isabel, Hansen o Los Cardos y Peyrano son similares a las series Junín, Pergamino y Ramallo, respectivamente. En el mismo trabajo, el autor destaca la dificultad de obtener el valor de PMP a campo y la similitud de la determinación en laboratorio mediante membrana a 1,5 MPa de succión con los valores reales evaluados en condiciones de campo. Por otra parte, para la constante hídrica CC, el autor sugiere que se determine "in situ", es decir directamente a campo debido a su alta dependencia a condiciones estructurales e intrínsecas del perfil del suelo haciendo que las determinaciones de laboratorio no sean siempre indicadores confiables.

Considerando los perfiles hídricos del presente estudio (figuras 10, 11 y 12), se puede observar que la mayoría de los valores de HV determinados en los momentos de S, R1, R5 y R7, no alcanzaron el PMP y a la CC medidos en laboratorio. En este sentido, se encontró un mejor comportamiento del Hapludol típico, seguido del Argiudol típico y por último, el Argiudol vértico. En superficie, la HV presentó frecuentes variaciones pudiendo llegar a ser menor al PMP calculado en laboratorio (Ritchi, 1981; Dardanelli *et al.*, 2004; Pecorari, comunicación personal). Esto se produce en los primeros centímetros de suelo por ser la zona que debe soportar la influencia de la evaporación directa, generándose un diferencial de potencial hídrico entre el suelo y la atmósfera que puede llegar al orden de cientos de MPa y una elevada pérdida de agua superficial de suelo. A profundidad, tampoco se logró alcanzar en todos los casos los valores de PMP medidos en el laboratorio. Por un lado, esto se puede explicar porque no fueron ensayos de sequía, existiendo aportes hídricos durante el ciclo del cultivo, disminuyendo la necesidad de un desecamiento extremo del perfil del suelo por el sistema radical. Por otro lado, se observó el efecto de los horizontes texturales subsuperficiales que actúan como una barrera física al crecimiento y exploración radical. Para el Argiudol típico se determinó la presencia de un horizonte argílico con 43,5% de arcilla entre los 30 y 63 cm de profundidad, mientras que para el Argiudol

vértico se determinó un contenido de arcilla mayor al 43,7% entre los 19 y 89 cm de profundidad.

Dardanelli *et al.* (2004) demostraron para suelos similares a los del presente estudio, que en los horizontes con alto contenido de arcilla (mayor a 35%) se produce un menor uso diario del agua disponible. Los autores atribuyen este comportamiento no solo a la cantidad, sino a la presencia de arcillas expandibles, las cuales favorecen la generación de grietas ante el humedecimiento y secado del horizonte. Como resultado, el sistema radical solo puede crecer a profundidad a través de estas grietas las cuales actúan como zonas de paso, resignando la exploración lateral por medio de raíces secundarias en estos horizontes texturales e impidiendo lograr una densidad de raíces crítica que permita llegar a las máximas tasas de extracción de agua. No solo se afecta la exploración radical en los propios horizontes texturales, sino también en las capas más profundas (Passioura, 2002). Tardieu (1988a) denominó a este comportamiento como “efecto sombra” y ha sido demostrado en suelos similares al del presente estudio por varios autores (Pecorari y Balcaza, 1988; Andriani, 2000; Dardanelli *et al.*, 2003) al confirmar en suelos con impedancias subsuperficiales (horizontes Bt) mayor exploración radical por encima de ella, menor en la capa con limitaciones propiamente dicha, y una reconstitución de los niveles de exploración por debajo, aunque con algún retraso en el tiempo.

Se pudo observar en los perfiles hídricos (figuras 10, 11 y 12) un desecamiento diferencial de los experimentos evaluados. Si bien entre ellos varió el genotipo y la fecha de siembra, se vieron para el mismo estadio fenológico diferencias en la profundización radical, asumiendo que la disminución de la HV en un determinado estrato a profundidad se debe a la presencia de raíces. Para R7, en todos los experimentos se observaron cambios en la HV a la máxima profundidad muestreada, lo que indicaría que el cultivo de soja (*G. max*) de primera siembra logró consumir agua al menos hasta los 2 m de profundidad en los tres suelos. Las diferencias se observaron en estadios fenológicos previos. En el caso del Hapludol típico, para los dos años se logró en R5 una profundización cercana a los 180 cm, mientras que para los Argiudoles se observó un comportamiento diferencial según el año climático. En la campaña 2009-2010, con mayores aportes de lluvias, se notó para R5 una profundización aproximada de 150 cm y en la campaña 2010-2011, donde las precipitaciones fueron menores, la profundización alcanzó los 180 cm para el mismo estadio. Este comportamiento se podría explicar debido a la necesidad que tiene el cultivo de explorar en profundidad en busca de reservas hídricas si los aportes de lluvia no son abundantes. De la misma manera, podrían haber existido diferencias en la temperatura de suelo, generando así distintas tasa de crecimiento radical y profundización. También, pudo

haber diferente comportamiento de los sistemas radicales, asociados a los suelos evaluados y explicados por la variabilidad genética.

Andriani (2000) determinó la profundización radical del cultivo de soja (*G. max*) para Argiudoles vérticos y Hapludoles del sur de Santa Fe. Para varios años y fechas de siembra semejantes demostró una mayor velocidad de profundización en el Hapludol. Si bien en ambos suelos se registraron profundidades máximas similares (cercasas a los 2 m), en el Argiudol vértico se observó a los 80 días después de la siembra (aproximadamente R5) un sistema radical 18 cm menos profundo que en el Hapludol, producto del retraso en el crecimiento ocasionado, entre otros factores probables, por la presencia de horizontes con alto contenido de arcilla.

Además de las barreras físicas del suelo, debemos considerar la influenciada del genotipo evaluado. A medida que aumenta la estación de crecimiento (ej. mayor grupo de madurez, fechas de siembra tempranas), se logra alcanzar menores valores de HV de suelo a profundidad. Esto sucede porque el cultivo tiene más tiempo para completar el proceso de exploración radical e incrementar la tasa de extracción de agua en profundidad (Dardanelli, 2004). Si bien no era una variable en este trabajo, se observó un comportamiento diferencial entre grupos de madurez de soja. Si consideramos el Argiudol vértico, se obtuvieron para la campaña 2010-2011 menores valores de HV a profundidad, explicado probablemente por el mayor ciclo del genotipo utilizado.

Con respecto a la modelización temporal de la HV a los 2 m de profundidad, se registraron distintos comportamientos en las dos campañas y los tres suelos evaluados. Se observó una alta influencia del tipo año climático. Dado que la campaña 2009-2010 transcurrió bajo condiciones de abundantes precipitaciones (año “niño”, Océano Niño Index, fenómeno ENSO) los aportes hídricos a los experimentos fueron excesivos. Los registros durante el lapso S-R7 para las tres localidades oscilaron entre 737 mm y 1000 mm (cuadro 5). De esta manera, el modelo no logró generar los ajustes internos necesarios para mejorar los valores simulados. En las tres localidades se observó una sobreestimación de la HV durante todo el ciclo del cultivo. Si consideramos el CV como estadístico para hacer comparable las simulaciones de Junín, Pergamino y Conesa, se obtuvo 32,4%, 16,6% y 22,1% de variación en la HV, respectivamente (cuadros 10, 11 y 12). En el caso de Pergamino se registró un menor CV probablemente por un menor aporte de lluvias en todo el ciclo, principalmente en el subperíodo R5-R7 y en menor medida en el subperíodo S-R1. Si bien se intentó mejorar los ajustes mediante la variación de los factores SRGF, SLRO y SLDR (análisis de sensibilidad, cuadros 10, 11 y 12), el mejor CV encontrado fue 29,7%, 14,2% y 18,2%, para Junín, Pergamino y Conesa, respectivamente, notándose una baja

sensibilidad ante los cambios propuestos. En el caso del Hapludol típico, se observó una clara sobreestimación de la HV de 90 a 200 cm de profundidad (cuadro 13), probablemente explicada por simular mayor contenido hídrico, mientras que en realidad dichos excedentes podrían haber percolado a profundidad más allá de los 2 m. Para los Argiudoles las leves mejoras encontradas surgieron principalmente de la combinación de mayores SLDR y SLRO, explicado probablemente por simular una menor entrada de agua en el perfil. De esta manera, el modelo tendió a disminuir la HV en los horizontes Bt y así hubo menos diferencia entre los valores observados y simulados.

La campaña 2010-2011 transcurrió bajo condiciones de año niña (Océano Niño Index), situación que incrementa la variabilidad espacial de las precipitaciones. Sin embargo, las lluvias registradas en las tres localidades (cuadro 5) tendieron a ser cercanas a la media para el período noviembre-marzo (542,6 mm, INTA EEA Pergamino) a excepción de Junín donde fueron inferiores. Las simulaciones temporales de la HV mejoraron con respecto a la primera campaña, aunque en términos generales, también se registró una sobreestimación de la HV del suelo. Se observaron para los factores SRGF, SLRO y SLDR por "default" los siguiente CV: 19,2%, 21,7% y 9,5% para Junín, Pergamino y Conesa, respectivamente. Luego del análisis de sensibilidad y de la elección de las mejores combinaciones se logró obtener 13,2%, 12,1% y 8,4% de CV para las mismas localidades. En el caso del Hapludol típico, se notó una mejora principalmente con la disminución del SLDR y el aumento del SLRO explicado por menor contenido simulado de humedad en el estrato 90-200 cm producto de una disminución en el drenaje interno y un mayor escurrimiento superficial. En cuanto al Argiudol típico, se mejoraron los valores de ajuste ante incrementos en el factor SLRO, siendo menos sensibles al SLDR. Este comportamiento puede estar relacionado con la simulación de menor entrada de agua al suelo, lo cual disminuyó el contenido de HV en capas medias del perfil. En cuanto al Argiudol vértico, la sensibilidad a la variación del SLDR y el SLRO fue casi despreciable, probablemente explicada porque los factores evaluados o sus valores asignados no son capaces de modificar la baja velocidad de cambios en la dinámica del agua en el perfil. Además, cabe aclarar que en el caso de este experimento el uso del factor SLRO 91 generó una marcada disminución del rendimiento simulado lo cual no hace recomendable su utilización en estas simulaciones.

