



Facultad de
Ciencias Agrarias
y Forestales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA



**CULTIVOS DE COBERTURA EN SUELOS BAJO SIEMBRA DIRECTA.
SU EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y LA MATERIA
ORGÁNICA DEL SUELO.**

Tesis para optar por el título de Doctora en Ciencias Agrarias y Forestales,
UNLP

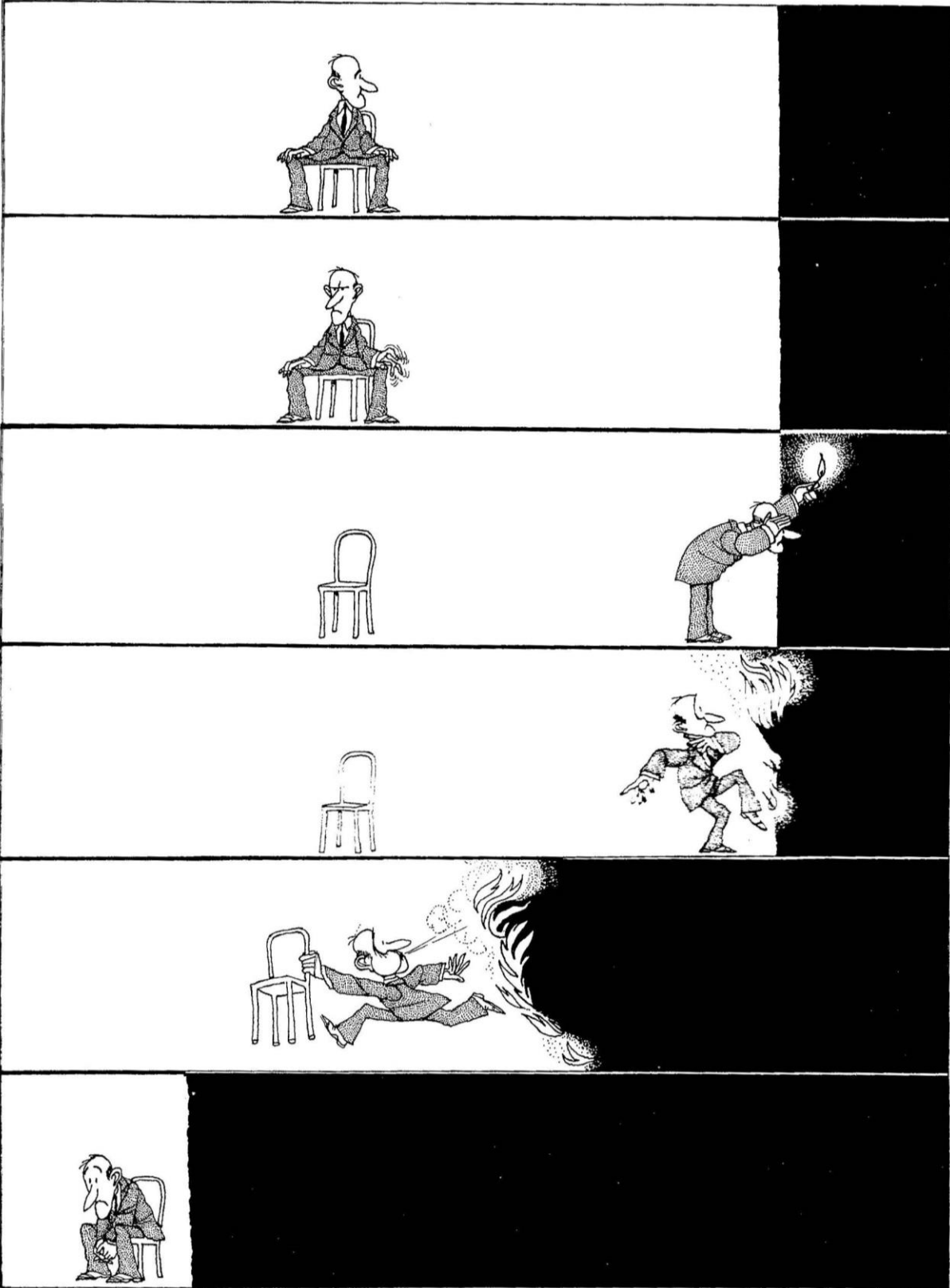
Lic. María Paz Salazar Landea

Noviembre de 2022

Directores:

Dr. C. Germán Soracco

Dr. Luis A. Lozano



Dedicada a mis abuelas,

*a mi abuela Juanita que me enseñó a jugar con las palabras
y perderme en las historias,*

*a mi abuela Elba que me enseñó a soltar la risa y a caminar
por la vereda del sol.*

Agradecimientos

A la gente del Laboratorio de Física de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales que hizo posible este trabajo. A mis directores, Germán y Luis, por su ayuda, pero por sobre todo por incentivarnos a trabajar siempre en equipo. A mis compañeros del día a día Rafa, Nico y Guido por el apoyo y la diversión. A los chicos que pasaron por el laboratorio, Florencia Otero, Matías Turinetto, Brenda García Falabella, Paz Rodríguez y Juan Terribile, por su ayuda en las determinaciones y en las idas a campo. A Marta y el Pomo, por estar siempre.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales y todo su personal. A Hermi y a Julio, por estar siempre pendientes. A los docentes de los laboratorios de Edafología y Manejo que me prestaron las instalaciones, el equipamiento y el conocimiento, y en especial a los Ing. Agr. Víctor Merani, Luciano "Pela" Larrieu y Guillermo Millán por la buena onda y la ayuda en el laboratorio.

A la UNLP y al CONICET, por financiar esta investigación a través de una beca doctoral.

Al personal de las estaciones experimentales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) por permitirnos muestrear los ensayos. Particularmente al Dr. Esteban "Coco" Melani de INTA Chascomús, a la Ing. Agr. Alicia Irizar de INTA Pergamino, a la Ing. Agr. Miriam Barracos de INTA Villegas y a la Ing. Agr. Carolina Estelrich de INTA Bellocq.

A la educación pública y gratuita, por permitirme estudiar.

A mi familia, maraña extraña, por olvidarse de las formas y abrirse a las posibilidades. A mis papás por estar siempre. A Igna y a Luz por toda la locura, la música y los chapuzones triunfales. A mi abuela por ser lo más.

A mis amigos que desde cerca o desde lejos me abrazan y me invitan a seguir andando.

Publicaciones derivadas de la tesis

En revistas

Polich, N.G., Lozano, L.A., Villarreal, R., **Salazar, M.P.**, Bellora, G.L., Barraco, M.R., Soracco, G. 2022. Effect of cover crops on hysteresis and anisotropy of soil hydraulic properties. *Geoderma Regional*. e00586. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00586>

Villarreal, R., Lozano, L.A., Polich, N.G., **Salazar, M.P.**, Barraco, M. Soracco, C.G. 2022. Cover crops effects on soil hydraulic properties in two contrasting Mollisols of Argentinean Pampas region. *Soil Science Society of America Journal*. 1-16. <https://doi.org/10.1002/saj2.20373>

Salazar, M.P., Lozano, L.A., Villarreal, R., Irizar, A.B., Barraco, M., Polich, N.G., & Soracco, C.G. 2022. Capacity and Intensity Indicators to evaluate the effect of different crop sequences and cover crops on soil physical quality of two different textured soils from Pampas Region. *Soil and Tillage Research*. 217, 105268. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105268>

Villarreal, R., Lozano, L.A., Melani, E., Polich, N.G., **Salazar, M.P.**, Bellora, G.L., Soracco, C.G. 2021. First-year cover crop effects on the physical and hydraulic properties of the surface layer in a loamy soil. *Soil and Tillage Research*. 213, 105141. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105141>

Villarreal, R., Lozano, L.A., Melani, E., Polich, N.G., **Salazar, M.P.**, Bellora, G.L., Soracco, C.G. 2021. Short-term effects of cover crop inclusion under no-tillage management on soil physical quality. *Ciencia del Suelo*. 39(2), 233-252. Disponible en: <http://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/672>

Salazar, M.P., Soracco, C.G., & Lozano, L.A. 2020. Cultivos de cobertura en suelos bajo siembra directa. Su efecto sobre las propiedades físicas y químicas que condicionan la dinámica de contaminantes. *Investigación Joven*. 7(2), 93-94. Disponible en: <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/11409>

Salazar, M.P., Sarli, G.O., & Soracco, C.G. 2019. Cultivos de cobertura en suelos bajo siembra directa. Su efecto sobre las propiedades físicas y químicas que condicionan la dinámica de contaminantes. *Investigación Joven*. 6(Especial), 27-28. Disponible en: <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/6714>

Salazar, M.P., Soracco, C.G., Villarreal, R., Polich, N.G., Bellora, G.L., Turinetti, M.J., Lozano, L.A. 2020. Winter cover crops effects on soil organic carbon and soil physical quality in a typical argiudoll under continuous soybean cropping. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 44(1), 1-17. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200103>

Salazar, M.P., Villarreal, R., Lozano, L.A., Otero, M.F., Polich, N.G., Bellora, G.L., Soracco, C.G. 2020. Carbono orgánico del suelo. Estratificación y variación espacial de diferentes fracciones en un Argiudol de la Región Pampeana bajo siembra directa. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. 119. <https://doi.org/10.24215/16699513e053>

En congresos

Lozano, L.A., **Salazar, M.P.**, Villarreal, R., Polich, N.G., Turinetto, M., Bellora, G., Soracco, C.G. 2020. *Cultivos de cobertura. Efectos de su inclusión a corto plazo sobre la calidad física del suelo*. Actas del XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

Polich, N.G., **Salazar, M.P.**, Villarreal, R., Bellora, G., Turinetto, M., Soracco, C.G., Lozano, L.A. 2020. *Cambio de uso de suelo. Impacto sobre Indicadores dinámicos de Calidad física y estabilidad estructural*. Actas del XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

Salazar, M.P., Lozano, L.A., Villarreal, R., Polich, N.G., Melani, E.M., García Falabella, B., Turinetto, M., Soracco, C.G. 2020. *Carbono orgánico del suelo. Estratificación y variación espacial de diferentes fracciones en un Argiudol bajo siembra directa*. Actas del XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

Salazar, M.P., Lozano, L.A., Villarreal, R., Polich, N.G., Irizar, A., Bongiorno, F., Bellora, G., Soracco, C.G. 2020. *Efecto de los cultivos de cobertura sobre el carbono orgánico y la calidad física del suelo en un cultivo de soja*. Actas del XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

Salazar, M.P., Donna, F., Polich, N.G., Larrieu, L., Merani, V.H., Ferro, D.A., Pereira, E.I., Vázquez, J.M., Bongiorno, F.M., Millán, G.J. *El carbono oxidable con permanganato y su relación con las fracciones Húmicas en dos suelos de la región pampeana argentina bajo diferentes manejos*. Actas del XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

RESUMEN

En las últimas décadas se produjo una fuerte transformación de los sistemas agrícolas extensivos de la Región Pampeana, caracterizada por la adopción masiva de un paquete tecnológico que incluye la siembra directa (SD), cultivos transgénicos resistentes a herbicidas y el uso de fertilizantes y herbicidas más eficientes, lo que permitió un rápido crecimiento de la producción y el área cultivada. La adopción de este nuevo modelo sin una adecuada evaluación acarrió, en algunos casos, un deterioro acelerado de la calidad física y química de los suelos, debido a una extremada simplificación de los sistemas agrícolas, con escasas rotaciones, predominio de cultivos de verano con largos barbechos desnudos, inadecuada cobertura y reposición de nutrientes, y la virtual desaparición de las rotaciones agrícola-ganaderas. Este deterioro en la calidad de los suelos puede impactar en su productividad, así como en su capacidad de proveer distintos servicios ecosistémicos entre los que se incluyen filtrar y purificar el agua de lluvia y mitigar inundaciones. Los cultivos de cobertura (CC) se posicionan como una práctica interesante en la transición hacia sistemas productivos más sustentables. Los CC se siembran entre períodos de cultivos de renta con distintos objetivos entre los que se destacan: mantener el suelo protegido, aportar materia orgánica (MO) y competir con las malezas permitiendo reducir el uso de agroquímicos. Sin embargo, existe poca información sobre el efecto de los CC en la composición de la MO del suelo y la calidad física del suelo (CFS), así como sobre su efecto sobre el contenido y disponibilidad de agua para el siguiente cultivo de renta. En este sentido, resulta de interés conocer el efecto de los CC sobre la dinámica de la MO, que comúnmente se estima a partir del contenido de carbono orgánico del suelo (COS), así como sobre su composición. Por otra parte, hace falta estudiar el efecto de esta práctica sobre indicadores estáticos y dinámicos de CFS, que nos dan información de la capacidad de un suelo para captar, almacenar y transmitir agua. Más aún, un estudio detallado de la curva de retención hídrica (CRH) y de la curva de conductividad hidráulica ($K(h)$) y de su variabilidad temporal, pueden resultar útiles para una mejor comprensión del efecto de los CC sobre el comportamiento hidráulico del suelo, así como aportar información necesaria para un adecuado modelado de la dinámica hídrica. Los principales objetivos de la presente tesis fueron: i) evaluar el efecto de los CC sobre el contenido, composición y variabilidad temporal de la MO; ii) evaluar el efecto de los CC sobre la CFS y su variabilidad temporal; iii) evaluar la variabilidad temporal a lo largo del ciclo de cultivo de la curva de $K(h)$ y de la configuración del sistema poroso, en relación a la inclusión de CC; y iv) evaluar el efecto de los CC sobre el contenido y la disponibilidad de agua durante el ciclo de cultivo, en todos los casos en comparación con un barbecho desnudo y en suelos de la Región Pampeana bajo SD. Para cumplir estos objetivos, se muestrearon cuatro sitios con suelos, rotaciones y sistemas de manejo característicos de la Región Pampeana (Villegas, Hapludol típico; Pergamino, Argiudol típico; Bellocq, Hapludol éntico; y Chascomús, Argiudol abruptico), todos ellos en SD y en tratamientos que permitieron evaluar el efecto de los CC en comparación con un

barbecho desnudo. Además, estos sitios permitieron evaluar el efecto de los CC en el mediano-largo plazo (entre 9 y 15 años, Pergamino y Villegas), y en el corto plazo (dentro de los dos años de iniciada la práctica, Bellocq y Chascomús). Se determinó el COS y distintas fracciones obtenidas por métodos físicos (carbono orgánico particulado grueso, fino, y carbono orgánico asociado a minerales) y químicos (ácidos húmicos, fúlvicos y huminas). A partir de la CRH determinada en laboratorio se calculó la distribución de tamaño de poros (DTPo), el contenido de agua a capacidad de campo y el agua disponible para la planta. La conductividad hidráulica (K) saturada y a 3 y 6 cm de tensión se determinaron a partir de medidas de infiltración a campo. Se calculó también la conectividad de las distintas familias de poros. Por otra parte, para el sitio Chascomús se determinaron la CRH y de K(h) en laboratorio a partir del método de evaporación simplificado (MES), con el fin de evaluar la variabilidad temporal del sistema poroso y su bi-modalidad. En Chascomús se midió también humedad a campo durante un ciclo de cultivo y se exploró la simulación de la dinámica hídrica mediante el software Hydrus-1D, usando como parámetros de entrada datos obtenidos mediante el MES y estimados mediante el método BEST, siendo este último un procedimiento sencillo para estimar las funciones hidráulicas a partir de la distribución de tamaño de partículas y las curvas de infiltración a campo. Entre los principales resultados obtenidos, se observó que los CC afectaron el contenido, composición y distribución vertical del COS. En el largo plazo, los CC generaron un aumento en el COS, mientras que en el corto plazo los CC tendieron a acelerar su dinámica, incluyendo su formación y su descomposición. Todas las fracciones estudiadas presentaron una variabilidad temporal y fueron susceptibles a las transformaciones biológicas, siendo las fracciones obtenidas por métodos físicos más sensibles para detectar el efecto de la inclusión de CC que las fracciones obtenidas por métodos químicos. El efecto de los CC sobre la CFS fue complejo y dependió de la secuencia de cultivos en la que fueron incluidos, el tipo de suelo y los años desde iniciada la práctica. Al estudiar las CRH y de K(h) obtenidas por el MES se observó que los CC modificaron la DTPo, generando un desplazamiento de poros de la matriz a poros estructurales e incrementando la forma bimodal de las curvas, en comparación con un barbecho desnudo. Por último, al estudiar el contenido de agua en el suelo se observó que, si bien los CC consumen agua durante su crecimiento, también pueden incrementar la capacidad del suelo para captar y transmitir agua, lo que llevó a un mayor contenido de humedad durante el período de crecimiento y de máximo requerimiento de agua del cultivo principal en lotes con CC. La simulación del contenido de humedad con Hydrus-1D resultó adecuada, tanto empleando parámetros del MES como del BEST. Los CC resultan una práctica interesante para incrementar el contenido de COS en el largo plazo en sistemas bajo SD de la Región Pampeana, siendo necesario un período de tiempo mayor a 2 años para observar beneficios. En años de precipitaciones normales, los CC no generan un déficit de agua para el siguiente cultivo de renta; por el contrario, son capaces de incrementar la capacidad de almacenaje de agua en el suelo. En cuanto a la CFS, la adopción de CC en rotaciones simplificadas bajo SD en Molisoles de la Región Pampeana genera mejoras temporales en la capacidad del suelo para captar y transmitir agua, aunque puede no ser suficiente para

revertir la degradación física ocasionada por años de un manejo inadecuado. En este sentido, los CC deberían acompañarse con otras prácticas de conservación, como ser la inclusión de pasturas o rotaciones más balanceadas, incluyendo mayor diversidad de cultivos y un balance adecuado entre gramíneas y leguminosas, en la transición hacia sistemas de producción más sustentables, que permitan conservar la calidad física y química de los suelos.

Palabras clave: carbono orgánico particulado, ácido húmicos y fúlvicos, dinámica hídrica, configuración del sistema poroso, contenido de agua.

ABSTRACT

In the last decades, the extensive agricultural systems of the Pampas Region have suffered a deep transformation, characterized by the adoption of no-tillage (SD), transgenic crops, and more efficient fertilizers and herbicides, enabling a wide growth in both production and cultivated area. The adoption of this new model without adequate evaluation, together with an extreme simplification of agricultural systems, with few crops rotation, long winter fallows, and inadequate cover and nutrient replacement, has led to an accelerated degradation of soil physical and chemical quality. This soil degradation threatens productivity, as well as other ecosystemic services including water purification, groundwater recharge, and flood mitigation. Cover crops (CC) are an interesting alternative towards more sustainable production. CC are sown in the period between cash crops with different aims, including: to cover the soil, to provide organic matter (MO), and to compete with weeds, therefore reducing the use of agrochemicals. However, there is few information on the effect of CC on soil OM composition, soil physical quality (CFS), and water availability for the next cash crop. Studying the effect of CC on the dynamic and composition of MO, that is commonly estimated from soil organic carbon content (COS), can be of interest. On the other hand, it is necessary to study the effect of this practice on static and dynamic CFS indicators, which give information on the capacity of a soil to capture, store and transmit water. Moreover, a detailed study of soil water retention curve (CRH), of the hydraulic conductivity function ($K(h)$), and of their temporal variability, can help understand the effect of CC on soil hydraulic behaviour. This study can also provide useful information for modelling soil water dynamics. The main aims of this thesis were to evaluate i) the effect of CC on MO content, composition and temporal variability, as compared to bare fallow, in characteristic soils of the Pampas Region under SD; ii) the effect of CC on CFS and its temporal variability, as compared to bare fallow, in characteristic soils of the Pampas Region under SD; iii) the temporal variability over one crop cycle of the hydraulic conductivity function and pore system configuration in one soil of the Pampas Region under SD, with and without CC; iv) the effect of CC on water content and availability for the next cash crop, as compared to bare fallow, in one soil of the Pampas Region under SD. To reach these aims, four soils were studied, including crop rotations, soil types and management that are representative of the Pampas Region (Villegas, Typic Hapludoll; Pergamino, Typic Argiudoll; Bellocq, Entic Hapludoll; and Chascomús, Abruptic Argiudoll), all of them under SD and with treatments comparing CC with bare fallow. Also, these sites included both long term (between 9 and 15 years, Pergamino and Villegas) and short term (within the first two years of CC, Bellocq and Chascomús). COS and different fractions obtained both by physical methods (coarse and fine particulate organic carbon, and mineral associated organic carbon) and chemical methods (fulvic and humic acids, and humins) were determined. The CRH determined in the laboratory was used to estimate pore size distribution (DTPo), water content at field capacity and plant available water. Hydraulic conductivity at saturation and at 3 and 6 cm of tension were determined from field infiltration

measurements. Porosity connectivity was calculated for different pore families. On the other hand, for Chascomús, CRH and $K(h)$ were determined in the laboratory using the simplified evaporation method (MES), to evaluate soil pore system configuration temporal variability and bimodality. Soil water content was measured at Chascomús during one crop cycle. Also, Hydrus-1D software was employed to model water dynamics, using parameters obtained from the MES and estimated by the BEST method, which is a simple way to estimate soil hydraulic functions from particle size distribution and field infiltration curves. Between the main results, CC affected COS content, composition, and distribution. In the long term, CC increased COS, while in the short-term CC enhances COS dynamic, including its formation and decomposition. All the studied COS fractions showed a temporal variability and were susceptible to biological transformation. Physically obtained fractions were more sensitive to the effect of CC than chemically obtained fractions. The effect of CC on CFS was complex and depended on cropping sequence, soil type and time since the adoption of the practice. The CRH and $K(h)$ function obtained by MES showed that CC changed DTPo, diminishing soil matrix porosity while increasing structural porosity, and therefore increasing the bimodality of the curves, as compared to the soil under bare fallow. Finally, even though CC consume water during their growth, they can also increase soil ability to capture and transmit water, which lead to higher water content during cash crop growth and cash crop water limiting period, in plots under CC. Hydrus-1D simulation of water content was adequate, both using MES and BEST parameters. CC are an interesting practice to increase COS content in the long term on soils of the Pampas Region under SD, for which more than two years of CC are necessary. In years with normal precipitations, CC do not deplete soil water content for the next cash crop. As regards to CFS, the adoption of CC in simplified rotations under SD in Molisolls of the Pampas Region can cause temporal improvements on storage capacity and water infiltration but may not be enough to alleviate the degradation caused by years of inadequate management. Therefore, CC should be accompanied by other conservation practices, such as the inclusion of pastures or more balanced rotations, including gramineous and leguminous crops, towards more sustainable production systems that preserve soil physical and chemical quality.

Key words: particulated organic carbon, fulvic and humic acids, hidric dynamic, pore system configuration, water content.