Con respecto al factor SRGF, para las dos campañas bajo estudio se observó una clara diferencia entre el Hapludol y los Argiudoles. El uso de los distintos valores para este parámetro generó mayor cambio en los estadísticos en el Hapludol típico y menores cambios en el Argiudol típico y en el Argiudol vértico, siendo este último el menos sensible. El SRGF 1, el cual simuló una mayor exploración radical (punto 3.2), fue la opción que

generó los mejores ajustes en el Hapludol típico. Por otro lado, se observó en los Argiudoles la tendencia media de obtener los mejores ajustes con SRGF 1,5 (enraizamiento medio) sin mejorar sustancialmente con el uso de SRGF 1. Estos resultados sugieren que la utilización de los valores de SRGF por “default” (para este estudio, SRGF 2) no representarían las condiciones de crecimiento y exploración de los sistemas radicales en los experimentos evaluados, principalmente en el Hapludol típico (Serie Junín).

Dardanelli *et al.* (2003) lograron el ajuste de derivaciones del SRGF mediante la utilización de un programa de optimización entre la HV simulada y observada, para tres suelos de la Región Pampeana con distinto grado de restricción al crecimiento radical y para todos sus horizontes. Modificaron así el valor de dos factores empíricos: el de impedancia de suelo y el de uniformidad o agrupamiento de raíces (“clumping”). Como resultado, lograron muy bajos errores en la estimación temporal de la HV al incrementar la exploración radical en los suelos y horizontes que ofrecían menor restricción al crecimiento radical (Hapludol éntico). Determinaron también valores umbrales en el contenido de arcilla (32,4%-35,7%) para los horizontes argílicos a partir de los cuales se restringe la profundización y proliferación radical y por ende, las tasas potenciales máximas de captación de agua (Argiudol típico y Argiudol vértico).

Por otro lado, Ma *et al.* (2009) evaluaron la respuesta simulada por DSSAT V4.0 para seis cultivos, dentro de los cuales se encontró la soja (*G. max*), ante diferentes manejos de agua y nitrógeno en función de distintos métodos de estimación de las propiedades hidráulicas del suelo y del SRGF. Los autores utilizaron dos funciones exponenciales para el cálculo del SRGF. Una de ellas, igual a SRGF 2 del presente estudio y otra, con exponente 3 la cual generó menos exploración radical. Los autores concluyeron que ambos SRGF generaron simulaciones aceptables en biomasa y agua del suelo, permitiendo su utilización sin calibrar este parámetro para horizontes individuales.

Otro punto a considerar es la máxima tasa de extensión radical utilizada en las simulaciones. Este factor indica la velocidad máxima con la cual el sistema radical se extiende en profundidad por unidad de tiempo térmico y en ausencia de estrés hídrico. El valor por “default” de este factor, y utilizado en este estudio, fue de 4 cm.d⁻¹ durante toda la estación de crecimiento. Calmón *et al.* (1999 a) determinaron para el cultivo de soja en dos suelos distintos, que la utilización de 2 cm.d⁻¹ como máxima tasa de extensión radical producía reducciones significativas en el rendimiento en grano, biomasa total, profundización radical y transpiración. El autor concluyó que un valor de 4 cm.d⁻¹ fue el adecuado para la simulación de HV del suelo, motivo por el cual se utilizó este valor en el presente estudio.

Por otro lado, experiencias de autores locales indican que el incremento de este factor a 4.5 cm.d^{-1} genera mejores predicciones en la simulación temporal de la HV del suelo (Dardanelli *et al.* 2003) y que solo se utilizaría 4 cm.d^{-1} cuando no se consideran impedancias en el suelo (Mercau *et al.* 2007). Esto podría explicar el motivo por el cual no se observaron disminuciones marcadas en la HV simulada en los estratos profundos (más de 150 cm) en la mayoría de los experimentos evaluados. De esta manera, se introduciría una fuente de error en la simulación del crecimiento a profundidad del sistema radical, en la densidad de raíces lograda y por ende en la extracción de agua, sobreestimando la simulación de la HV.

Para finalizar, debemos considerar que la evaluación temporal de la HV simulada por medio de tres muestreos de suelos durante el ciclo del cultivo (R1, R5 y R7), tal vez brinde pocos puntos de comparación. De esta manera, disminuyen las probabilidades de realizar comparaciones entre valores observados y simulados que puedan mejorar el ajuste mediante los estadísticos utilizados. En este estudio se priorizó la mejor descripción posible del agua disponible por medio del método gravimétrico y con elevada cantidad de muestras en detrimento de la frecuencia de muestreo.

Se deduce como corolario a lo discutido que el presente estudio generó información sobre parámetros relacionadas con el balance hídrico del cultivo de soja (*G. max*) en un Hapludol típico, un Argiudol típico y un Argiudol vértico, bajo siembra directa, ubicados en el norte de la provincia de Buenos Aires y sobre el grado de ajuste de la simulación temporal de la HV del suelo mediante un modelo complejo de simulación de cultivos y rutinas agua asociadas, analizando el grado de adaptabilidad a cada ambiental evaluado.

A partir de estos resultados se cuenta con nuevos conocimientos para i) determinar e interpretar parámetros calculados por laboratorio o simulados por FPT que determinan la CAU del suelo, ii) utilizar una herramienta de simulación de balance hídrico con ciertos recaudos y iii) conocer el posible grado de error cometido en tres suelos representativos de la zona y años climáticos distintos.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

✓ La variación de los balances hídricos pudo ser explicada por el modelo de simulación utilizado. El grado de ajuste en la simulación temporal de la HV del suelo, estuvo relacionado con el tipo de suelo y las condiciones climáticas del año, indicando diferente grado de adaptabilidad a los tres ambientes evaluados. Como tendencia general se observó una sobreestimación de la HV del suelo en los tres sitios de estudio y en los dos años evaluados, pero con mayores diferencias en el año de mayores precipitaciones (año “niño”). Además, la variación de parámetros del modelo relacionados a las condiciones de eliminación de excedentes hídricos, escurrimiento del agua y capacidad de enraizamiento, generó distinta sensibilidad en los estadísticos utilizados según año y tipo de suelo. Se encontraron así combinaciones de valores de estos parámetros que mejoraron en mayor o menor medida los ajustes obtenidos por “default”.

✓ En el caso del Hapludol típico, las principales mejoras en el ajuste surgieron por la mayor capacidad de enraizamiento evaluada (SRGF 1). En el año de mayores precipitaciones, la variación evaluada de los parámetros relacionados con el drenaje (SLDR) y escorrentía superficial (SLRO) no generaron cambios sensibles en los ajustes y se notó una marcada sobreestimación de la HV en los horizontes subsuperficiales, mientras que en realidad dicha humedad se habría perdido más allá de los 2 m de profundidad. Para la campaña de menores precipitaciones, se notó una mejora en los ajustes con la disminución del SLDR y el aumento del SLRO explicado por menor contenido de HV simulada en los horizontes inferiores producto de una disminución en el drenaje interno y un mayor escurrimiento superficial.

✓ En cuanto al Argiudol típico y el Argiudol vértico, se notó una menor sensibilidad ante los distintos factores de enraizamiento evaluados, siendo el de capacidad media (SRGF 1,5) el que generó cierta mejoras en los ajustes. Para la campaña de mayores precipitaciones, en ambos suelos el modelo sobreestimó la HV producto de simular mayores entradas de agua en el perfil, mientras que en realidad dichas entradas fueron mucho menores, explicado probablemente por excesivo escurrimiento superficial. De esta manera, las leves mejoras se lograron por la combinación de mayores SLDR y SLRO. Para la campaña de menores precipitaciones, en el Argiudol típico se mejoraron los valores de ajuste ante incrementos de SLRO, siendo menos sensibles ante cambios en SLDR. Este comportamiento se relacionó con la simulación de menor infiltración, lo cual disminuyó el contenido de HV en capas medias del perfil. En cuanto al Argiudol vértico, la sensibilidad a la variación del SLDR y el SLRO fue despreciable, probablemente explicada porque los

factores evaluados o sus valores asignados no son capaces de modificar la menor variación de cambios en los procesos que hacen a la dinámica del agua en estos suelos.

✓ El mejor comportamiento medio producto de las dos campañas evaluadas, se observó en el Argiudol típico y en el Argiudol vértico. El mayor error de predicción se registró en el Hapludol típico en la campaña de mayores precipitaciones (2009-2010), mientras que el menor error de predicción se observó en el Argiudol vértico para la campaña de menores precipitaciones (2010-2011).

✓ Se obtuvieron modelos sencillos para la predicción de las constantes hídricas en los suelos evaluados y se generaron estimaciones de los componentes del balance hídrico para los experimentos evaluados.

✓ En futuros trabajos sería recomendable establecer más relaciones para la parametrización del crecimiento radical, su interacción con los distintos grados de barreras físicas del suelo, para lograr mejores ajustes en las simulaciones de cultivo y guiar a los usuarios de estas herramientas. A su vez, sería necesaria la descripción de distintos genotipos para determinar su comportamiento ante distintas prácticas de manejo (fechas de siembra, arreglo espacial, protección, nutrición) y detectar posible adaptabilidad diferencial para su uso en distintos ambientes productivos. Además, se recomienda continuar evaluando los procesos vinculados al escurrimiento, infiltración y percolación profunda del agua de lluvia, su relación con los eventos de precipitaciones extremas y con las alteraciones superficiales ocasionadas por acciones antrópicas.

BIBLIOGRAFIA

- AAPRESID, 2013. Sitio web http://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2013/02/aapresid.evolucion_superficie_sd_argentina.1977_a_2011.pdf. Última visita Diciembre 2013.
- Andrade, F. y Sadras, V., 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce, INTA/Facultad de Ciencias Agrarias UNMP. pp. 89-193.
- Andriani, J.; Andrade, F; Suero, E. y Dardanelli, J., 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11:737-746.
- Andriani, J., 2000. Crecimiento de las raíces en los principales cultivos extensivos en suelos argiudoles de la provincia de Santa Fe. En *El Agua en los Sistemas Productivos para Mejorar la Producción* 13:40-44. Santa Fe, Argentina: INTA EEA Oliveros.
- Andriani, J., 2002. Estrés hídrico en soja. Sitio web: www.inta.gov.ar/ediciones/idea/oleaginosas/soja08.pdf. Última visita Diciembre 2013.
- Andriani, J., 2009. Constantes hídricas de los principales suelos del sur de Santa Fe. Para mejorar la producción 41:51-54.
- Bacigaluppo, S., 2008. Variabilidad del rendimiento del cultivo de soja en sistemas de siembra directa en el sur de Santa Fe. Tesis para optar al grado de Magister en Manejo y Conservación de recursos Naturales. Universidad Nacional de Rosario.
- Bastet, G.; Bruand, A.; Volz, M.; Bornard, M. y Quéting, P., 1997. Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of French soil. University of California, Riverside, CA.
- Bettolli, M.; Penalba O. y Vargas W., 2004. Cuantificación de la relación rendimiento de la soja-precipitación. Enfoque regional. X Reunión Argentina de Agrometeorología, Mar del Plata, 2004.
- Blake, G. y Hartge, K., 1986. Bulk density. En: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1*, 2nd Edition. *Agronomy* 9:363-375.
- Boote, K.; Jones, J. y Hoogenboom, G., 1997. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In *Agricultural Systems Modeling and Simulation*, pp. 651-692. R. M. Peart and R. B. Curry, eds. New York, N.Y.: Marcel Dekker.
- Boote, K.; Sau, F.; Hoogenboom, G. y Jones J., 2008. Experience with water balance, evapotranspiration, and predictions of water stress effects in the CROPGRO model. *Advances in Agricultural Systems Modeling Series 1*. Chapter 3:59-103.
- Calmon, M.; Batchelor, W.; Jones, J.; Ritchie, J.; Boote, K. y Hammond, L., 1999a. Simulating soybean root growth and soil water extraction using a functional crop model. *Trans. ASAE* 42:1867-1877.