ABREVIATURAS EMPLEADAS EN EL TEXTO

AC	Capacidad de aire
ADP	Agua disponible para la planta
AF	Ácidos fúlvicos
AH	Ácidos húmicos
BEL	Bellocq
CC	Cultivos de cobertura
CD	Coefficiente de determinación
CFS	Calidad física del suelo
CHA	Chascomús
CMR	Coefficiente de masa residual
COM	Carbono orgánico asociado a minerales
COP_f	Carbono orgánico particulado fino
COP_g	Carbono orgánico particulado grueso
COS	Carbono orgánico asociado a minerales
CP	Cultivo principal
CRH	Curva de retención hídrica
C_w	Índice de conectividad de poros
C_{w_{ma}}	Índice de conectividad de la macroporosidad
C_{w_{me}}	Índice de conectividad de la mesoporosidad
C_{w_{PE}}	Índice de conectividad de la microporosidad
C_{w_{PT}}	Índice de conectividad de la porosidad total
D_{ap}	Densidad aparente
DTP_o	Distribución de tamaño de poros
EF	Eficiencia de la simulación
FC	Capacidad de campo
g	Aceleración de la gravedad
h	Tensión
hum	Huminas
I	Infiltración acumulada
I_s	Infiltración acumulada en estado estacionario
i	Tasa de infiltración
i_s	Tasa de infiltración en estado estacionario
IPE	Índice de precipitación estandarizada
K	Conductividad hidráulica
K₀	Conductividad hidráulica saturada
K_{0-MI}	Conductividad hidráulica saturada (mini-infiltración)
K₃	Conductividad hidráulica a 3 cm de tensión
K_{3-MI}	Conductividad hidráulica a 3 cm de tensión (mini-infiltración)
K₆	Conductividad hidráulica a 6 cm de tensión
K_{6-MI}	Conductividad hidráulica a 6 cm de tensión (mini-infiltración)
MES	Método de evaporación simplificado
MO	Materia orgánica
P_E	Porosidad estructural
PER	Pergamino
P_M	Porosidad de la matriz
PMP	Punto de marchitez permanente

PT	Porosidad total
Q	Caudal de agua
r	Radio de poros
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
SD	Siembra directa
SWS	Lámina de agua almacenada
VIL	Villegas
ε	Porosidad efectiva
ε_{ma}	Macroporosidad efectiva
ε_{me}	Mesoporosidad efectiva
η	Viscosidad del agua
θ	Contenido volumétrico de agua
θ_e	Saturación efectiva
θ_{ma}	Macroporosidad
θ_{me}	Mesoporosidad
θ_{mi}	Microporosidad
θ_r	Contenido de humedad residual
θ_s	Contenido de humedad a saturación
ρ	Densidad del agua
σ	Tensión superficial del agua
ϕ	Potencial de flujo mátrico
ψ_G	Potencial gravitacional
ψ_H	Potencial hidráulico
ψ_M	Potencial mátrico
ψ_O	Potencial osmótico
ψ_P	Potencial de presión

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – Introducción	1
1.1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2. SIEMBRA DIRECTA	3
1.3. CULTIVOS DE COBERTURA	8
1.3.1. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la materia orgánica del suelo	11
1.3.2. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la calidad física del suelo	18
1.3.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre el régimen de humedad del suelo	28
1.4. HIPÓTESIS	30
1.5. OBJETIVOS	30
1.5.1. Objetivo general	30
1.5.2. Objetivos particulares	30
1.6. DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	31
1.6.1. Sitio General Villegas	32
1.6.2. Sitio Pergamino	33
1.6.3. Sitio Bellocq	34
1.6.4. Sitio Chascomús	35
CAPÍTULO 2 – Efecto de los cultivos de cobertura sobre el carbono orgánico del suelo	39
2.1. INTRODUCCIÓN	39
2.1.1. Efecto de los cultivos de cobertura en fracciones químicas del carbono orgánico del suelo	42
2.1.2. Efecto de los cultivos de cobertura en fracciones físicas del carbono orgánico del suelo	42
2.2. MARCO TEÓRICO	43
2.2.1. Fraccionamiento de la materia orgánica	48
2.2.2. Estimación del contenido de materia orgánica	51
2.3. HIPÓTESIS	51
2.4. OBJETIVOS	52
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	52
2.4.1. Sitios de estudio y muestreo	52
2.4.2. Fraccionamiento químico del carbono orgánico del suelo	52
2.4.3. Fraccionamiento físico del carbono orgánico del suelo	53
2.4.4. Determinación de carbono orgánico	53
2.4.5. Análisis estadístico	56
2.5. RESULTADOS	57
2.5.1. Efecto a largo plazo de los cultivos de cobertura en dos suelos de diferente textura	57

2.5.2. Efecto a corto plazo de los cultivos de cobertura en dos suelos de diferente textura	68
2.5.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la variabilidad temporal del carbono orgánico del suelo y sus fracciones.....	78
2.6. DISCUSIÓN.....	84
2.6.1. Efecto a largo plazo de los cultivos de cobertura en dos suelos de diferente textura	84
2.6.2. Efecto a corto plazo de los cultivos de cobertura en dos suelos de diferente textura	90
2.6.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la variabilidad temporal del carbono orgánico del suelo y sus fracciones.....	94
2.6.4. Corolario.....	96
2.7. CONCLUSIONES	97
CAPÍTULO 3 – Efecto de los cultivos de cobertura sobre la calidad física del suelo	99
3.1. INTRODUCCIÓN	99
3.2. HIPÓTESIS.....	103
3.3. OBJETIVOS.....	103
3.4. MARCO TEÓRICO	103
3.4.1. Fertilidad física del suelo	103
3.4.2. Energía del agua en el suelo	104
3.4.3. Movimiento de agua en el suelo	106
3.5. MATERIALES Y MÉTODOS	112
3.5.1. Sitios de estudio y tratamientos	112
3.5.2. Determinación de infiltración a campo	113
3.5.3. Determinaciones en laboratorio	114
3.5.4. Análisis estadístico	115
3.6. RESULTADOS	115
3.6.1. Efecto a largo plazo de los cultivos de cobertura sobre indicadores de calidad física en dos suelos de diferente textura	115
3.6.2. Efecto a corto plazo de los cultivos de cobertura sobre indicadores de calidad física en dos suelos de diferente textura	122
3.6.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la variabilidad temporal de los indicadores de calidad física de suelos en el corto plazo.....	129
3.7. DISCUSIÓN.....	134
3.7.1. Efecto a largo plazo de los cultivos de cobertura sobre indicadores de calidad física en dos suelos de diferente textura	134
3.7.2. Efecto a corto plazo de los cultivos de cobertura sobre indicadores de calidad física en dos suelos de diferente textura	138
3.7.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la variabilidad temporal de los indicadores de calidad física de suelos en el corto plazo.....	142

3.7.4. Corolario.....	144
3.8. CONCLUSIONES	145
CAPÍTULO 4 – Efecto de los cultivos de cobertura sobre las curvas de retención hídrica y conductividad hidráulica	147
4.1. INTRODUCCIÓN.....	147
4.2. HIPÓTESIS.....	150
4.3. OBJETIVOS.....	150
4.4. MARCO TEÓRICO	150
4.4.1. Método de evaporación simplificado.....	150
4.4.2. Ajuste bimodal de la curva de retención hídrica.....	153
4.5. MATERIALES Y MÉTODOS	153
4.5.1. Sitios de estudio y muestreo.....	154
4.5.2. Determinación de las curvas de retención hídrica y de conductividad hidráulica	154
4.5.3. Análisis estadístico	157
4.6. RESULTADOS	158
4.6.1. Conductividad hidráulica cercana a saturación.....	158
4.6.2. Conductividad hidráulica no saturada y distribución de tamaño de poros	159
4.6.3. Conectividad de la porosidad estructural	161
4.7. DISCUSIÓN.....	162
4.8. CONCLUSIONES	165
CAPÍTULO 5 – Efecto de los cultivos de cobertura sobre el contenido de agua en el suelo	167
5.1. INTRODUCCIÓN.....	167
5.2. HIPÓTESIS.....	177
5.3. OBJETIVOS.....	178
5.4. MATERIALES Y MÉTODOS	178
5.4.1. Sitio de estudio y tratamientos.....	178
5.4.2. Monitoreo de humedad a campo	178
5.4.3. Caracterización climática para los períodos estudiados	180
5.4.4. Simulación del contenido de agua en el suelo	181
5.4.5. Análisis estadístico	183
5.5. RESULTADOS	184
5.5.1. Efecto de los cultivos de cobertura sobre el contenido hídrico.....	184
5.5.2. Cambios en el contenido hídrico ante eventos de precipitaciones	185
5.5.3. Modelización del contenido hídrico con Hydrus-1D	186
5.6. DISCUSIÓN.....	191
5.6.1. Efecto de los cultivos de cobertura sobre el contenido hídrico.....	191

5.6.2. Modelización del contenido hídrico con Hydrus-1D	193
5.7. CONCLUSIONES	195
CAPÍTULO 6 – Consideraciones finales	197
REFERENCIAS	201
ANEXOS	225
Anexo I	225
Anexo II	229
Anexo III	230
Anexo IV	231

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Imagen de una de las tormentas del Dust Bowl, en Texas, 1935 (De NOAA George E. Marsh Album).....	4
Figura 1.2. Evolución de la superficie agrícola en siembra directa (SD), y su distribución entre los principales cultivos. Elaborado en base a AAPRESID (2017).	5
Figura 1.3. Usos del glifosato en la producción agrícola argentina. Extraído de Okada (2014).	7
Figura 1.4. Principales mecanismos de acción y servicios ecosistémicos de los cultivos de cobertura.....	9
Figura 1.5. Especies más utilizadas como cultivos de cobertura en Argentina. Extraído de AAPRESID (2018).....	10
Figura 1.6. Principales motivos para la adopción de cultivos de cobertura en Argentina. Extraído de AAPRESID (2018).....	11
Figura 1.7. Dependencia de la conductividad hidráulica (K) con la succión (ambas variables en escala logarítmica) para suelos de textura contrastante. Extraído de Hillel (1998).	24
Figura 1.8. Arriba: Ajuste unimodal de la distribución de tamaño de poros (izquierda) y ajuste unimodal de la curva de retención hídrica (derecha) (Adaptado de John et al., 2021). Abajo: Ajuste bimodal de la distribución de tamaño de poros (izquierda) y ajuste bimodal de la curva de retención hídrica con la contribución de cada dominio de poros al contenido total de agua (derecha) (Adaptado de Reynolds, 2017). θ = Humedad. $\theta_e(h)$ = Curva para el dominio de poros estructural. $\theta_m(h)$ = Curva para el dominio de poros de la matriz.	26
Figura 1.9. Ubicación de los sitios de estudio.....	31
Figura 2.1. Modelo de un complejo órgano-mineral. El mismo incluye MO, en interacción con otras sustancias orgánicas, óxidos de hierro de origen mineral y láminas de arcilla. Los colores indican distintos elementos: hidrógeno, sodio y potasio (blanco); carbono (celeste); oxígeno (rojo); nitrógeno (azul); silicio (violeta); hierro (verde); calcio (amarillo); y magnesio (negro). Adaptado de Leinweber y Schulten (1999).	45
Figura 2.2. Esquema de la dinámica de la materia orgánica en el suelo, identificando inputs, outputs y la transformación entre distintos pools teóricos con distintas tasas de transformación (un pool lábil, un pool intermedio y un pool lento).....	48
Figura 2.3. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Villegas (VIL). S = soja, S _{CC} = soja con CC, R = rotación soja-maíz, R _{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivos principales, y letras minúsculas indican diferencias cuando hubo efecto de la presencia del CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.	58
Figura 2.4. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Villegas (VIL). AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. S = soja, S _{CC} = soja con CC, R = rotación soja-maíz, R _{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivos principales, y letras minúsculas indican efectos del factor cultivo principal*CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.....	59

Figura 2.5. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Villegas (VIL). COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. S = soja, S _{CC} = soja con CC, R = rotación soja-maíz, R _{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivos principales, mayúsculas y minúsculas indican los efectos independientes del cultivo principal y de la presencia de CC, respectivamente, y letras minúsculas indican efectos del factor cultivo de principal*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.....	60
Figura 2.6. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Pergamino (PER). S = soja, S _{CC} = soja con CC. Para una misma profundidad, distintas letras indican diferencias entre tratamientos (con vs sin CC) (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.....	63
Figura 2.7. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Pergamino (PER) en tres fechas (PER-CP _o , PER-CP _f y PER-B _f). AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. S = soja, S _{CC} = soja con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre fechas, y letras minúsculas indican efectos de la interacción fecha*CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.	64
Figura 2.8. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Pergamino (PER) en tres fechas (PER-CP _o , PER-CP _f y PER-B _f). COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. S = soja, S _{CC} = soja con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre fechas, y letras minúsculas indican efectos de la interacción fecha*CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.	65
Figura 2.9. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Bellocq (BEL), para distintas rotaciones. M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma profundidad, letras diferentes indican efecto del factor cultivo principal*CC (p-valor < 0,05). En la capa de 20-40 cm, se observaron efectos independientes del cultivo principal y de la presencia de CC.	70
Figura 2.10. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Bellocq (BEL). AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre rotaciones de los cultivos principales (M-S, S-T/S y T/S-M), y letras minúsculas indican efectos del factor cultivo principal*CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.....	71
Figura 2.11. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Bellocq (BEL). COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma profundidad, letras minúsculas indican efecto del factor cultivo principal*CC (con vs sin CC) (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.	72
Figura 2.12. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Chascomús (CHA-Bf). M = maíz, M _{CC} = maíz con CC. Para una misma profundidad, ns indica que no hubo efectos significativos (p-valor > 0,05).	75