Castiglioni, M.; Morrás, H.; Santanatoglia, O.; Altinier, M. y Tessier, D. 2007. Movimiento del agua en Argiudoles de la Pampa Ondulada con diferente mineralogía de arcillas. *Ciencia del suelo* 25:109-121.

Cosentino, D. y Pecorari, C., 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la Región Pampeana. *Ciencias del Suelo* 20:9-16.

Damiano, F. y Taboada, M., 2000. Capacidad de agua disponible en suelos agrícolas de la Pampa Ondulada usando funciones de pedotransferencia. *Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina. Comisión I- N° 29.

Dardanelli, J.; Bachmeier, O.; Sereno, R. y Gil, R., 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crops Res.* 54:29–38.

Dardanelli, J.; Calmon, M.; Jones, J.; Andriani, J.; Díaz, M. y Collino, D., 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three Argentine soils. *Trans. ASAE* 46:1265-1275.

Dardanelli, J.; Ritchie, J.; Calmon, M.; Andriani, J. y Collino, D., 2004. An empirical model for root water uptake. *Field Crops Res.* 87:59-71.

Day, P., 1965. Particle fractionation and particle size analysis. En: Black, C. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 562-566.

De Battista, J.; Andriulo, A. y Pecorari, C., 1992. El Perfil Cultural: un método para la evaluación de sistemas de cultivo. *Ciencia del Suelo*. Vol. 10-11.

Draper, N. y Smith, H., 1998. *Applied Regression Analysis*. John Wiley. Sons Inc., New York, 3rd Ed.

FAO, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper n° 56*. Roma.

Ferh, W. y Caviness, C., 1977. Stages of soybean development. *Iowa Agric. Exp. Station Special Report 80*. Iowa State University, Ames, IA.

Ferrari, M. 2010. ¿Nuestros actuales sistemas de producción agrícola son ambientalmente sustentables? *Publicaciones IPNI. Informaciones agronómicas n°48*.

Gardner, W., 1986. Water content. In: *Methods of soil analysis, (A Klute ed.)*. Part 1. 2nd ed. *Agronomy* 9:493-544.

Gijsman, A.; Jagtap, S. y Jones, J., 2003. Wading through a swamp of complete confusion: how to choose method for estimating soil water retention parameters for crop models. *European Journal of Agronomy* 18:77-106.

Gil, R., 2010. *Funcionamiento hídrico del suelo en planteos agrícolas*. Material de apoyo. Curso a profesionales. Universidad Nacional de Rosario.

Hoogenboom, G., Jones, J. y Boote, K., 1992. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: A review. *Trans. ASAE* 35:2043-2056.

Hoogenboom, G., Wilens, P. y Tsuji, G., 1999. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, DSSAT version 3, Vol. 4. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

InfoStat, 2008. InfoStat, versión 2008. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Brujas Argentina.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 1972. Carta de suelos de la Rep. Argentina. Hoja 3360-32, Pergamino.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 1978. Carta de suelos de la Rep. Argentina. Hoja 3360-27 y 28, Ramallo.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 1980. Carta de suelos de la Rep. Argentina. Hoja 3560-7 y 8, L.N. Alem-Junín.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 2010. Estación meteorológica EEA INTA Pergamino. Boletín interno.

ISO/FDIS 11274, 1998. Soil quality-Determination of Water-retention characteristic, Laboratory methods.

Jones, J.; Hoogenboom, G.; Porter, C.; Boote, K.; Batchelor, W.; Hunt, L.; Wilkens, P.; Singh, U.; Gijsman, A. y Ritchie, J., 2003. DSSAT Cropping System Model. *Eur. J. Agron.* 18:235–265.

Ma, L.; Hoogenboom, G.; Saseendran, S.; Bartling, P.; Ahuja, L. y Green, T., 2009. Effects of estimating soil hydraulic properties and root growth factor on soil water balance and crop production. *Agronomy Journal*, volumen 101:572-583.

Manichon, H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural: élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Paris: Institut National Agronomique. Thèse de Doctorat.

Meira, S. y Guevara, E., 1997. Application of SOYGRO in Argentina. In: Kropff, M.J., et al. (Eds.), *Applications of System Approaches at the Field Level*, v.2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 235-242.

Mercau, J.; Dardanelli, J.; Collino, D.; Andriani, J.; Irigoyen, A. y Satorre, E., 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Research* 100:200-209.

Micucci, F.; Taboada, M. y Gil, R., 2002b. El Agua en la Producción de Cultivos extensivos: I. El suelo como un gran reservorio. *Archivo Agronómico* N° 6, *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* N° 15. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

Minasny, B.; McBratney, A. y Bristow, K., 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma* 93:225-253.

Nelson, D. y Sommers, L., 1982. Organic carbon by Walkley-Black. Total carbon, organic carbon and organic matter. *Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. Page et al. (Eds.). *Am. Soc. Agron. Madison, WI*, pp. 539-577.

- Oceanic Niño Index. National weather service. NOAA. Última visita Junio 2014.
www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
- Passioura, J., 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell and Environment* 25:311-318.
- Pecorari, C. y Balcaza, L., 1988. Influencia de los horizontes B2 sobre el consumo de las reservas de agua útil en los suelos del área maicera típica. Informe técnico nº 215, INTA EEA Pergamino, Buenos Aires.
- Pecorari, C.; Balcaza, L. y Frutos, E., 1988. Relaciones empíricas entre el contenido de agua, textura y materia orgánica en suelos representativos de la Pampa Ondulada. Informe técnico nº 222, INTA EEA Pergamino, Buenos Aires.
- Purcell, L. y Specht, J., 2004. Physiological traits for ameliorating drought stress. In Boerma, H.R., Specht, J.E. (Eds.), *Soybeans: Improvement, production and uses*. Am. Soc. Agronomy, Madison, WI. pp. 569-620.
- Rawls, W., Brakensiek, D., y Saxton, K., 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE* 25:1316-1328.
- Rawls, W. y Brakensiek, D., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones, E.B. and Ward, T.J. (Eds.), *Proc. Symp. Watershed Management in the Eighties*. April 30-May 1, 1985, Denver, CO. Am. Soc. Civil Eng., New York, pp. 293-299.
- Ritchie, J., 1981. Soil water availability. *Plant soil* 58:327-338.
- Ritchie, J., Godwin, D. y Singh, U., 1989. Soil and Water inputs for IBSNAT crop models. In DSSAT, IBSNAT Symposium. Part I. Las Vegas, Nevada, pp. 31-47.
- Saxton K. y Rawls W., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70:1569-1578.
- SAGyP y CFA (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca y Consejo Federal Agropecuario), 1995. El deterioro de las tierras en la República Argentina. Alerta amarillo.
- SIIA, (Sistema integrado de información agropecuaria) 2013. Sitio web: old.siiia.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura. Última visita Diciembre 2013.
- Soil Taxonomy, 2006. Décima edición. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales.
- Tardieu, F., 1988. Analysis of the spatial variability of maize root density: I. Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant and Soil* 107:259-266.
- Timlin, D.; Pachepsky, Y.; Acock, B. y Whisler, F., 1996. Indirect estimation of soil hydraulic properties to predict soybean yield using GLYCIM. *Agricultural Systems* 52:331-353.
- USDA-SCS, 1968. A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watershed Scs.149.
- Wang, F., Fraise, C., Kitchen, N. y Sudduth, K., 2003. Site-specific evaluation of the CROPGRO-soybean model on Missouri claypan soils. *Agric. Syst.* 76:985-1005.

ANEXO I

Serie Junín (INTA, 1980): Es un suelo profundo y oscuro con aptitud agrícola que se encuentra en un paisaje ondulado, ocupando los sitios de lomas de la Subregión Pampa Arenosa, bien a algo excesivamente drenado, relativamente joven con escaso desarrollo, habiendo evolucionado sobre un sedimento eólico franco arenoso, no alcalino, no salino con pendiente predominante de 0-1 % (hasta 3 % en pendientes muy cortas).

Clasificación Taxonómica: Hapludol típico, limosa gruesa; mixta, térmica (Soil Taxonomy V. 2006).

Descripción del perfil típico: N°RP 12/997 C. Fecha de extracción muestras, noviembre de 1962

Ap	0-16 cm; pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; pardo grisáceo a pardo grisáceo oscuro (10YR 4.5/2) en seco; franco arenoso; bloques subangulares finos moderados que rompe a granular; friable; ligeramente plástico, no adhesivo; límite inferior abrupto, suave.
A	16-30 cm; pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco; franco arenoso; bloques subangulares medios moderados que rompe a bloques subangulares; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; límite inferior claro, suave.
Bw	30-70 cm; pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; bloques subangulares medios y gruesos que rompe a bloques finos débiles; friable; ligeramente plástico, no adhesivo; escasos barnices ("clay skins") finos; límite inferior claro, suave.
BC	70-126 cm; pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo; pardo amarillento (10YR 5/4) en seco; franco arenoso; bloques subangulares medios y gruesos débiles que rompe a masivo y en grano simple; muy friable; no plástico, no adhesivo; límite inferior gradual, suave.
C	126-150 cm; pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo; pardo amarillento claro (10YR 6/4) en seco; franco arenoso; bloques subangulares medios y gruesos débiles que rompe a grano simple; ligeramente duro en seco; muy friable a suelto en húmedo; no plástico, no adhesivo.

Observaciones: Nivel freático profundo. Formaciones especiales de krotovinas en el Bw. Factor de humedad en Ap (1.03); A (1.03); Bw (1.05); BC (1.03); C (1.03).