Figura 2.13. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Chascomús (CHA-Bf). M = maíz, M _{CC} = maíz con CC. Para una misma profundidad, ns indica que no hubo diferencias significativas (p-valor > 0,05).....	76
Figura 2.14. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Chascomús (CHA-Bf). COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. M = maíz, M _{CC} = maíz con CC. Para una misma profundidad, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (con vs sin CC) (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.	77
Figura 2.15. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Chascomús (CHA) en las cinco fechas. M = maíz, M _{CC} = maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican efecto de la fecha y letras minúsculas indican efecto del factor fecha*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.	80
Figura 2.16. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Chascomús (CHA) en las cinco fechas. AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. M = maíz, M _{CC} = maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican efecto de la fecha y letras minúsculas indican efecto del factor cultivo de fecha*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p-valor < 0,05). Letras mayúsculas y minúsculas indican los efectos independientes de la fecha y la presencia de CC, respectivamente (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.	81
Figura 2.17. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Chascomús (CHA) en las cinco fechas. COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. M = maíz, M _{CC} = maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican efecto de la fecha y letras minúsculas indican efecto del factor fecha*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.	83
Figura 3.1. Contenido de humedad (θ) en función de la tensión (h).....	105
Figura 3.2. Esquema del infiltrómetro de disco a tensión.....	109
Figura 3.3. Aproximación gráfica al cálculo de las conductividades hidráulicas a dos tensiones.	110
Figura 3.4. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) en el sitio Villegas (VIL). S = soja, S _{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC), R = rotación soja-maíz, R _{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma familia de poros, letras mayúsculas indican el efecto del cultivo principal, y letras minúsculas el efecto del CC, cuando hubo efectos independientes de los factores (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos. Las letras encima de las barras corresponden a la PT.	116
Figura 3.5. Conductividad hidráulica a 0, 3 y 6 cm de tensión (K_0 , K_3 y K_6 , respectivamente) en el sitio Villegas (VIL). S = soja, S _{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC), R = rotación soja-maíz, R _{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma tensión, ns indica que no hubo diferencias significativas (p-valor > 0,05).....	117
Figura 3.6. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) en Villegas (VIL). S = soja, S _{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC), R = rotación soja-maíz, R _{CC}	

= rotación soja-maíz con CC. Para una misma variable ns indica que no hubo diferencias significativas (p-valor > 0,05).....	118
Figura 3.7. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) en el sitio Pergamino (PER). S = soja, S_{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC). Para una misma familia de poros, letras mayúsculas indican el efecto del cultivo principal, y letras minúsculas el efecto del CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos. Las letras encima de las barras corresponden a la PT.	119
Figura 3.8. Conductividad hidráulica saturada y a 3 y 6 cm de tensión (K_0 , K_3 y K_6 , respectivamente) en el sitio Pergamino (PER). S = soja, S_{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC). Para una misma familia de poros, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre fechas y letras minúsculas indican el efecto de la interacción fecha*CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.	121
Figura 3.9. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) en Pergamino (PER). S = soja, S_{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC), R = rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma variable ns indica que no hubo diferencias significativas (p-valor > 0,05).....	121
Figura 3.10. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) en el sitio Bellocq (BEL). M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma familia de poros, letras mayúsculas y minúsculas indican los efectos independientes del cultivo principal y de la presencia de cultivo de cobertura (CC), respectivamente, y letras minúsculas indican el efecto del factor cultivo principal*CC (p-valor < 0,05). Las letras encima de las barras corresponden a la PT.....	123
Figura 3.11. Conductividad hidráulica ($K(h)$) a 0, 3 y 6 cm de tensión (h) en el sitio Bellocq (BEL). M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para cada tensión, letras distintas indican diferencias significativas (p-valor < 0,05).....	125
Figura 3.12. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) en Bellocq (BEL). M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma variable, letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre rotaciones del cultivo principal (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.	126
Figura 3.13. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) tras dos años de cultivos de cobertura (CC) en el sitio Chascomús (CHA-B2). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para una misma familia de poros, letras distintas indican diferencias entre tratamientos (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas. Las letras encima de las barras corresponden a la PT.	127
Figura 3.14. Conductividad hidráulica ($K(h)$) a 0, 3 y 6 cm de tensión (h) tras dos años de cultivos de cobertura (CC) en el sitio Chascomús (CHA-B2). M = maíz, M_{CC} = maíz con cultivo de cobertura. Para cada presión, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.	128
Figura 3.15. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) tras dos años de cultivos de cobertura (CC) en el sitio Chascomús (CHA-B2). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para las variables estudiadas, no hubo diferencias significativas entre tratamientos (p-valor > 0,05).....	128
Figura 3.16. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) en cinco fechas en el sitio Chascomús (CHA). M = maíz, M_{CC} = maíz con cultivo de cobertura (CC). Para una misma familia de poros, letras mayúsculas indican el efecto de la fecha, y letras mayúsculas y minúsculas indican los	

efectos independientes de la fecha y de la presencia de CC, respectivamente (p -valor $< 0,05$). ns indica que no hubo efectos significativos. Las letras encima de las barras corresponden a la PT..... 130

Figura 3.17. Conductividad hidráulica saturada y a 3 y 6 cm de tensión (K_0 , K_3 y K_6 , respectivamente) en cinco fechas en el sitio Chascomús (CHA). M = maíz, M_{CC} = maíz con cultivo de cobertura (CC). Para una misma familia de poros, letras distintas indican diferencias para la interacción fecha*CC (p -valor $< 0,05$)..... 132

Figura 3.18. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) en Chascomús (CHA). M = maíz, M_{CC} = maíz con cultivo de cobertura (CC). Para una misma variable, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre fechas (p -valor $< 0,05$), y letras minúsculas indican el efecto de la interacción fecha*CC. La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas. 133

Figura 4.1. Configuración experimental del dispositivo para el método de evaporación simplificado. 151

Figura 4.2. Configuración experimental del mini-infiltrómetro. 155

Figura 4.3. Valores medios de K_{0-MI} , K_{3-MI} y K_{6-MI} durante el período de estudio para los distintos sistemas de manejo: M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para una misma tensión, letras diferentes indican diferencias significativas entre fechas (p -valor $< 0,05$). Las barras de error indican el desvío estándar..... 158

Figura 4.4. Evolución temporal de las curvas de retención hídrica (izquierda) y su respectiva distribución de tamaño de poros (DTPo) (derecha), para los distintos tratamientos y en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f). Los puntos indican los valores medidos y las líneas los valores modelados mediante un ajuste bimodal. M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. θ = contenido de humedad, h = tensión, d_e = diámetro de poro equivalente. 159

Figura 4.5. Valores de conductividad hidráulica (K) observados (puntos) y ajustados (curvas) a distintas tensiones de carga de agua (h) para los distintos tratamientos y en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC..... 160

Figura 4.6. Porosidad estructural (P_E) y porosidad de la matriz (P_M) para los distintos tratamientos y en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Letras distintas indican diferencias significativas del factor fecha*presencia de CC (p -valor $< 0,05$). Las barras de error indican el desvío estándar para cada familia de poros. 160

Figura 4.7. Valores medios de conectividad de la porosidad estructural (CW_{PE}) para los distintos tratamientos y en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Letras distintas indican diferencias significativas entre fechas (p -valor $< 0,05$). Las barras de error indican el desvío estándar para cada CW_{PE} 162

Figura 5.1. Sensores de humedad (ECH₂O EC-5, Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, EEUU) y esquema de las capas de suelo muestreadas..... 179

Figura 5.2. Datos de contenido de agua (θ) observados vs. simulados para la simulación a partir de los parámetros obtenidos mediante el método de evaporación simplificado (MES), para las capas de 0-10 y 10-20 cm. M = barbecho desnudo, M_{CC} = barbecho con CC. La primera columna corresponde a todos los datos de la simulación, la segunda columna a los datos del período de barbecho, y la tercera columna a los datos del período del cultivo principal..... 188

Figura 5.3. Datos de contenido de agua (θ) observados vs. simulados para la simulación a partir de los parámetros obtenidos mediante el método BEST, para las capas de 0-10 y 10-20

cm. M = barbecho desnudo, M_{CC} = barbecho con CC. La primera columna corresponde a todos los datos de la simulación, la segunda columna a los datos del período de barbecho, y la tercera columna a los datos del período del cultivo principal. 189

Figura 5.4. Contenido de agua (θ) observado (puntos) y simulado (líneas) a partir de parámetros obtenidos mediante el método de evaporación simplificado (MES), a dos profundidades y para los tratamientos de barbecho desnudo (M) a la izquierda, y barbecho con cultivo de cobertura (M_{CC}) a la derecha. La línea vertical punteada separa el período de barbecho (izquierda) del cultivo principal (derecha). Las barras en la parte superior de la figura muestran las precipitaciones diarias. 190

Figura 5.5. Contenido de agua (θ) observado (puntos) y simulado (líneas) a partir de parámetros obtenidos mediante el método BEST, a dos profundidades y para los tratamientos de barbecho desnudo (M) a la izquierda, y barbecho con cultivo de cobertura (M_{CC}) a la derecha. La línea vertical punteada separa el período de barbecho (izquierda) del cultivo principal (derecha). Las barras en la parte superior de la figura muestran las precipitaciones diarias. 191

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) y sus diferentes fracciones en la literatura revisada.	15
Tabla 1.2. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre indicadores de calidad física de suelos en la literatura revisada.	21
Tabla 1.3. Principales características de los sitios de estudio.....	32
Tabla 1.4. Labores realizadas durante el período de estudio en el sitio Villegas.	33
Tabla 1.5. Labores realizadas durante el período de estudio en el sitio Pergamino.....	34
Tabla 1.6. Labores realizadas durante el período de estudio en el sitio Bellocq.	35
Tabla 1.7. Labores realizadas durante el período de estudio en el sitio Chascomús.	36
Tabla 1.8. Principales características de los ensayos experimentales.....	37
Tabla 2.1. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos químicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Villegas (VIL).....	61
Tabla 2.2. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos físicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Villegas (VIL).....	61
Tabla 2.3. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos químicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Pergamino (PER).....	67
Tabla 2.4. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos físicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Pergamino (PER).....	68
Tabla 2.5. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos químicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Bellocq (BEL).....	73
Tabla 2.6. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos físicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Bellocq (BEL).....	74
Tabla 2.7. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos químicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Chascomús (CHA-Bf).....	78
Tabla 2.8. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos físicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Chascomús (CHA).....	78
Tabla 3.1. Valores de densidad aparente (Dap)	112
Tabla 3.2. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente en Villegas (VIL).	116
Tabla 3.3. Índices de conectividad para la porosidad total (CW_{PT}), la macroporosidad (CW_{ma}) y la mesoporosidad (CW_{me}) en Villegas (VIL).....	118
Tabla 3.4. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente en Pergamino (PER).	120
Tabla 3.5. Índices de conectividad para la porosidad total (CW_{PT}), la macroporosidad (CW_{ma}) y la mesoporosidad (CW_{me}) en Pergamino (PER).....	122
Tabla 3.6. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente en Bellocq (BEL).....	124
Tabla 3.7. Índices de conectividad para la porosidad total (CW_{PT}), la macroporosidad (CW_{ma}) y la mesoporosidad (CW_{me}) en Bellocq (BEL).....	126

Tabla 3.7. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente tras dos años de CC en el sitio Chascomús (CHA-B2).	127
Tabla 3.8. Índices de conectividad para la porosidad total ($C_{w_{PT}}$), la macroporosidad ($C_{w_{ma}}$) y la mesoporosidad ($C_{w_{me}}$) en Chascomús (CHA-B2).....	129
Tabla 3.9. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente en Chascomús (CHA).	131
Tabla 3.10. Índices de conectividad para la porosidad total ($C_{w_{PT}}$), la macroporosidad ($C_{w_{ma}}$) y la mesoporosidad ($C_{w_{me}}$) en Chascomús (CHA) en las distintas fechas de muestreo.	134
Tabla 4.1. Valores medios de la conductividad hidráulica saturada (K_0) y a 316 cm de tensión (h) obtenidos del ajuste de van Genuchten-Mualem a partir del método de evaporación simplificado en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP _o , CHA-CP _i).	161
Tabla 5.1. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el contenido y la dinámica hídrica en comparación con un barbecho desnudo en la literatura revisada.	169
Tabla 5.2. Caracterización de las precipitaciones para el período estudiado.....	180
Tabla 5.3. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el contenido hídrico.	185
Tabla 5.4. Efecto de los cultivos de cobertura sobre el cambio en el contenido hídrico ante eventos de precipitaciones.	186
Tabla 5.5. Parámetros empleados para evaluar la bondad de los ajustes.	187

CAPÍTULO 1 – Introducción

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

Argentina se caracteriza por ser un país agrícola-ganadero, con una historia de desarrollo ligada a la producción agropecuaria con fines de exportación. En los últimos 25 años, este sistema sufrió una fuerte intensificación, con un incremento exponencial de la producción asociado a la introducción de la siembra directa (SD), que permitió la expansión de la frontera agrícola y principalmente del cultivo de soja (*Glycine max* L.) sobre regiones tradicionalmente destinadas a otras actividades (Carrasco et al., 2012; Wilson et al., 2020). La SD consiste en sembrar los cultivos en el suelo sin labrar, con una sembradora que abre un pequeño surco de ancho y profundidad suficientes para cubrir las semillas (Derpsch y Friedrich, 2009). Como los residuos de los cultivos anteriores permanecen en la superficie protegiendo al suelo de eventos externos, y al no labrar no se estimula la mineralización de la materia orgánica (MO), a este sistema se le atribuye la capacidad de minimizar los procesos de erosión y degradación, manteniendo o mejorando la calidad del suelo. Esto, sumado a menores costos de producción y una simplificación de las tareas agrícolas, ha sido uno de los principales motivos de su implementación (Lozano et al., 2016; Wilson et al., 2020). En regiones templadas, la SD ha sido efectiva para generar una acumulación de MO en superficie (Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Carrasco et al., 2012; Díaz-Zorita et al., 2004). Un aumento en la MO se asocia a una mejora en la fertilidad física y química del suelo, pudiendo disminuir las pérdidas por erosión y aumentar el agua almacenada (Blanco-Canqui y Lal, 2009; Domínguez y Bedano, 2016), preservar en número y diversidad la fauna del suelo, aumentando la estabilidad estructural (Alvarez y Steinbach, 2009; González Chávez et al., 2010), y mejorando por lo tanto la configuración del sistema poroso y el flujo de agua y aire en el suelo (Lozano, 2014).

Sin embargo, en la Región Pampeana la adopción de la SD vino de la mano de un incremento en el área con monocultivo (Duval et al., 2016; Novelli et al., 2011), en detrimento del tradicional modelo de rotación agrícola (con rotaciones que incluían cereales y leguminosas) y agrícola-ganadera, al que se atribuye la conservación de la fertilidad de los suelos de la región durante tantos años de actividad (Di Pace, 1992; Manuel-Navarrete et al., 2005). En este nuevo modelo agrícola simplificado, la SD no fue acompañada por otras prácticas agrícolas apropiadas (por ejemplo, rotación de cultivos, fertilización, control integrado de plagas) (Austin et al., 2006; Behrends Kraemer et al., 2019). Entre los cultivos sembrados predominan los de verano, lo que implica largos barbechos desnudos durante el invierno (Caviglia y Andrade, 2010; Pinto et al., 2017). El principal cultivo en SD es la soja, un cultivo que deja pocos residuos en el suelo, que por su naturaleza resultan fácilmente degradables (Duval et al., 2016; Olson et al., 2010; Studdert y Echeverría, 2000). Por lo tanto, la cobertura del suelo en gran parte de los lotes bajo SD de la región es mucho menor a la esperada para esta práctica agrícola, cuyos principales beneficios se derivan de una buena cobertura y un adecuado aporte de MO en superficie (Schmidt et al., 2018). Como consecuencia, en los últimos años se han evidenciado efectos negativos sobre la calidad del suelo. Si bien uno de los principales objetivos de la SD es incrementar el contenido de MO, en muchos casos su implementación no mejoró o incluso empeoró los balances de carbono orgánico del suelo (COS) (Blanco-Canqui, 2021; Domínguez et al., 2010; Duval et al., 2016; Novelli et al., 2017). En cuanto a la calidad física, varios

autores describieron eventos de compactación en suelos bajo SD, evidenciados por aumentos en la densidad aparente (Dap) y en la resistencia a la penetración, pudiendo generar en ocasiones una disminución en el rendimiento de los cultivos (Álvarez y Steinbach, 2009; Chagas et al., 1994; Díaz-Zorita et al., 2002; Domínguez et al., 2010; Lozano, 2014; Soracco et al., 2018a). Otros estudios reportan la formación de estructuras anómalas, entre las que se destaca la presencia de estructura laminar, con agregados planos paralelos a la superficie (Behrends Kraemer et al., 2017; Sasal et al., 2017). La compactación con formación de estructura laminar, además de generar una disminución de la porosidad total (PT) y una variación en la distribución del tamaño de poros (DTPo) (Álvarez y Steinbach, 2009; Carof et al., 2007; Strudley et al., 2008), modifica la orientación y la conectividad de esos poros (Lozano et al., 2013; Lozano, 2014). Por lo tanto, la presencia de estructura laminar restringe la profundidad de exploración de las raíces y la infiltración de agua en el perfil (Behrends Kraemer et al., 2017; Lozano et al., 2013; Sasal et al., 2017; Soracco et al., 2010).

Estos sistemas agrícolas simplificados en SD, por lo tanto, no siempre resultan en una mayor cobertura del suelo, ni en mejores propiedades físicas, ni en mayor contenido de COS. Otro aspecto negativo de la implementación del actual modelo agrícola es la elevada tasa de aplicación de agroquímicos (Aparicio et al., 2018). En suelos bajo SD se elimina la acción mecánica de la labranza que anteriormente era central en el control de malezas, teniendo que reforzar el uso de agroquímicos. Por este motivo, la puesta en práctica de este modelo agrícola solo fue posible en compañía de un paquete tecnológico que incluye potentes herbicidas y semillas genéticamente modificadas para resistirlos (Villarreal, 2018). De esta manera se logra un control efectivo de malezas en pre y pos-emergencia de los cultivos. Esto ha generado alerta en distintos sectores de la sociedad, ante los evidentes efectos del uso de agroquímicos sobre la salud y el ambiente, y la emergencia de plagas resistentes que llevan a aumentar aún más su uso.

De todo esto surge la necesidad de explorar e implementar nuevas prácticas agrícolas más sustentables, que permitan mantener la calidad física y química del suelo, y reducir la aplicación de agroquímicos. Los cultivos de cobertura (CC), son una de las prácticas de manejo propuestas para acompañar y mejorar el desempeño de la SD. Los CC son cultivos que se siembran entre períodos de cultivos de renta (o bien entre líneas de cultivo en plantaciones de árboles), por los servicios ecosistémicos que proveen. Durante su crecimiento, estos cultivos generan una cobertura del suelo, protegiéndolo de la erosión hídrica y eólica, y mitigando cambios bruscos de temperatura y humedad en comparación con un barbecho desnudo (Blanco-Canqui et al., 2015; Poeplau y Don, 2015; Sharma et al., 2018). Además, la actividad de sus raíces y de la fauna del suelo asociada ayuda a mantener la estructura del suelo, mejorando su capacidad de captar, transmitir y almacenar agua. Una vez finalizado su ciclo, estos cultivos no son cosechados (con lo cual no se genera una extracción de nutrientes y MO del sistema) sino que el rastrojo se mantiene en la superficie, generando cobertura y un aporte extra de residuos orgánicos (Jian et al., 2020). De esta manera los CC pueden contribuir a incrementar el COS, siendo una herramienta para capturar carbono (C) atmosférico y por lo tanto para mitigar el cambio climático (Adetunji et al., 2020). Por otra parte, durante su crecimiento los CC compiten con las malezas, pudiendo ayudar a reducir o incluso eliminar la aplicación de agroquímicos en sistemas productivos bajo SD (Mennan et al., 2020).

1.2. SIEMBRA DIRECTA

La SD se introdujo en los años 60 como una alternativa para evitar la degradación de suelos producida por años de labranzas. El desarrollo de la agricultura extensiva estuvo en buena parte ligado al sistema de labranza convencional, en el que la cama de siembra se prepara removiendo e invirtiendo una capa de suelo de entre 15 y 30 cm, con el fin de generar una superficie adecuada para la siembra, promover la liberación rápida de nutrientes por mineralización de la MO y controlar de manera mecánica las malezas (Araújo de Medeiros Barbosa, 2015). En la labranza convencional, los residuos de cultivos anteriores y las malezas son incorporados al suelo cuando se invierten los panes de tierra, lo que genera una redistribución de la MO, dejando la superficie del suelo descubierta. La labranza como práctica de preparación del terreno de siembra lleva varios siglos de arraigo, desde los primeros arados conocidos, que fueron desarrollados en Mesopotamia entre el 5000 y el 3000 a.C., hasta los diseños de arado de reja y vertedera popularizados en el siglo XVIII en los Estados Unidos (Derpsch, 1998; Lozano, 2014). Estos últimos diseños, sumados a la introducción de las máquinas agrícolas a motor hacia 1910, permitieron una exponencial expansión de la agricultura durante el siglo XX (Lal, 2009a), contribuyendo también a instalar la idea de que para cultivar era preciso labrar.

La expansión de este modelo de agricultura mecanizada basada en la labranza del suelo continuó, a pesar de que los efectos negativos sobre el ambiente no tardaron en hacerse evidentes. La labranza continua del suelo aceleró los fenómenos de pérdida de MO y estructura del suelo, lo que a su vez agravó los procesos de erosión hídrica y eólica (Beare et al., 1994; Derpsch, 1998; 2003). Quizás el evento más icónico de la degradación del suelo por las labranzas fue el *Dust Bowl* en los años 30, una serie de tormentas de tierra ocurridas en Estados Unidos en condiciones persistentes de sequía y favorecidas por la labranza continua (Lal, 2009a) (Figura 1.1). Este fue uno de los puntos de quiebre para el inicio de los movimientos ambientalistas, y también para el desarrollo de la SD como la conocemos hoy en día.



Figura 1.1. Imagen de una de las tormentas del Dust Bowl, en Texas, 1935 (De NOAA George E. Marsh Album).

En este contexto de creciente preocupación por la calidad del ambiente y por la preservación de los suelos, se comenzaron a cuestionar las prácticas de labranza imperantes y se hicieron los primeros planteos de labranza reducida y SD. Cabe destacar que la práctica de sembrar sin labrar el suelo estuvo y está presente en muchas culturas desde los inicios de la agricultura (Derpsch, 1998; Fukuoka, 1985). La SD como la conocemos hoy se define como un sistema de sembrar cultivos en el suelo sin realizar ninguna labranza, a excepción de la apertura de un surco delgado u hoyos donde se colocan las semillas, con el fin de lograr una cobertura adecuada (Derpsch y Friedrich, 2009). Sin embargo, durante varias décadas existieron limitaciones técnicas que dificultaban prescindir de las labranzas en la agricultura extensiva. Por un lado, la labranza cumplía el rol de promover la mineralización de la MO y la liberación de nutrientes para los cultivos, aumentando los rendimientos, en una época en la que la fertilización no era una práctica habitual (Lozano, 2014). Y por el otro, era el principal mecanismo de control de malezas. Es por esto que, si bien en los años 60 comenzaron los ensayos de SD en Estados Unidos y otros lugares del mundo incluyendo Argentina, la efectiva puesta en práctica de la SD iba a requerir de dos grandes eventos. El primero fue el desarrollo de herbicidas más eficientes para el control químico de malezas, que vino de la mano del desarrollo de la industria química después de la segunda guerra mundial. Así, en la década de los 40 se descubrió y sintetizó el 2,4-D, en la década de los 50 la atrazina y otras sustancias de la familia de las triazinas, el Paraquat en los años 60 y el glifosato en la década de los 70 (patentado bajo la marca de Roundup®). El segundo evento fue la introducción en 1996 de la soja genéticamente modificada para resistir al glifosato (soja Roundup Ready®, introducida al mercado por la compañía Monsanto), que fue seguida de la aprobación de otros eventos transgénicos resistentes a glifosato como la canola en 1996, el algodón en 1997 y el maíz en 1998 (Carrasco et al., 2012; Villarreal, 2018). La introducción de transgénicos resistentes al glifosato permitió su uso para el control de

malezas no solo durante el barbecho o en pre-emergencia, sino también en pos-emergencia (Villarreal, 2018). De esta manera, para la segunda mitad de la década de los 90 se cerró el paquete tecnológico que permitió la efectiva implementación de la SD: herbicidas y fertilizantes más eficientes, cultivos genéticamente modificados para resistir herbicidas y sembradoras más eficientes. A su vez, el vencimiento de la patente del Roundup en el 2000, y la consecuente caída en el precio del glifosato, generó las condiciones adecuadas para una rápida expansión de la SD (Cáceres, 2018; García-Préchac et al., 2004; Wilson et al., 2020), que hoy en día alcanza unos 125 millones ha en el mundo (Blanco-Canqui y Ruis, 2018).