Ubicación del Perfil: Latitud: S 34° 31' 45". Longitud: W 61° 50' 00". Altitud: 86 m.s.n.m. a 7,8 km. al noroeste de la Estación de ferrocarril (F.C.D.F.S.) Saforcada, partido Junín, provincia de Buenos Aires; hoja I.G.M. 3560-7-4, Gral. Arenales.

Variabilidad de las características: La textura del A, franco y franco limoso, 13-22 % de arcilla; A más corto; el Bw, 25-40 cm; el C, franco (8 % de arcilla y 50 % de limos) a franco arenoso (14% de arcilla y 22 % de limos).

Fases: Ligeramente inclinada.

Series Similares: Fortín Tiburcio, Santa Isabel, Teodelina.

Suelos Asociados: La Oriental, Fortín Tiburcio.

Distribución geográfica: Partido de Junín y General Arenales.

Drenaje y permeabilidad: Bien a algo excesivamente drenado con un escurrimiento medio a rápido y permeabilidad moderadamente rápida.

Capacidad de uso: III es

Limitaciones de uso: Leve susceptibilidad a la erosión eólica (A decapitado en sectores), retención de humedad en sequías prolongadas.

Índice de productividad según la región climática: 62 (A).

Rasgos Diagnósticos: Epipedón mólico (30 cm), régimen údico, horizonte cámbico (rel. arc. B/A = 0.89), un Value de 2 o menos, Hue 10YR y Chroma de 2 ó menos.

Datos analíticos:

Horizontes	Ap	A	Bw	BC	C
Profundidad (cm)	0-16	16-30	30-70	70-126	126-150
Mat. orgánica (%)	1,98	1,77	1,56	0,27	0,17
Carbono total (%)	1,15	1,03	0,91	0,16	0,10
Nitrógeno (%)	0,113	0,103	0,092	NA	NA
Relación C/N	10	10	10	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	15,2	16,3	16,3	11,8	11,3
Limo 2-20 μ (%)	-	-	-	-	-
Limo 2-50 μ (%)	26,3	25,0	24,4	21,6	21,5
AMF 50-75 μ (%)	-	-	-	-	-
AMF 75-100 μ (%)	-	-	-	-	-
AMF 50-100 μ (%)	53,3	53,1	54,1	60,5	59,9
AF 100-250 μ (%)	5,2	5,6	5,2	6,1	7,3
AM 250-500 μ (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AG 500-1000 μ (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AMG 1-2 mm (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calcáreo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Eq.humedad (%)	14,4	14,4	14,1	12,1	10,4
Re. pasta Ohms	-	-	-	-	-
Cond. mmhos/cm	-	-	-	-	-
pH en pasta	5,6	5,9	6,2	6,5	6,8
pH H ₂ O 1:2,5	6,1	6,4	7,3	7,5	7,9
CATIONES DE CAMBIO					
Ca++ m.eq./100gr	9,2	9,9	9,0	8,4	6,6
Mg++ m.eq./100gr	1,7	1,5	2,2	2,5	3,6
Na+ m.eq./100gr	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
K m.eq./100gr	1,2	1,3	0,6	0,6	0,8
H m.eq./100gr	4,5	4,7	2,7	1,9	1,6
Na (% de T)	2,8	3,3	3,9	4,2	4,6
V.S m.eq./100gr	12,6	13,6	12,1	12,2	11,6
CIC m.eq./100gr	14,2	14,8	12,6	11,7	10,8
Sat. con bases (%)	88	92	96	100	100
NA: No analizado					

Serie Pergamino (INTA, 1972): La serie Pergamino es un suelo oscuro, muy profundo y bien drenado formado sobre sedimentos loésicos franco limosos gruesos. Se encuentra en un paisaje de lomas y pendientes con gradiente de 0 a 3 % en la Región Pampa Ondulada.

Clasificación taxonómica: Argiudol típico, Fina, illítica, térmica (Soil Taxonomy 2006).

Descripción del perfil típico: 7/334 C. Fecha de extracción de muestras: mayo de 1966.

Ap1	0-13 cm; pardo grisáceo (10YR 5/2) en seco; pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; franco limoso; bloques subangulares finos que rompe en granular; friable; límite inferior claro suave.
Ap2	13-25 cm; gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; franco limoso; bloques angulares medios fuertes; firme; límite abrupto suave. (El espesor del A varía entre 23 y 36 cm. de espesor).
BAt	25-34 cm; pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; franco arcillo limoso; bloques subangulares medios débiles; friable; barnices arcillosos escasos; límite abrupto suave. (5 a 10 cm.).
Bt1	34-75 cm; pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; arcillo limoso; prismas gruesos fuertes que rompe en bloques angulares medios; firme; barnices arcillosos abundantes; límite inferior claro suave.
Bt2	75-95 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/2) en húmedo; franco arcillo limoso; bloques subangulares medios moderados; friable; barnices arcillosos abundantes; límite gradual suave. (El espesor varía entre 50 y 70 cm.).
BC	95-160 cm; pardo (7,5YR 5/4) en húmedo; franco limoso; bloques subangulares medios débiles; friable; barnices arcillosos escasos; límite claro suave. (45 a 65 cm.).
Ck	160-200 cm; pardo (7,5YR 5/4) en húmedo; franco limoso; masivo; escasos carbonatos libres en la masa; concreciones calcáreas abundantes.

Ubicación del perfil: Latitud: S 33° 51' 50". Longitud: W 60° 40' 05". Altitud: 76 m.s.n.m. a 10 km. al sudoeste de la localidad de Pergamino, partido de Pergamino, provincia Buenos Aires; hoja I.G.M. 3360-32-4, Pergamino.

Variabilidad de las características: A los 180 cm. el material subyacente puede contener más calcáreo que el superior. El A generalmente es franco limoso pero en algunos perfiles puede ser franco arcillo limoso con 22 a 38 % de arcilla. El Bt1 es arcillo limoso o franco arcillo limoso con 36 a 46 % de arcilla. El C tiene entre 12 y 15 % de arcilla y entre 65 y 75 % de limos.

Fases: Se reconocieron en diversos grados y están descriptas en las unidades cartográficas de la hoja, por erosión, pendiente, drenaje y anegamiento.

Series similares: Mercedes, Arroyo Dulce, Capilla del Señor y Juncal.

Distribución geográfica: Se encuentra en el paisaje de lomas y pendientes de la Región Pampa Ondulada que desde el centro del partido de Pergamino se extiende

hasta el extremo sur del departamento San Lorenzo, en la provincia de Santa Fe. Se distribuye en las hojas 3360-33, 3560-2, 3360-32.

Drenaje y permeabilidad: Bien drenado, escurrimiento medio, permeabilidad moderada.

Capacidad de uso: I-1

Limitaciones de uso: Bt fuertemente textural.

Índice de productividad según la región climática: 85,50 (A)

Rasgos diagnósticos: Epipedón mólico, régimen de humedad údico, horizonte argílico.

Datos analíticos:

Horizontes	Ap1	Ap2	BAt	Bt1	Bt2	BC	Ck
Profundidad (cm)	0-13	13-25	25-34	34-75	75-95	95-160	160-200
Mat. orgánica (%)	2,91	2,55	1,50	1,10	0,60	0,41	0,26
Carbono total (%)	1,69	1,48	0,87	0,64	0,35	0,24	0,15
Nitrógeno (%)	0,158	0,143	0,106	0,090	0,061	0,039	0,024
Relación C/N	11	10	8	7	NA	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	22,7	22,8	30,3	43,5	30,2	17,0	7,0
Limo 2-20 μ (%)	-	-	-	-	-	-	-
Limo 2-50 μ (%)	64,8	65,1	56,8	47,5	56,4	65,5	69,9
AMF 50-75 μ (%)	-	-	-	-	-	-	-
AMF 75-100 μ (%)	-	-	-	-	-	-	-
AMF 50-100 μ (%)	11,3	11,7	11,9	8,6	12,6	14,3	15,7
AF 100-250 μ (%)	1,2	0,4	1,0	0,4	0,8	3,2	7,4
AM 250-500 μ (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AG 500-1000 μ (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AMG 1-2 mm (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calcáreo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Eq.humedad (%)	25,5	24,7	27,3	37,7	31,3	27,6	27,3
Re.pasta.Ohms	-	-	-	-	-	-	-
Cond. mmhos/cm	-	-	-	-	-	-	-
pH en pasta	5,5	5,6	5,7	5,7	6,0	6,0	6,8
pH H ₂ O 1:2,5	5,9	6,1	6,2	6,3	6,5	6,4	7,3
pH KCL 1:2,5	-	-	-	-	-	-	-
CATIONES DE CAMBIO							
Ca++ m.eq./100gr	12,5	12,9	11,8	19,3	16,2	14,9	18,1
Mg++ m.eq./100gr	3,1	3,3	3,5	5,8	6,3	5,3	3,9
Na+ m.eq./100gr	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6
K m.eq./100gr	1,6	1,2	1,2	2,4	2,2	2,2	2,0
H m.eq./100gr	7,8	6,8	5,8	6,0	5,4	4,8	3,5
Na (% de T)	3	2	3	2	2	2	2
V.S m.eq./100gr	17,8	17,9	17,1	28,1	25,3	22,9	24,6
CIC m.eq./100gr	21,1	20,3	18,6	32,0	27,2	24,1	25,3
Sat.con bases (%)	84	88	92	88	93	95	97
NA: No analizado							

Serie Ramallo (INTA, 1978): Es un suelo profundo, de aptitud agrícola, se encuentra en un paisaje de planicies altas, en posición de loma, en la Subregión Pampa Ondulada alta, moderadamente bien drenado, con material originario loésico, franco limoso, no alcalino, no sódico, con pendientes que no superan el 0.5 %.

Clasificación taxonómica: Argiudol vértico, Fina, illítica, térmica (Soil Taxonomy V. 2006).

Descripción del perfil típico: N° 6/358C. Extracción de muestra: año 1967.