En Argentina, la adopción de este nuevo paquete tecnológico fue rápida, siendo hasta el 2008 el segundo país con más superficie con cultivos transgénicos en el mundo. Hacia 2016, se ubicaba tercero en la lista de países con mayor número absoluto de hectáreas con cultivos transgénicos (23,8 millones), precedida únicamente por Estados Unidos y Brasil (ISAAA, 2016). De esta superficie con cultivos genéticamente modificados, un 78 % corresponde a soja, seguida en menor medida por maíz (20 %) y algodón (2 %) (ISAAA, 2016). De la mano de los cultivos transgénicos, ocurrió una rápida expansión de la SD (Lozano, 2014) (Figura 1.2). Es así como en la temporada 89/90 el país contaba con unas 92 mil ha bajo SD de un total de 21 millones ha cultivadas (0,4 %), mientras que en la temporada 2003/2004 la superficie bajo SD representaba 18,5 millones ha de 28,5 millones ha cultivadas (65 %), para alcanzar 33 millones de 36 millones ha (91 %) en la temporada 2016/2017 (AAPRESID, 2017; AAPRESID, 2020). Estos datos también permiten ver como estos cambios en las prácticas de manejo trajeron aparejada una fuerte expansión de la superficie cultivada, con un incremento del 80 % entre 1994 y 2017. Hoy en día se puede decir que la adopción de la SD en el país es masiva, siendo la soja el principal cultivo extensivo con unas 16 millones ha, seguida por el maíz y el trigo con unas 8 y 6 millones ha, respectivamente (AAPRESID, 2020).

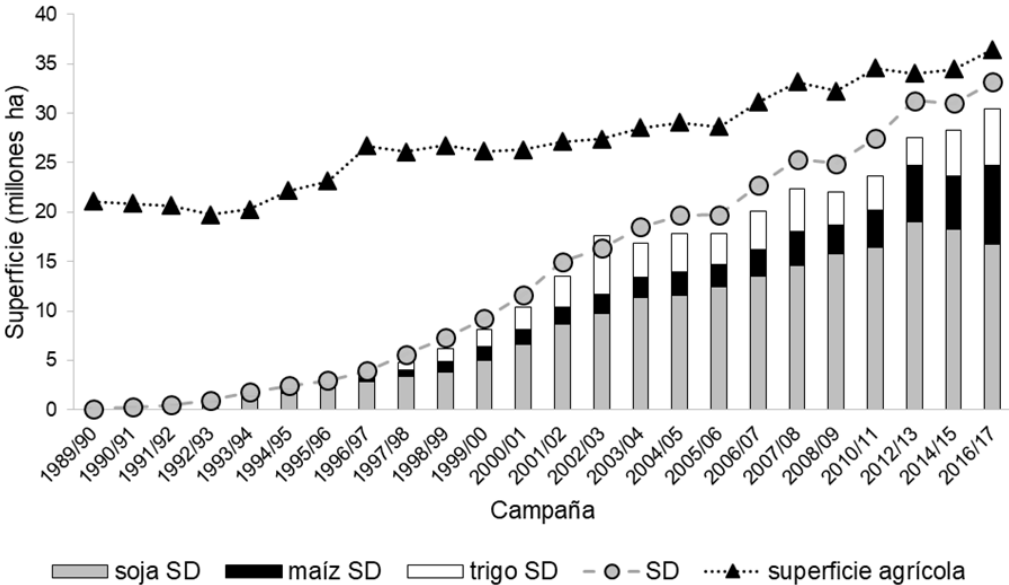


Figura 1.2. Evolución de la superficie agrícola en siembra directa (SD), y su distribución entre los principales cultivos. Elaborado en base a AAPRESID (2017).

En general, se atribuye a la SD la capacidad de mejorar la calidad física y química de los suelos (Derpsch, 2003). Mientras que en los sistemas bajo labranza convencional la perturbación del suelo genera un aumento en la tasa de mineralización de la MO (Behrends Kraemer et al., 2017; Duval et al., 2016), la SD, al implicar una perturbación mínima, permite una mayor acumulación de MO en superficie (Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Carrasco et al., 2012; Díaz-Zorita et al., 2004). Además de proveer nutrientes, la MO contribuye a generar condiciones de temperatura y humedad adecuadas para el desarrollo de las plantas y la fauna del suelo, mantener la estructura del suelo y disminuir las pérdidas por erosión (Blanco-Canqui y Lal, 2009; Domínguez y Bedano, 2016). Sin embargo, es importante destacar que la SD no es una práctica de conservación por sí sola, sino que para generar beneficios debe garantizarse una adecuada cobertura del suelo, manteniendo una cantidad suficiente de residuos en la superficie, y estar acompañada por otras prácticas de manejo complementarias (Blanco-Canqui, 2021; Derpsch, 2003).

Como ya se mencionó, la SD se introdujo con la finalidad de evitar la degradación de suelos producida por la labranza, bajando a su vez los costos de producción y simplificando las tareas agrícolas (Wilson et al., 2020). Sin embargo, en la Región Pampeana se han reportado efectos negativos sobre la calidad química y física de los suelos ante la adopción de la SD. Varios autores observaron disminuciones en el COS en sistemas agrícolas bajo SD (Blanco-Canqui, 2021; Domínguez et al., 2010; Duval et al., 2016; Novelli et al., 2017). Otros autores reportaron aumentos en la Dap y disminuciones en la infiltración en suelos bajo SD, atribuidas en ocasiones a la formación de estructura laminar (Alvarez y Steinbach, 2009; Behrends Kraemer et al., 2017; Chagas et al., 1994; Lozano et al., 2013; Sasal et al., 2017; Soracco et al., 2010). Estos efectos negativos sobre la calidad del suelo han sido atribuidos a la extrema simplificación de los sistemas agrícolas en SD y a que la adopción de la SD no fue acompañada por otras prácticas agrícolas apropiadas (Behrends Kraemer et al., 2019; Wilson et al., 2020). En Argentina, la simplificación en las rotaciones, el predominio de los cultivos de verano con barbechos desnudos durante el invierno, la adopción del monocultivo, y una inadecuada reposición de nutrientes en la mayoría de los establecimientos productivos resultan en sistemas agrícolas con baja cobertura y un balance negativo de nutrientes (Duval et al., 2016; Wilson et al., 2020). El principal cultivo es la soja, que deja poca cantidad de rastrojo y que por su baja relación C/N resulta fácilmente mineralizable (Behrends Kraemer et al., 2017; Duval et al., 2016; Olson et al., 2010; Studdert y Echeverría, 2000). Un informe del año 2015 indica que, en alrededor de la mitad de los lotes bajo SD en la Provincia de Buenos Aires, la cobertura del suelo durante el barbecho fue menor al 30 %, cuando la cobertura esperada en esta práctica es de más del 70 % (Schmidt et al., 2018). Por lo tanto, en estos sistemas agrícolas la cobertura y el aporte de C pueden resultar insuficientes para mantener la calidad física y química de los suelos. Además, la expansión agrícola implicó el avance de la frontera agropecuaria sobre ecosistemas frágiles, dándose una importante transformación en el uso de la tierra (Carrasco et al., 2012).

Otro aspecto del actual modelo de producción agrícola que merece especial atención es la elevada tasa de aplicación de agroquímicos en cultivos transgénicos bajo SD (Aparicio et al., 2018). En sistemas bajo labranza convencional, buena parte del control de malezas se realiza de manera mecánica durante la labranza. En SD, esta acción mecánica de inversión de los panes de tierra desaparece, reemplazándose por un control químico de las malezas. El uso de herbicidas es aún

mayor cuando predominan los cultivos de verano con largos barbechos desnudos en el invierno, ya que las malezas no tienen competencia durante este período y deben ser controladas químicamente (Villarreal, 2018). Por otra parte, la simplificación de las rotaciones y la falta de biodiversidad en los sistemas agrícolas genera las condiciones ideales para la emergencia de plagas, mientras que la aplicación de agroquímicos genera una presión ambiental hacia el desarrollo de plagas resistentes, lo que alimenta a la vez la aplicación de más agroquímicos (Karlen et al., 2006; Tabashnik et al., 2014). Así, desde la implementación en los 90 de este nuevo paquete tecnológico se incrementó el número de agroquímicos utilizados y los volúmenes empleados por unidad de superficie (Cáceres, 2018), sin contar la enorme expansión en el área cultivada. Entre estos agroquímicos, el glifosato genera especial atención debido a su elevado uso y a la preocupación que genera en la sociedad (Alonso et al., 2018; Cáceres, 2018; Vara et al., 2012). En Argentina, la aplicación de glifosato ronda los 200 millones de litros por año (Alonso et al., 2018), de los cuales unos 80 millones de litros se aplican durante el barbecho y unos 60 millones de litros en el cultivo de soja transgénica (Okada, 2014) (Figura 1.3). Esto ubica al país entre los que aplican mayor cantidad de glifosato a nivel mundial (Ferraro y Ghera, 2013), y como el segundo en aplicación de herbicidas por hectárea sembrada (Aparicio et al., 2015). Este agroquímico y su principal metabolito, el AMPA, se han encontrado en distintas matrices ambientales incluyendo suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas y agua de lluvia (Alonso et al., 2018; Aparicio et al., 2013; Lupi et al., 2019; Okada et al., 2018; Pérez et al., 2017a; Primost et al., 2017; Ronco et al., 2016; Villarreal, 2018). También se ha reportado su bioacumulación en organismos acuáticos y terrestres (Pérez et al., 2017b; Rossi et al., 2020; Singh et al., 2020). El glifosato fue clasificado como probablemente cancerígeno en humanos (grupo 2A) por la IARC (International Agency for Research on Cancer/World Health Organization) (IARC, 2015), lo que profundiza la alerta entre especialistas y en la sociedad en general (Alonso et al., 2018; Carrasco et al., 2012).

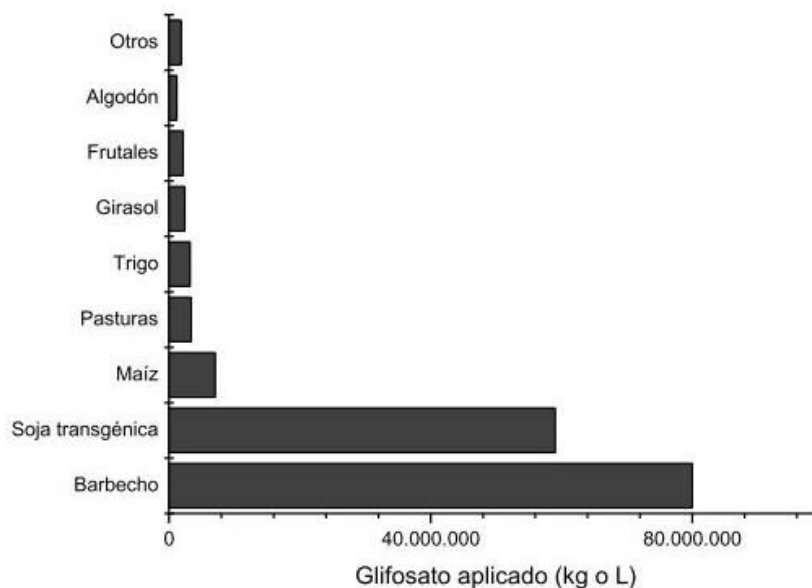


Figura 1.3. Usos del glifosato en la producción agrícola argentina. Extraído de Okada (2014).

A modo de resumen, podemos decir que la SD por sí sola no es suficiente para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo en relación a la labranza convencional o a la labranza reducida (AAPRESID, 2017; Blanco-Canqui, 2021). Los sistemas agrícolas actuales no siempre resultan sustentables y han generado en ocasiones graves problemas ambientales, al contribuir al deterioro físico y químico del recurso suelo. A esto se suman los efectos negativos de los agroquímicos y la pérdida de los servicios ecosistémicos asociados a la biodiversidad. De lo anterior se desprende la necesidad de transformar los sistemas de producción agropecuaria hacia sistemas más sustentables. Varios autores plantean la necesidad de acompañar la SD con otras prácticas, como aumentar la diversidad de cultivos en las rotaciones, incluir pasturas perennes, abonar el suelo con abonos orgánicos, e incluir cultivos de cobertura (CC) (Andrade et al., 2017; Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Blanco-Canqui, 2021; Domínguez y Bedano, 2016; Duval et al., 2016). La inclusión de CC parece una opción prometedora, ya que consiste en generar una cobertura para el suelo con un cultivo que no es de cosecha y por lo tanto aporta un ingreso extra de MO al sistema sin extracción de nutrientes, y a la vez compite con las malezas, permitiendo reducir o incluso eliminar la aplicación de agroquímicos durante el barbecho (Blanco-Canqui et al., 2015; Bolinder et al., 2020; Recio-Vázquez et al., 2014).

1.3. CULTIVOS DE COBERTURA

Entre las prácticas sugeridas para ayudar a preservar la fertilidad física y química de los suelos bajo SD se encuentran los CC, también llamados cultivos de servicios. De acuerdo a la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, 1997), los CC son cultivos de alta cobertura, sembrados entre cultivos de cosecha, o bien entre líneas en producción de árboles, y que protegen y mejoran el suelo (Fageria et al., 2005). Los residuos de los CC permanecen en la superficie del suelo, y estrictamente no deberían cosecharse ni pastorearse, ni tampoco, a diferencia de los abonos verdes, incorporarse al suelo mediante labores mecánicas (Taboada y Varela, 2014). Estos cultivos se siembran con distintos objetivos entre los que se destacan: proteger el suelo de la erosión, prevenir la pérdida de nutrientes por lixiviado o escorrentía, aportar C, mejorar las propiedades físicas e hidráulicas y controlar malezas (Blanco-Canqui et al., 2015; Jian et al., 2020; Mennan et al., 2020; Poeplau y Don, 2015; Sharma et al., 2018). La inclusión de CC implica mayor actividad de raíces y actividad biológica en el suelo, además de un mayor aporte de MO (Behrends Kraemer et al., 2017, Duval et al., 2014; 2016; Studdert y Echeverría, 2000). La acumulación de MO en la superficie mejora la consistencia para el laboreo, genera estructura y aporta estabilidad estructural (Novelli et al., 2013; Sasal, 2012). Además de su función estructurante, la MO estimula el desarrollo de la biota del suelo, que tiene un rol fundamental en la incorporación de los residuos orgánicos y en la generación de porosidad estructural (Domínguez y Bedano, 2016; Schmidt et al., 2018). Adicionalmente, una práctica de manejo que genere un incremento en el COS contribuye también al secuestro de C atmosférico, proveyendo un importante servicio ecosistémico de mitigación del cambio climático (Adetunji et al., 2020; Lenka y Lal, 2013; McClelland et al., 2020; Poeplau y Don, 2015). Por otra parte, la cobertura del suelo reduce las fluctuaciones abruptas en el contenido de agua y en la temperatura, capaces de generar la desintegración de los agregados (Blanco-Canqui y Ruis, 2018). Un suelo mejor estructurado tiene un sistema poroso más adecuado para el desarrollo

de las plantas y tiene mejores propiedades hidráulicas, favoreciendo la entrada de agua al sistema (Sasal et al., 2006). Además, la presencia de un cultivo en lugar del barbecho invernal puede disminuir las pérdidas de suelo por escorrentía (Sasal, 2012) y erosión eólica (Díaz-Zorita et al., 2002). Por lo tanto, los CC potenciarían las ventajas de la SD derivadas de mantener el suelo cubierto, compitiendo a la vez con las malezas durante el barbecho (Sharma et al., 2018). Los CC son hoy en día una de las herramientas en estudio para recuperar suelos degradados (Poeplau y Don, 2015; Recio-Vazquez et al., 2014), estimulando la agregación y la formación de estructura favorable (Behrends Kraemer et al., 2017; Blanco-Canqui et al., 2015; Duval et al., 2014; 2016). En la figura 1.4 se sintetizan los principales mecanismos por los cuales los CC pueden mejorar la calidad física y química de los suelos.

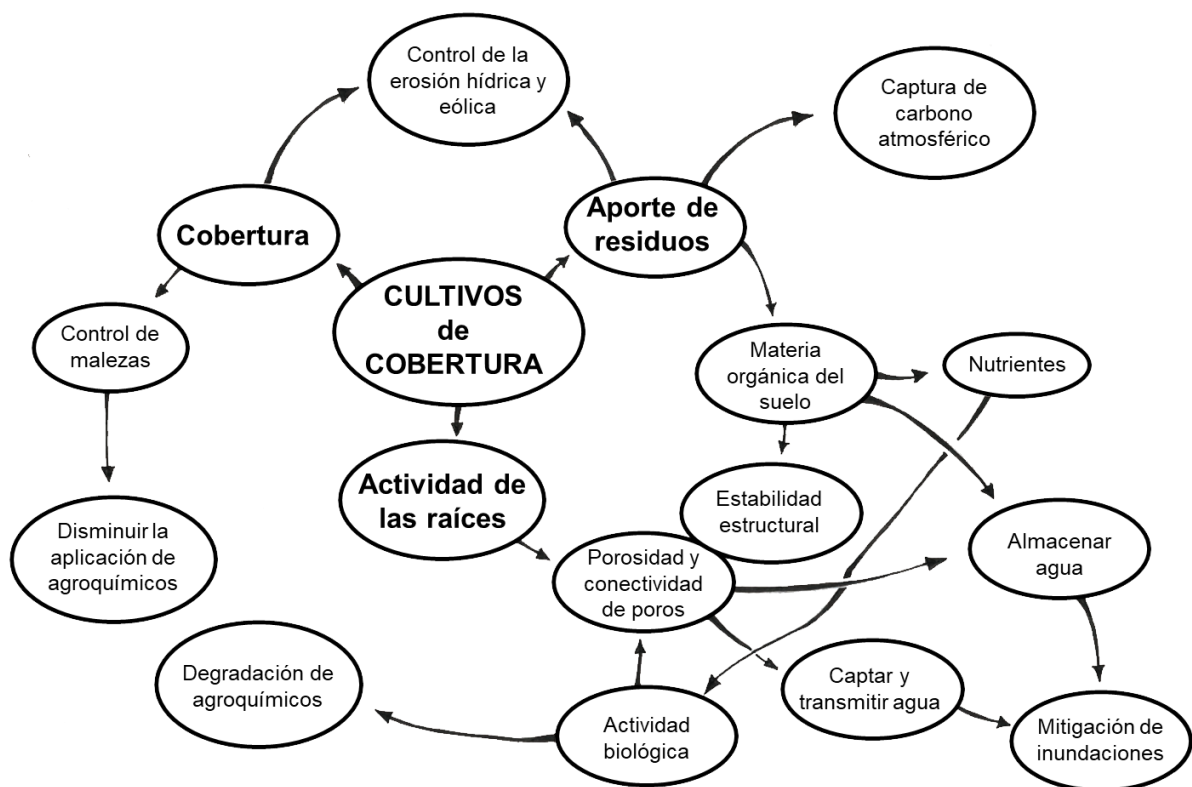


Figura 1.4. Principales mecanismos de acción y servicios ecosistémicos de los cultivos de cobertura.

Diversas especies y mezclas de especies han sido propuestas y utilizadas como CC, comprendiendo tres familias principales: gramíneas, leguminosas y brassicáceas (crucíferas) (AAPRESID, 2020). Las distintas especies tienen efectos distintos sobre la calidad del suelo, determinados principalmente por la cantidad y calidad de sus residuos y por los patrones de desarrollo de sus raíces (Villamil et al., 2006). Las gramíneas se emplean por la capacidad estructurante de su sistema radical en cabellera, y por su aporte de residuos orgánicos de alta calidad, que garantizan una cobertura más duradera. Además, las gramíneas pueden reducir la lixiviación de nitratos residuales (Taboada y Varela, 2014). Las leguminosas cumplen el rol de fijar

nitrógeno atmosférico que pueden liberar luego como nutriente para el siguiente cultivo (Sainju et al., 2006; Sharma et al., 2018). Las especies de la familia de las brasicáceas se emplean como “descompactadores biológicos” y para mejorar la infiltración de agua, debido a la fuerza de su sistema radical para atravesar capas compactadas de suelo (Blanco-Canqui et al., 2015; Calonego et al., 2017; Restovich et al., 2011). Esta familia también se emplea por la capacidad de los exudados de sus raíces para controlar malezas y plagas (Taboada y Varela, 2014). El uso de consociados de especies permite complementar los beneficios de las distintas familias. En zonas templadas las especies más utilizadas son gramíneas (principalmente centeno, *Secale cereale* L. M. Bieb., avena, *Avena sativa* L., cebada, *Hordeum vulgare* L., trigo, *Triticum aestivum* L., triticale, x *Triticosecale*, y raigrás, *Lolium multiflorum* L.) y leguminosas (principalmente trébol, *Trifolium* L., y vicia, *Vicia* L.) (Scianca, 2010). En la figura 1.5 se muestran las principales especies usadas en Argentina. El crecimiento de los CC puede ser interrumpido de modo químico o mecánico. La interrupción en general se realiza antes de que el CC alcance la madurez, buscando limitar de ese modo el consumo de agua y nutrientes en el período de mayor requerimiento y más cercano a la siembra del cultivo principal (Alfonso et al., 2020).

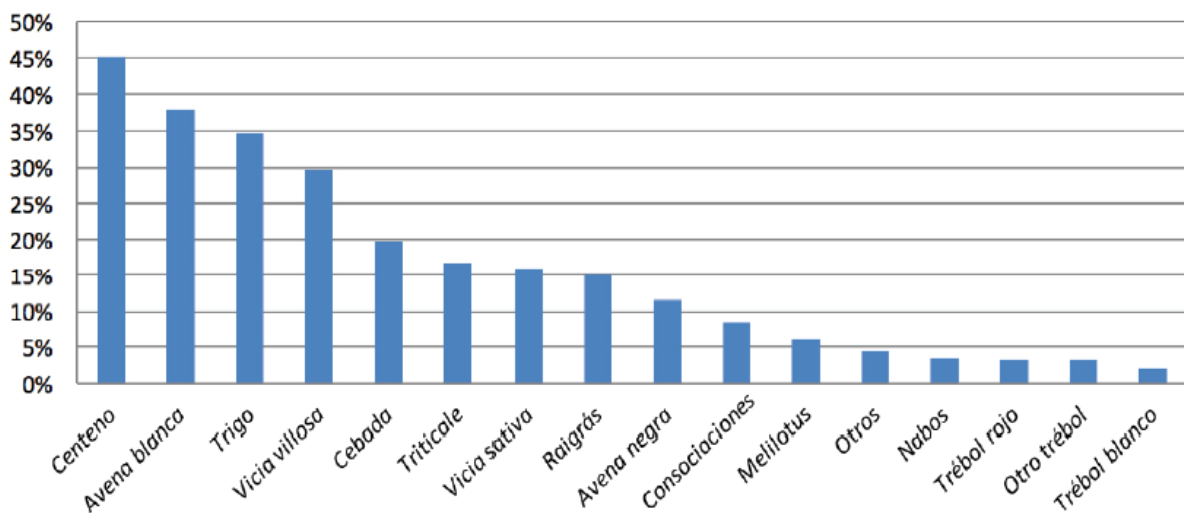


Figura 1.5. Especies más utilizadas como cultivos de cobertura en Argentina. Extraído de AAPRESID (2018).