Ap	0-13 cm; pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco; pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; franco arcillo limoso; bloques subangulares finos débiles; duro; friable; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; límite inferior claro, suave.
A	13-27 cm; pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco; pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; franco arcillo limoso; bloques subangulares finos, débiles; duro; friable; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; límite inferior claro, suave.
AB	27-40 cm; pardo (7,5YR 5/2) en seco; pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; franco arcillo limoso; bloques subangulares medios moderados; firme; plástico; adhesivo; barnices ("clay skins") escasos; límite inferior abrupto, suave.
Btss	40-76 cm; pardo (7,5YR 5/2) en seco; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/2) en húmedo; arcilloso; en prismas gruesos fuertes; muy firme; muy plástico; adhesivo; barnices ("clay skins") muy abundantes; "slickensides" abundantes; límite inferior claro, suave.
Bt	76-131 cm; pardo claro (7,5YR 6/4) en seco; pardo (7,5YR 5/2) en húmedo; arcillo limoso; prismas gruesos moderados; muy firme; muy plástico; adhesivo; barnices ("clay skins") abundantes; "slickensides" escasos; límite inferior gradual, suave.
BC	131-198 cm; pardo claro (7,5YR 6/4) en seco; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo; franco arcillo limoso; bloques angulares medios moderados; firme; plástico; adhesivo; barnices ("clay skins") escasos; límite inferior gradual, ondulado.
C	198-220 cm; pardo claro a rosado (7,5YR 6,5/4) en seco; pardo (7,5YR 5/4) en húmedo; franco limoso; masivo; friable; concreciones calcáreas abundantes; escasa cantidad de carbonatos libres en la masa.

Ubicación del perfil: Latitud: S 33° 40' 50" y Longitud: W 60° 03' 10". Altitud: 48 m.s.n.m. a 11 km. al nor-noroeste de Pérez Millán, partido de Ramallo, provincia de Buenos Aires; hojas I.G.M. 3360-33 y 3360-32.

Variabilidad de las características: el A varía entre 25 y 32 cm. El Bt tiene entre 50 a 92 cm. de espesor, con texturas arcillo limosas, con valores de arcilla que varía entre 45 a 60 %, el BC puede tener concreciones calcáreas.

Fases: Se han reconocido en diversos grados, por drenaje, erosión y por espesor.

Series similares: Peyrano.

Suelos asociados: Santa Lucía, Manantiales, Atucha y Roldán.

Distribución geográfica: Partidos de Ramallo, San Nicolás, Nordeste de Pergamino y San Pedro, en la provincia de Buenos Aires. Hojas I.G.M. 3360-33- 1 y 2, 3360-34-1 y 3360-27 y 28.

Drenaje y permeabilidad: Moderadamente bien drenado, escurrimiento medio, permeabilidad moderadamente lenta.

Capacidad de uso: II w.

Limitaciones de uso: Drenaje impedido.

Índice de productividad según la región climática: 65 (A), 62 (B).

Rasgos diagnósticos: Régimen de humedad údico, epipedón mólico, horizonte argílico con características vérticas (incremento de la fracción arcilla de más del 20 % dentro de 7,5 cm. de profundidad).

Datos analíticos:

Horizontes	Ap	A	AB	Btss	Bt	BC	C
Profundidad (cm)	0-13	13-27	27-40	40-76	76-131	131-198	198-220
Mat. orgánica (%)	4,27	2,93	1,70	1,31	0,58	0,36	0,13
Carbono total (%)	2,48	1,70	0,99	0,76	0,34	0,21	0,08
Nitrógeno (%)	0,235	0,165	0,095	0,073	0,041	NA	NA
Relación C/N	10	10	10	10	8	NA	NA
Fósforo (PPM)	-	-	-	-	-	-	-
Arcilla < 2 µ (%)	28,9	31,7	34,1	56,5	40,3	38,5	26,2
Limo 2-20 µ (%)	-	-	-	-	-	-	-
Limo 2-50 µ (%)	66,4	64,2	61,4	39,6	55,3	56,7	66,4
AMF 50-75 µ (%)	-	-	-	-	-	-	-
AMF 75-100 µ (%)	-	-	-	-	-	-	-
AMF 50-100 µ (%)	4,3	3,7	4,1	3,7	3,9	4,4	4,4
AF 100-250 µ (%)	0,4	0,4	0,4	0,2	0,5	0,4	0,5
AM 250-500 µ (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AG 500-1000 µ (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AMG 1-2 mm (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Calcáreo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Eq.humedad (%)	30,3	31,3	29,5	45,5	34,5	35,5	32,3
Re.pasta.Ohms	-	-	-	-	-	-	-
Cond. mmhos/cm	-	-	-	-	-	-	-
pH en pasta	5,5	5,5	5,6	5,9	6,3	6,6	7,6
pH H ₂ O 1:2,5	5,9	6,3	6,4	6,9	7,4	7,4	8,3
pH KCL 1:2,5	-	-	-	-	-	-	-
CATIONES DE CAMBIO							
Ca ⁺⁺ m.eq./100gr	14,9	15,6	14,8	26,5	20,9	25,4	NA
Mg ⁺⁺ m.eq./100gr	3,0	3,4	3,2	6,2	4,4	5,0	NA
Na ⁺ m.eq./100gr	0,4	0,4	0,6	0,8	0,8	0,8	NA
K m.eq./100gr	1,8	1,5	1,2	2,0	1,9	2,2	NA
H m.eq./100gr	9,3	7,9	6,0	7,6	4,2	4,8	NA
Na (% de T)	1,6	1,5	2,6	2,0	2,7	2,3	NA
V.S m.eq./100gr	20,1	20,9	19,8	35,5	28,0	33,4	NA
CIC m.eq./100gr	24,4	25,1	23,1	38,5	28,7	34,2	27,6
Sat.con bases (%)	82	83	86	92	98	98	NA
NA: No analizado							

ANEXO II

Humedad volumétrica. Estadísticas descriptivas.

Profundidad (cm)	Estadio	Junín 2009-2010							Junín 2010-2011						
		n	Media	Mín	Máx	D.E.	E.E.	CV	n	Media	Mín	Máx	D.E.	E.E.	CV
0-10 cm	S	5	0,209	0,197	0,215	0,012	0,005	4,4	5	0,203	0,196	0,214	0,008	0,004	4,1
10-20 cm	S	5	0,221	0,208	0,229	0,011	0,005	4,0	5	0,225	0,218	0,233	0,007	0,003	3,1
20-30 cm	S	5	0,214	0,204	0,220	0,009	0,004	3,0	5	0,256	0,245	0,263	0,008	0,004	3,3
30-40 cm	S	5	0,199	0,192	0,210	0,011	0,005	3,8	5	0,253	0,245	0,266	0,010	0,004	3,9
40-50 cm	S	5	0,200	0,190	0,217	0,017	0,008	5,7	5	0,261	0,253	0,269	0,007	0,003	2,6
50-60 cm	S	5	0,202	0,193	0,213	0,011	0,005	3,7	5	0,247	0,240	0,255	0,007	0,003	2,8
60-70 cm	S	5	0,200	0,189	0,221	0,016	0,007	6,1	5	0,229	0,222	0,236	0,007	0,003	2,9
70-80 cm	S	5	0,195	0,187	0,203	0,008	0,004	3,4	5	0,219	0,213	0,226	0,006	0,003	2,6
80-90 cm	S	5	0,194	0,184	0,203	0,008	0,004	3,5	5	0,206	0,200	0,212	0,006	0,003	2,8
90-100 cm	S	5	0,190	0,179	0,207	0,012	0,005	5,7	5	0,195	0,189	0,201	0,005	0,002	2,5
100-110 cm	S	5	0,188	0,186	0,191	0,002	0,001	1,0	5	0,193	0,187	0,199	0,005	0,002	2,8
110-120 cm	S	5	0,187	0,184	0,190	0,002	0,001	1,2	5	0,186	0,180	0,191	0,005	0,002	2,6
120-130 cm	S	5	0,176	0,173	0,180	0,004	0,002	2,1	5	0,175	0,168	0,181	0,006	0,003	3,4
130-140 cm	S	5	0,176	0,175	0,178	0,002	0,001	0,9	5	0,179	0,171	0,185	0,006	0,003	3,6
140-150 cm	S	5	0,174	0,171	0,178	0,003	0,001	1,6	5	0,172	0,167	0,179	0,006	0,003	3,3
150-160 cm	S	5	0,173	0,171	0,175	0,002	0,001	1,1	5	0,173	0,166	0,180	0,006	0,003	3,5
160-170 cm	S	5	0,170	0,169	0,172	0,002	0,001	1,0	5	0,173	0,168	0,179	0,004	0,002	2,3
170-180 cm	S	5	0,164	0,160	0,166	0,003	0,001	1,8	5	0,171	0,165	0,176	0,005	0,002	2,9
180-190 cm	S	5	0,165	0,161	0,170	0,004	0,002	2,2	5	0,167	0,162	0,172	0,004	0,002	2,4
190-200 cm	S	5	0,166	0,159	0,171	0,005	0,002	2,9	5	0,164	0,159	0,169	0,004	0,002	2,5
0-10 cm	R1	5	0,226	0,204	0,253	0,020	0,009	8,9	5	0,238	0,226	0,269	0,019	0,008	7,8
10-20 cm	R1	5	0,258	0,234	0,294	0,025	0,011	9,8	5	0,270	0,204	0,291	0,037	0,017	13,7
20-30 cm	R1	5	0,301	0,276	0,322	0,017	0,008	5,6	5	0,302	0,293	0,311	0,006	0,003	1,9
30-40 cm	R1	5	0,303	0,290	0,314	0,009	0,004	3,0	5	0,299	0,288	0,305	0,007	0,003	2,4
40-50 cm	R1	5	0,297	0,291	0,300	0,004	0,002	1,2	5	0,303	0,284	0,328	0,017	0,008	5,6
50-60 cm	R1	5	0,272	0,266	0,281	0,006	0,003	2,3	5	0,270	0,240	0,315	0,031	0,014	11,3
60-70 cm	R1	5	0,228	0,203	0,249	0,017	0,007	7,3	5	0,217	0,166	0,292	0,048	0,022	22,2
70-80 cm	R1	5	0,205	0,195	0,217	0,008	0,004	4,0	5	0,196	0,154	0,265	0,044	0,020	22,2
80-90 cm	R1	5	0,185	0,174	0,210	0,015	0,007	7,9	5	0,185	0,167	0,230	0,026	0,012	13,8
90-100 cm	R1	5	0,175	0,162	0,189	0,010	0,004	5,5	5	0,164	0,154	0,175	0,008	0,004	4,7
100-110 cm	R1	5	0,175	0,170	0,181	0,004	0,002	2,3	5	0,162	0,155	0,168	0,005	0,002	3,1
110-120 cm	R1	5	0,178	0,175	0,181	0,002	0,001	1,2	5	0,165	0,157	0,170	0,005	0,002	3,1
120-130 cm	R1	5	0,172	0,167	0,177	0,004	0,002	2,5	5	0,161	0,158	0,166	0,003	0,002	2,1
130-140 cm	R1	5	0,179	0,178	0,181	0,001	0,001	0,6	5	0,160	0,156	0,164	0,003	0,001	1,8
140-150 cm	R1	5	0,182	0,178	0,188	0,004	0,002	2,1	5	0,168	0,163	0,173	0,004	0,002	2,4
150-160 cm	R1	5	0,182	0,179	0,185	0,002	0,001	1,3	5	0,169	0,161	0,172	0,004	0,002	2,6
160-170 cm	R1	5	0,184	0,175	0,190	0,006	0,003	3,2	5	0,166	0,161	0,169	0,003	0,002	2,0
170-180 cm	R1	5	0,180	0,171	0,185	0,005	0,002	3,0	5	0,164	0,156	0,170	0,005	0,002	3,1
180-190 cm	R1	5	0,179	0,167	0,191	0,009	0,004	4,8	5	0,163	0,157	0,172	0,006	0,003	3,6
190-200 cm	R1	5	0,179	0,169	0,191	0,008	0,004	4,6	5	0,157	0,154	0,163	0,003	0,002	2,2
0-10 cm	R5	5	0,252	0,244	0,259	0,008	0,004	2,3	5	0,257	0,221	0,290	0,025	0,011	9,7
10-20 cm	R5	5	0,253	0,246	0,260	0,008	0,004	2,3	5	0,291	0,270	0,313	0,016	0,007	5,6
20-30 cm	R5	5	0,253	0,245	0,261	0,008	0,004	2,3	5	0,300	0,270	0,320	0,021	0,010	7,1
30-40 cm	R5	5	0,229	0,221	0,244	0,016	0,007	4,5	5	0,277	0,246	0,294	0,019	0,009	6,9
40-50 cm	R5	5	0,229	0,220	0,245	0,019	0,008	4,9	5	0,278	0,243	0,300	0,024	0,011	8,7
50-60 cm	R5	5	0,216	0,203	0,241	0,027	0,012	7,4	5	0,256	0,215	0,298	0,030	0,014	11,8
60-70 cm	R5	5	0,213	0,204	0,220	0,010	0,005	3,4	5	0,208	0,171	0,251	0,029	0,013	13,8
70-80 cm	R5	5	0,204	0,198	0,210	0,007	0,003	2,4	5	0,177	0,155	0,230	0,031	0,014	17,6

80-90 cm	R5	5	0,191	0,185	0,196	0,007	0,003	2,6	5	0,158	0,137	0,195	0,027	0,012	16,9
90-100 cm	R5	5	0,184	0,178	0,191	0,008	0,004	3,2	5	0,138	0,131	0,153	0,009	0,004	6,5
100-110 cm	R5	5	0,179	0,174	0,185	0,006	0,003	2,8	5	0,133	0,130	0,136	0,002	0,001	1,8
110-120 cm	R5	5	0,161	0,138	0,197	0,024	0,011	14,1	5	0,133	0,126	0,139	0,005	0,002	3,6
120-130 cm	R5	5	0,151	0,141	0,171	0,010	0,005	8,4	5	0,125	0,118	0,130	0,005	0,002	3,6
130-140 cm	R5	5	0,132	0,127	0,142	0,005	0,002	4,7	5	0,127	0,120	0,134	0,006	0,003	4,5
140-150 cm	R5	5	0,120	0,116	0,123	0,003	0,002	2,9	5	0,126	0,123	0,130	0,003	0,001	2,0
150-160 cm	R5	5	0,118	0,115	0,122	0,003	0,001	2,6	5	0,123	0,116	0,127	0,004	0,002	3,5
160-170 cm	R5	5	0,113	0,110	0,117	0,003	0,001	2,8	5	0,125	0,113	0,140	0,010	0,005	8,1
170-180 cm	R5	5	0,114	0,107	0,126	0,008	0,004	6,9	5	0,122	0,110	0,138	0,011	0,005	9,3
180-190 cm	R5	5	0,124	0,118	0,130	0,005	0,002	4,1	5	0,126	0,117	0,136	0,007	0,003	5,6
190-200 cm	R5	5	0,125	0,121	0,129	0,004	0,002	2,9	5	0,135	0,132	0,139	0,003	0,001	2,3
0-10 cm	R7	5	0,252	0,242	0,263	0,012	0,005	3,8	5	0,238	0,210	0,272	0,022	0,010	9,3
10-20 cm	R7	5	0,257	0,249	0,260	0,006	0,003	1,7	5	0,255	0,222	0,292	0,025	0,011	9,9
20-30 cm	R7	5	0,260	0,246	0,268	0,013	0,006	4,0	5	0,250	0,214	0,309	0,036	0,016	14,3
30-40 cm	R7	5	0,242	0,230	0,261	0,018	0,008	5,4	5	0,222	0,187	0,291	0,041	0,018	18,4
40-50 cm	R7	5	0,231	0,217	0,253	0,021	0,009	6,1	5	0,228	0,200	0,298	0,041	0,018	17,9
50-60 cm	R7	5	0,224	0,214	0,236	0,013	0,006	4,2	5	0,209	0,173	0,278	0,041	0,019	19,8
60-70 cm	R7	5	0,218	0,210	0,228	0,010	0,005	3,7	5	0,185	0,157	0,241	0,034	0,015	18,2
70-80 cm	R7	5	0,209	0,195	0,224	0,014	0,006	5,3	5	0,168	0,152	0,209	0,024	0,011	14,0
80-90 cm	R7	5	0,204	0,189	0,220	0,013	0,006	5,8	5	0,155	0,146	0,182	0,015	0,007	9,9
90-100 cm	R7	5	0,196	0,184	0,210	0,011	0,005	5,2	5	0,145	0,139	0,155	0,006	0,003	4,2
100-110 cm	R7	5	0,184	0,164	0,206	0,014	0,006	8,3	5	0,140	0,137	0,143	0,002	0,001	1,6
110-120 cm	R7	5	0,157	0,130	0,186	0,019	0,009	12,6	5	0,138	0,135	0,139	0,002	0,001	1,2
120-130 cm	R7	5	0,134	0,115	0,154	0,014	0,006	10,5	5	0,131	0,130	0,132	0,001	0,000	0,6
130-140 cm	R7	5	0,124	0,111	0,138	0,010	0,005	8,0	5	0,127	0,122	0,130	0,003	0,002	2,7
140-150 cm	R7	5	0,121	0,111	0,132	0,008	0,004	6,5	5	0,125	0,117	0,129	0,005	0,002	3,9
150-160 cm	R7	5	0,119	0,113	0,126	0,005	0,002	4,4	5	0,124	0,112	0,132	0,008	0,003	6,1
160-170 cm	R7	5	0,122	0,119	0,126	0,003	0,002	2,7	5	0,122	0,110	0,132	0,008	0,004	6,5
170-180 cm	R7	5	0,127	0,123	0,131	0,004	0,002	3,0	5	0,118	0,112	0,125	0,005	0,002	3,9
180-190 cm	R7	5	0,127	0,123	0,131	0,004	0,002	3,0	5	0,115	0,113	0,118	0,002	0,001	1,6
190-200 cm	R7	5	0,132	0,128	0,136	0,003	0,001	2,2	5	0,115	0,112	0,118	0,002	0,001	1,9

Profundidad (cm)	Estadio	Pergamino 2009-2010							Pergamino 2010-2011						
		n	Media	Min	Máx	D.E.	E.E.	CV	n	Media	Min	Máx	D.E.	E.E.	CV
0-10 cm	S	5	0,282	0,263	0,321	0,023	0,01	8,3	5	0,212	0,198	0,233	0,013	0,006	6,3
10-20 cm	S	5	0,279	0,248	0,294	0,018	0,008	6,5	5	0,232	0,23	0,234	0,002	0,001	0,8
20-30 cm	S	5	0,336	0,298	0,356	0,024	0,011	7,3	5	0,27	0,261	0,284	0,009	0,004	3,2
30-40 cm	S	5	0,371	0,353	0,395	0,022	0,01	5,8	5	0,345	0,319	0,377	0,022	0,01	6,4
40-50 cm	S	5	0,382	0,365	0,4	0,016	0,007	4,2	5	0,365	0,328	0,381	0,022	0,01	5,9
50-60 cm	S	5	0,373	0,35	0,387	0,017	0,008	4,7	5	0,352	0,32	0,365	0,018	0,008	5,2
60-70 cm	S	5	0,368	0,356	0,375	0,007	0,003	2	5	0,327	0,306	0,348	0,017	0,007	5,1
70-80 cm	S	5	0,342	0,332	0,354	0,008	0,004	2,3	5	0,306	0,286	0,323	0,013	0,006	4,3
80-90 cm	S	5	0,307	0,283	0,347	0,024	0,011	7,8	5	0,289	0,27	0,31	0,014	0,006	4,9
90-100 cm	S	5	0,276	0,256	0,317	0,024	0,011	8,7	5	0,26	0,242	0,301	0,024	0,011	9,3
100-110 cm	S	5	0,269	0,257	0,295	0,016	0,007	5,8	5	0,244	0,213	0,29	0,029	0,013	11,8
110-120 cm	S	5	0,254	0,248	0,261	0,005	0,002	2,2	5	0,228	0,202	0,255	0,022	0,01	9,5
120-130 cm	S	5	0,254	0,251	0,258	0,003	0,001	1	5	0,225	0,218	0,233	0,006	0,003	2,4
130-140 cm	S	5	0,253	0,239	0,271	0,012	0,005	4,6	5	0,233	0,224	0,247	0,01	0,004	4,1
140-150 cm	S	5	0,250	0,238	0,261	0,009	0,004	3,7	5	0,229	0,213	0,238	0,01	0,004	4,3
150-160 cm	S	5	0,233	0,223	0,238	0,006	0,003	2,5	5	0,218	0,213	0,224	0,004	0,002	1,8
160-170 cm	S	5	0,236	0,226	0,243	0,006	0,003	2,7	5	0,219	0,215	0,222	0,003	0,001	1,4
170-180 cm	S	5	0,251	0,236	0,266	0,011	0,005	4,3	5	0,231	0,222	0,243	0,009	0,004	3,7
180-190 cm	S	5	0,274	0,248	0,291	0,017	0,008	6,3	5	0,241	0,214	0,265	0,019	0,008	7,8
190-200 cm	S	5	0,278	0,262	0,291	0,012	0,005	4,3	5	0,281	0,246	0,312	0,024	0,011	8,6
0-10 cm	R1	5	0,234	0,224	0,248	0,01	0,005	4,3	5	0,31	0,287	0,333	0,02	0,009	6,4
10-20 cm	R1	5	0,277	0,269	0,285	0,006	0,003	2,3	5	0,248	0,229	0,254	0,011	0,005	4,3
20-30 cm	R1	5	0,340	0,327	0,355	0,012	0,006	3,6	5	0,315	0,271	0,344	0,028	0,012	8,8
30-40 cm	R1	5	0,359	0,326	0,389	0,024	0,011	6,6	5	0,37	0,348	0,386	0,016	0,007	4,3
40-50 cm	R1	5	0,389	0,365	0,417	0,02	0,009	5,2	5	0,393	0,371	0,411	0,015	0,007	3,9
50-60 cm	R1	5	0,369	0,349	0,387	0,016	0,007	4,2	5	0,391	0,351	0,416	0,024	0,011	6,1
60-70 cm	R1	5	0,371	0,36	0,382	0,009	0,004	2,3	5	0,372	0,348	0,386	0,017	0,008	4,6
70-80 cm	R1	5	0,368	0,355	0,391	0,016	0,007	4,3	5	0,363	0,349	0,372	0,008	0,004	2,3
80-90 cm	R1	5	0,336	0,305	0,356	0,02	0,009	6,1	5	0,335	0,325	0,345	0,008	0,004	2,5
90-100 cm	R1	5	0,311	0,287	0,341	0,021	0,009	6,7	5	0,289	0,266	0,319	0,019	0,009	6,7
100-110 cm	R1	5	0,298	0,274	0,339	0,026	0,012	8,7	5	0,273	0,243	0,318	0,028	0,012	10,1
110-120 cm	R1	5	0,273	0,25	0,301	0,019	0,009	7	5	0,255	0,244	0,27	0,01	0,004	3,8
120-130 cm	R1	5	0,286	0,275	0,307	0,014	0,006	5	5	0,252	0,238	0,275	0,014	0,006	5,4
130-140 cm	R1	5	0,287	0,277	0,302	0,011	0,005	3,9	5	0,265	0,243	0,288	0,022	0,01	8,3
140-150 cm	R1	5	0,292	0,283	0,301	0,009	0,004	2,9	5	0,269	0,236	0,302	0,024	0,011	9
150-160 cm	R1	5	0,286	0,27	0,295	0,012	0,005	4,1	5	0,269	0,234	0,311	0,028	0,012	10,2
160-170 cm	R1	5	0,294	0,261	0,321	0,022	0,01	7,6	5	0,262	0,211	0,297	0,032	0,014	12,2
170-180 cm	R1	5	0,316	0,277	0,342	0,025	0,011	8	5	0,266	0,215	0,314	0,038	0,017	14,4
180-190 cm	R1	5	0,329	0,277	0,373	0,035	0,016	10,7	5	0,282	0,25	0,314	0,023	0,011	8,3
190-200 cm	R1	5	0,339	0,275	0,382	0,041	0,018	12	5	0,299	0,23	0,334	0,043	0,019	14,3
0-10 cm	R5	5	0,255	0,248	0,263	0,007	0,003	2,7	5	0,295	0,269	0,369	0,042	0,019	14,2
10-20 cm	R5	5	0,273	0,265	0,281	0,007	0,003	2,7	5	0,268	0,254	0,285	0,012	0,005	4,4
20-30 cm	R5	5	0,330	0,321	0,34	0,007	0,003	2,3	5	0,352	0,31	0,383	0,029	0,013	8,1
30-40 cm	R5	5	0,388	0,371	0,406	0,015	0,007	3,8	5	0,368	0,357	0,375	0,007	0,003	1,9
40-50 cm	R5	5	0,376	0,365	0,388	0,012	0,005	3,1	5	0,34	0,334	0,345	0,005	0,002	1,5
50-60 cm	R5	5	0,354	0,341	0,37	0,013	0,006	3,6	5	0,311	0,308	0,315	0,003	0,001	1
60-70 cm	R5	5	0,332	0,303	0,365	0,023	0,01	7	5	0,283	0,273	0,3	0,012	0,005	4,3
70-80 cm	R5	5	0,319	0,294	0,349	0,021	0,009	6,5	5	0,247	0,232	0,27	0,016	0,007	6,3
80-90 cm	R5	5	0,302	0,289	0,327	0,016	0,007	5,4	5	0,219	0,2	0,249	0,02	0,009	9,2
90-100 cm	R5	5	0,282	0,274	0,291	0,007	0,003	2,5	5	0,208	0,186	0,242	0,021	0,009	10,1
100-110 cm	R5	5	0,266	0,258	0,275	0,008	0,004	3	5	0,209	0,196	0,241	0,019	0,009	9,3
110-120 cm	R5	5	0,250	0,225	0,265	0,016	0,007	6,5	5	0,192	0,158	0,236	0,028	0,013	14,6
120-130 cm	R5	5	0,255	0,245	0,27	0,011	0,005	4,2	5	0,2	0,167	0,24	0,027	0,012	13,6

130-140 cm	R5	5	0,263	0,255	0,271	0,008	0,003	2,9	5	0,207	0,169	0,245	0,028	0,013	13,7
140-150 cm	R5	5	0,285	0,275	0,293	0,009	0,004	3	5	0,217	0,182	0,255	0,028	0,013	12,9
150-160 cm	R5	5	0,281	0,269	0,292	0,01	0,005	3,6	5	0,223	0,197	0,261	0,025	0,011	11,1
160-170 cm	R5	5	0,294	0,281	0,31	0,012	0,005	4,1	5	0,227	0,204	0,272	0,028	0,013	12,3
170-180 cm	R5	5	0,309	0,287	0,345	0,023	0,01	7,4	5	0,249	0,216	0,31	0,036	0,016	14,6
180-190 cm	R5	5	0,322	0,26	0,385	0,045	0,02	13,9	5	0,259	0,232	0,282	0,018	0,008	7
190-200 cm	R5	5	0,320	0,267	0,367	0,036	0,016	11,3	5	0,266	0,247	0,284	0,014	0,006	5,4
0-10 cm	R7	5	0,177	0,176	0,177	0,001	0	0,3	5	0,255	0,237	0,281	0,018	0,008	6,9
10-20 cm	R7	5	0,211	0,206	0,218	0,004	0,002	2,1	5	0,228	0,207	0,264	0,022	0,01	9,4
20-30 cm	R7	5	0,248	0,241	0,26	0,008	0,003	3,1	5	0,316	0,291	0,336	0,019	0,009	6,1
30-40 cm	R7	5	0,269	0,235	0,331	0,039	0,017	14,4	5	0,363	0,326	0,396	0,027	0,012	7,5
40-50 cm	R7	5	0,300	0,274	0,342	0,026	0,012	8,7	5	0,343	0,317	0,363	0,019	0,009	5,6
50-60 cm	R7	5	0,330	0,294	0,365	0,028	0,013	8,4	5	0,311	0,294	0,321	0,011	0,005	3,6
60-70 cm	R7	5	0,326	0,289	0,341	0,021	0,01	6,6	5	0,272	0,266	0,285	0,008	0,003	2,8
70-80 cm	R7	5	0,300	0,259	0,321	0,024	0,011	8,1	5	0,232	0,212	0,248	0,016	0,007	6,8
80-90 cm	R7	5	0,269	0,213	0,305	0,034	0,015	12,7	5	0,219	0,198	0,242	0,018	0,008	8,3
90-100 cm	R7	5	0,249	0,191	0,299	0,039	0,017	15,4	5	0,21	0,179	0,244	0,024	0,011	11,4
100-110 cm	R7	5	0,234	0,182	0,283	0,036	0,016	15,3	5	0,204	0,169	0,232	0,027	0,012	13,3
110-120 cm	R7	5	0,215	0,176	0,258	0,03	0,013	13,8	5	0,194	0,165	0,226	0,025	0,011	12,7
120-130 cm	R7	5	0,216	0,19	0,25	0,023	0,01	10,5	5	0,22	0,178	0,293	0,047	0,021	21,3
130-140 cm	R7	5	0,222	0,205	0,23	0,01	0,005	4,5	5	0,219	0,184	0,263	0,035	0,016	15,9
140-150 cm	R7	5	0,237	0,211	0,248	0,015	0,007	6,3	5	0,231	0,188	0,301	0,044	0,02	19,2
150-160 cm	R7	5	0,242	0,219	0,256	0,014	0,006	5,7	5	0,218	0,191	0,258	0,025	0,011	11,3
160-170 cm	R7	5	0,250	0,233	0,262	0,011	0,005	4,3	5	0,218	0,205	0,235	0,012	0,005	5,5
170-180 cm	R7	5	0,275	0,248	0,294	0,017	0,008	6,1	5	0,206	0,202	0,21	0,003	0,001	1,4
180-190 cm	R7	5	0,267	0,255	0,279	0,01	0,004	3,6	5	0,224	0,21	0,236	0,009	0,004	4,1
190-200 cm	R7	5	0,289	0,277	0,296	0,008	0,003	2,6	5	0,24	0,227	0,251	0,01	0,004	4

Profundidad (cm)	Estadio	Conesa 2009-2010							Conesa 2010-2011						
		n	Media	Mín	Máx	D.E.	E.E.	CV	n	Media	Mín	Máx	D.E.	E.E.	CV
0-10 cm	S	5	0,250	0,241	0,275	0,016	0,007	5,7	5	0,220	0,200	0,234	0,013	0,006	5,7
10-20 cm	S	5	0,284	0,267	0,307	0,017	0,008	5,6	5	0,280	0,267	0,289	0,008	0,004	2,9
20-30 cm	S	5	0,313	0,304	0,323	0,009	0,004	2,5	5	0,333	0,312	0,341	0,012	0,005	3,6
30-40 cm	S	5	0,353	0,339	0,367	0,011	0,005	3,1	5	0,410	0,397	0,434	0,014	0,006	3,5
40-50 cm	S	5	0,356	0,331	0,376	0,026	0,011	6,3	5	0,521	0,506	0,532	0,010	0,005	2,0
50-60 cm	S	5	0,361	0,334	0,373	0,020	0,009	4,5	5	0,516	0,509	0,524	0,006	0,003	1,1
60-70 cm	S	5	0,368	0,316	0,400	0,043	0,019	9,4	5	0,479	0,469	0,492	0,009	0,004	1,9
70-80 cm	S	5	0,364	0,354	0,379	0,014	0,006	2,9	5	0,446	0,436	0,454	0,007	0,003	1,5
80-90 cm	S	5	0,359	0,344	0,364	0,010	0,005	2,4	5	0,391	0,388	0,395	0,003	0,001	0,8
90-100 cm	S	5	0,351	0,338	0,364	0,013	0,006	3,5	5	0,374	0,368	0,377	0,004	0,002	1,0
100-110 cm	S	5	0,356	0,349	0,364	0,008	0,004	2,1	5	0,371	0,358	0,382	0,009	0,004	2,3
110-120 cm	S	5	0,357	0,349	0,367	0,007	0,003	2,0	5	0,362	0,349	0,375	0,010	0,005	2,8
120-130 cm	S	5	0,362	0,332	0,376	0,018	0,008	4,8	5	0,342	0,320	0,360	0,015	0,007	4,3
130-140 cm	S	5	0,357	0,340	0,369	0,013	0,006	3,6	5	0,333	0,321	0,339	0,007	0,003	2,1
140-150 cm	S	5	0,357	0,344	0,368	0,011	0,005	3,1	5	0,326	0,316	0,336	0,009	0,004	2,8
150-160 cm	S	5	0,353	0,343	0,361	0,008	0,004	2,3	5	0,315	0,297	0,328	0,013	0,006	4,2
160-170 cm	S	5	0,356	0,350	0,359	0,004	0,002	1,0	5	0,333	0,323	0,345	0,010	0,005	3,1
170-180 cm	S	5	0,362	0,356	0,367	0,005	0,002	1,3	5	0,327	0,316	0,339	0,011	0,005	3,3
180-190 cm	S	5	0,366	0,357	0,381	0,009	0,004	2,6	5	0,346	0,336	0,356	0,009	0,004	2,6
190-200 cm	S	5	0,374	0,337	0,413	0,027	0,012	7,2	5	0,330	0,316	0,340	0,011	0,005	3,4
0-10 cm	R1	5	0,298	0,289	0,307	0,008	0,004	2,7	5	0,297	0,263	0,319	0,025	0,011	8,4
10-20 cm	R1	5	0,299	0,279	0,324	0,017	0,008	5,8	5	0,246	0,215	0,264	0,019	0,009	7,9
20-30 cm	R1	5	0,328	0,309	0,339	0,014	0,006	4,2	5	0,245	0,238	0,256	0,007	0,003	2,9
30-40 cm	R1	5	0,346	0,335	0,356	0,008	0,004	2,3	5	0,278	0,250	0,318	0,025	0,011	9,1
40-50 cm	R1	5	0,401	0,361	0,433	0,027	0,012	6,8	5	0,373	0,310	0,408	0,040	0,018	10,7
50-60 cm	R1	5	0,441	0,399	0,465	0,028	0,012	6,2	5	0,417	0,390	0,443	0,021	0,009	5,0
60-70 cm	R1	5	0,439	0,418	0,466	0,020	0,009	4,5	5	0,402	0,388	0,423	0,014	0,006	3,5
70-80 cm	R1	5	0,443	0,429	0,459	0,014	0,006	3,3	5	0,383	0,344	0,417	0,033	0,015	8,6
80-90 cm	R1	5	0,400	0,387	0,412	0,012	0,005	3,0	5	0,345	0,315	0,362	0,020	0,009	5,8
90-100 cm	R1	5	0,369	0,348	0,390	0,017	0,008	4,6	5	0,328	0,307	0,351	0,020	0,009	6,0
100-110 cm	R1	5	0,363	0,335	0,385	0,020	0,009	5,4	5	0,340	0,323	0,356	0,016	0,007	4,6
110-120 cm	R1	5	0,372	0,344	0,392	0,020	0,009	5,3	5	0,354	0,333	0,380	0,021	0,010	6,0
120-130 cm	R1	5	0,382	0,357	0,395	0,017	0,008	4,5	5	0,352	0,341	0,361	0,010	0,004	2,8
130-140 cm	R1	5	0,362	0,340	0,385	0,018	0,008	4,9	5	0,333	0,320	0,354	0,013	0,006	4,0
140-150 cm	R1	5	0,352	0,336	0,369	0,014	0,006	4,0	5	0,323	0,309	0,342	0,014	0,006	4,4
150-160 cm	R1	5	0,345	0,329	0,368	0,016	0,007	4,7	5	0,311	0,291	0,335	0,016	0,007	5,2
160-170 cm	R1	5	0,345	0,334	0,355	0,008	0,003	2,2	5	0,325	0,317	0,335	0,008	0,004	2,5
170-180 cm	R1	5	0,353	0,342	0,364	0,009	0,004	2,5	5	0,322	0,315	0,332	0,006	0,003	2,0
180-190 cm	R1	5	0,368	0,357	0,379	0,011	0,005	2,9	5	0,336	0,316	0,359	0,016	0,007	4,7
190-200 cm	R1	5	0,371	0,353	0,397	0,018	0,008	4,9	5	0,321	0,302	0,334	0,012	0,005	3,7
0-10 cm	R5	5	0,316	0,306	0,328	0,010	0,005	3,2	5	0,295	0,274	0,322	0,017	0,008	5,8
10-20 cm	R5	5	0,300	0,291	0,309	0,008	0,003	2,5	5	0,286	0,256	0,318	0,022	0,010	7,8
20-30 cm	R5	5	0,339	0,329	0,350	0,008	0,003	2,2	5	0,315	0,284	0,348	0,023	0,010	7,2
30-40 cm	R5	5	0,345	0,335	0,355	0,009	0,004	2,6	5	0,382	0,361	0,413	0,021	0,009	5,4
40-50 cm	R5	5	0,381	0,336	0,428	0,034	0,015	8,8	5	0,498	0,494	0,502	0,003	0,001	0,6
50-60 cm	R5	5	0,407	0,318	0,479	0,059	0,026	14,4	5	0,488	0,450	0,516	0,024	0,011	5,0
60-70 cm	R5	5	0,397	0,310	0,483	0,062	0,028	15,5	5	0,439	0,425	0,460	0,013	0,006	2,9
70-80 cm	R5	5	0,378	0,303	0,457	0,055	0,025	14,6	5	0,406	0,382	0,417	0,014	0,006	3,5
80-90 cm	R5	5	0,336	0,282	0,404	0,045	0,020	13,2	5	0,346	0,315	0,364	0,020	0,009	5,9
90-100 cm	R5	5	0,322	0,274	0,364	0,033	0,015	10,2	5	0,314	0,290	0,358	0,027	0,012	8,6

100-110 cm	R5	5	0,327	0,301	0,379	0,032	0,015	9,9	5	0,307	0,288	0,348	0,024	0,011	7,8
110-120 cm	R5	5	0,336	0,304	0,388	0,033	0,015	9,8	5	0,300	0,278	0,335	0,021	0,010	7,1
120-130 cm	R5	5	0,351	0,302	0,410	0,039	0,018	11,2	5	0,298	0,289	0,313	0,011	0,005	3,7
130-140 cm	R5	5	0,347	0,308	0,383	0,028	0,012	8,0	5	0,298	0,289	0,310	0,010	0,004	3,3
140-150 cm	R5	5	0,362	0,348	0,380	0,014	0,006	3,9	5	0,286	0,278	0,296	0,009	0,004	3,0
150-160 cm	R5	5	0,361	0,350	0,376	0,012	0,006	3,4	5	0,284	0,268	0,303	0,014	0,006	4,9
160-170 cm	R5	5	0,361	0,350	0,372	0,009	0,004	2,4	5	0,293	0,285	0,302	0,007	0,003	2,3
170-180 cm	R5	5	0,336	0,294	0,359	0,026	0,012	7,9	5	0,280	0,238	0,307	0,027	0,012	9,5
180-190 cm	R5	5	0,351	0,340	0,362	0,009	0,004	2,4	5	0,285	0,255	0,317	0,023	0,010	8,0
190-200 cm	R5	5	0,369	0,358	0,380	0,010	0,005	2,7	5	0,280	0,255	0,301	0,018	0,008	6,3
0-10 cm	R7	5	0,352	0,333	0,365	0,015	0,007	3,7	5	0,264	0,238	0,281	0,017	0,008	6,4
10-20 cm	R7	5	0,361	0,336	0,398	0,024	0,011	6,6	5	0,262	0,233	0,279	0,018	0,008	6,8
20-30 cm	R7	5	0,343	0,307	0,364	0,021	0,010	6,2	5	0,259	0,251	0,265	0,005	0,002	2,0
30-40 cm	R7	5	0,363	0,333	0,395	0,027	0,012	7,4	5	0,322	0,260	0,400	0,058	0,026	18,0
40-50 cm	R7	5	0,447	0,394	0,531	0,051	0,023	11,4	5	0,390	0,326	0,449	0,058	0,026	15,0
50-60 cm	R7	5	0,466	0,445	0,488	0,020	0,009	4,2	5	0,412	0,354	0,465	0,043	0,019	10,4
60-70 cm	R7	5	0,429	0,419	0,441	0,008	0,004	1,8	5	0,398	0,370	0,430	0,022	0,010	5,5
70-80 cm	R7	5	0,415	0,392	0,438	0,018	0,008	4,4	5	0,374	0,360	0,388	0,013	0,006	3,4
80-90 cm	R7	5	0,362	0,339	0,377	0,015	0,007	4,2	5	0,339	0,317	0,354	0,015	0,007	4,3
90-100 cm	R7	5	0,324	0,306	0,332	0,011	0,005	3,3	5	0,292	0,267	0,307	0,016	0,007	5,5
100-110 cm	R7	5	0,309	0,294	0,324	0,011	0,005	3,5	5	0,290	0,279	0,297	0,007	0,003	2,4
110-120 cm	R7	5	0,311	0,296	0,330	0,013	0,006	4,1	5	0,293	0,281	0,302	0,008	0,003	2,6
120-130 cm	R7	5	0,315	0,306	0,329	0,011	0,005	3,4	5	0,280	0,257	0,295	0,015	0,007	5,2
130-140 cm	R7	5	0,302	0,288	0,314	0,011	0,005	3,7	5	0,256	0,240	0,273	0,015	0,007	6,0
140-150 cm	R7	5	0,304	0,283	0,319	0,015	0,007	4,9	5	0,256	0,232	0,278	0,021	0,009	8,1
150-160 cm	R7	5	0,308	0,294	0,320	0,011	0,005	3,6	5	0,255	0,240	0,264	0,010	0,004	3,9
160-170 cm	R7	5	0,311	0,302	0,321	0,008	0,004	2,7	5	0,251	0,220	0,273	0,020	0,009	7,8
170-180 cm	R7	5	0,316	0,307	0,326	0,007	0,003	2,1	5	0,264	0,244	0,283	0,014	0,006	5,3
180-190 cm	R7	5	0,316	0,289	0,334	0,018	0,008	5,7	5	0,293	0,282	0,311	0,013	0,006	4,3
190-200 cm	R7	5	0,317	0,282	0,349	0,025	0,011	7,8	5	0,304	0,290	0,313	0,011	0,005	3,5