En Argentina, la adopción de los CC ha crecido en los últimos años, principalmente en regiones semiáridas, y con diversos objetivos entre los que se destacan el control de malezas y el aporte de MO (Figura 1.6). Un informe de la campaña 2018-2019 indica que un 13 % de los productores usan esta práctica (AAPRESID, 2020). Sin embargo, como limitante a su adopción se encuentra que, además de requerir una inversión adicional, incorrectamente manejados los CC pueden competir con los cultivos de renta por el agua y los nutrientes (Adetunji et al., 2020; Pinto et al., 2017). A esto se suma un limitado conocimiento sobre el efecto de los CC en la calidad del suelo bajo diferentes condiciones edáficas, climáticas y de manejo (Blanco-Canqui et al., 2015). Si bien existen numerosos estudios sobre el efecto de los CC en la MO, los resultados son muchas veces contradictorios. Lo mismo

ocurre con el efecto sobre las propiedades físicas e hidráulicas. Esto puede deberse a que el efecto de los CC sobre el suelo depende de muchos factores, que incluyen el tipo de suelo y sus condiciones iniciales, los cultivos elegidos como cultivo principal y como cobertura, las condiciones climáticas particulares, y cuestiones vinculadas con el manejo como las fechas de siembra y terminación (Blanco-Canqui et al., 2015). Por lo tanto, hace falta reunir más información sobre el efecto de los CC en distintos tipos de suelo (Blanco-Canqui et al., 2015).

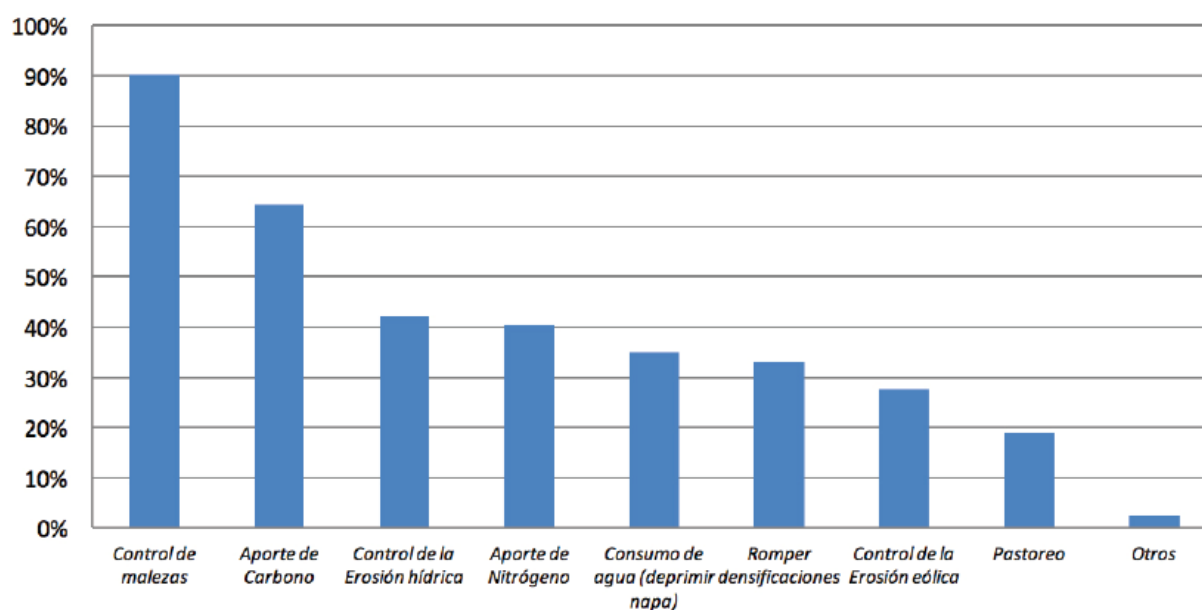


Figura 1.6. Principales motivos para la adopción de cultivos de cobertura en Argentina. Extraído de AAPRESID (2018).

1.3.1. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la materia orgánica del suelo

La MO es un componente fundamental del suelo, directamente relacionado con el aporte de nutrientes, pero que también afecta otros rasgos importantes del suelo, como ser la estructura y su estabilidad, la capacidad de retención hídrica y la consistencia para el laboreo (Adetunji et al., 2020; Blanco-Canqui y Ruis, 2018). La MO es uno de los componentes del suelo más afectados por las prácticas agrícolas. El contenido y la calidad de la MO del suelo se ven determinados por las prácticas de manejo y por la cantidad y características de los residuos orgánicos que ingresan al suelo (Cambardella y Elliot, 1992; Ding et al., 2006). El contenido de MO del suelo se estima típicamente mediante la medida del COS. Uno de los motivos para incluir CC en las rotaciones agrícolas es que pueden incrementar el contenido de MO (Blanco-Canqui et al., 2015; Dabney et al., 2010; Poeplau y Don, 2015). Durante su crecimiento y tras su terminación, los CC aportan residuos orgánicos en superficie provenientes de la parte aérea de las plantas, y en profundidad provenientes de las raíces y de la biota asociada a la rizósfera (Poeplau y Don, 2015). Estos residuos pueden pasar a constituir parte de la MO del suelo, en una proporción variable según condiciones de temperatura, aireación, humedad, naturaleza de los residuos, tipo de suelo y actividad

biológica, entre otras (Blanco-Canqui et al., 2015). Por lo tanto, se espera que los CC generen un incremento en el COS (Poeplau y Don, 2015).

Numerosos estudios reportan un aumento en el COS tras la inclusión de CC en comparación con el barbecho desnudo (Álvarez et al., 2017; Beltrán et al., 2018; 2021; Blanco-Canqui et al., 2011; 2015; Ding et al., 2006; Duval et al., 2016; Jian et al., 2020; Sharma et al., 2018) (Tabla 1.1). En un meta-análisis incluyendo varios órdenes de suelo, Jian et al. (2020) encontraron que los CC causan un incremento medio en el COS de 30 % en suelos bajo SD. Algunos estudios indican que la mezcla de especies puede producir más biomasa generando un mayor incremento en el COS (Sainju et al., 2000, 2006; Stavi et al., 2012), mientras que otros reportan lo contrario (Nielsen et al., 2015). En otros casos, los sistemas con CC presentaron menores contenidos de COS en comparación con un barbecho desnudo (Poeplau y Don, 2015). Según algunos autores, esto puede deberse a que el ingreso al sistema de nuevos residuos puede estimular la actividad microbiana, incrementando en un principio las tasas de mineralización (efecto de *priming*) (Galantini, 2008; Huang et al., 2021; Pausch et al., 2013; Poeplau y Don, 2015). Álvarez et al. (2017) señala que este fenómeno solo se observó en ensayos de menos de 5 años de duración. En otros casos, los CC no generaron cambios significativos en el contenido de COS (Beltrán et al., 2021; Fronning et al., 2008; Nascente y Stone, 2018; Romaniuk et al., 2018; Yang et al., 2004).

El efecto de los CC en el COS depende de múltiples factores, entre ellos de condiciones edáficas (como la textura y el contenido inicial de COS), de condiciones climáticas, de las especies empleadas como cultivo principal y como cobertura y de los años transcurridos desde la adopción de la práctica (Blanco-Canqui et al., 2015; Ding et al., 2002; Jian et al., 2020). En un meta-análisis incluyendo 67 estudios de la Región Pampeana, se describe que los CC generalmente incrementan el COS, siendo este incremento mayor en suelos de textura gruesa que en suelos de textura fina (9 vs 4 % en promedio) (Álvarez et al., 2017). Resultados similares fueron obtenidos por Beltrán et al. (2021). Por el contrario, Jian et al. (2020) reportaron que el incremento promedio en el COS tras la inclusión de CC fue mayor en los suelos de textura fina que en los suelos de textura gruesa o media (39,5 % contra 11,4 % y 10,3 %, respectivamente). McClelland et al. (2020) observó que en climas templados la respuesta del COS a la presencia de CC es mayor en suelos con mayor contenido de arcilla (>20 %). Blanco-Canqui et al. (2015), también reportaron que suelos con mayor contenido de arcilla tienen una mayor capacidad para acumular COS. Por otra parte, mientras algunos autores afirman que el incremento en el COS tras la inclusión de CC es mayor en suelos erosionados con bajo contenido de COS (Blanco-Canqui et al., 2015), otros reportaron que la acumulación de C es más fácil en suelos con alto contenido inicial (Arrouays et al., 2006). En cuanto a las especies empleadas, la cantidad de biomasa producida y la calidad de los residuos van a influir en el balance final de COS. En algunos casos, un balance adecuado entre cultivos de gramíneas y leguminosas parece determinar el incremento en el COS (Beltrán et al., 2018; Duval et al., 2016; Villamil et al., 2006). Varela et al. (2014), observaron que los CC de avena o centeno produjeron un aumento en el COS en un cultivo de soja, mientras que el empleo de raigrás no produjo diferencias significativas. Jian et al. (2020) observaron que, si bien los CC tienden a incrementar el COS, estos no generaron un incremento cuando los cultivos principales fueron maíz-soja, maíz-trigo/soja o monocultivo de soja.

Si bien existen estudios que muestran un incremento en el COS en el corto plazo (Arlauskiené et al., 2010; Mukherjee y Lal, 2015), la mayoría de los trabajos coinciden en que los incrementos de C solo son observables en plazos de tiempo mayores (por ejemplo, a partir de los 4 años) (Blanco-Canqui et al., 2015; Duval et al., 2016; Fronning et al., 2008; Plaza-Bonilla et al., 2014). Esto puede deberse a que la medida del COS no es un parámetro lo suficientemente sensible para detectar cambios pequeños en el corto plazo (Kay y VandenBygaart, 2002; Purakayastha et al., 2008). Si bien el contenido de COS es el estimativo más usado del contenido de MO y unos de los principales indicadores de la fertilidad edáfica (Nelson y Sommers, 1996; Romaniuk et al., 2018), este parámetro no da cuenta de la enorme complejidad de la MO en el suelo. La MO engloba un conjunto complejo de grupos o *pools* de moléculas con diferentes propiedades y con gran variabilidad en su composición química, tamaño y peso molecular, y por lo tanto con diferente resistencia a la degradación y funciones dentro de la matriz del suelo (Olk et al., 2019a; Swift, 1996). Las tasas de descomposición de la MO pueden variar entre unas pocas horas y varios miles de años (Kay y VandenBygaart, 2002; Swift, 1996). Como en la mayoría de los suelos una importante proporción del COS está constituida por C más estable, con tiempos de residencia de cientos a miles de años y alta resistencia a la degradación, muchas veces la determinación del contenido total de COS no es suficientemente sensible para detectar cambios en períodos cortos de tiempo (Plaza-Bonilla et al., 2014). Una aproximación práctica al estudio de la composición de la MO es el estudio del contenido de C en fracciones de MO obtenidas por diferentes métodos. Estas fracciones resultan en conjuntos de moléculas arbitrarios y dependientes del método, pero que comparten ciertas propiedades físicas o químicas, y de algún modo representan *pools* de MO de diferente edad y estabilidad (Cambardella y Elliott, 1992; Christensen, 2001). En general, el estudio de distintas fracciones (y en particular de las fracciones más dinámicas de la MO) permite detectar cambios inducidos por el manejo en períodos de tiempo más cortos que el estudio del COS por sí solo (Bongiovanni y Lobartini, 2006; Ding et al., 2006; Duval et al., 2013; Plaza-Bonilla et al., 2014).

Una manera de fraccionar la MO es a través de su solubilidad a diferentes pHs. De esta manera, se obtienen tres fracciones principales: los ácidos fúlvicos (AF), los ácidos húmicos (AH) y las huminas (Olk et al., 2019b). Estas fracciones se relacionan con familias de moléculas con distinto grado de humificación, composición química y peso molecular, y por lo tanto con distinta resistencia a la degradación biológica y distintas propiedades y funciones dentro del suelo (Benites et al., 2003; Yang et al., 2004). Los AF son moléculas más simples, de menor peso molecular y formación más reciente, y en general se las asocia a un *pool* de MO más dinámico (Ding et al., 2006). Los AH incluyen moléculas de mayor tamaño y complejidad que los AF, y exhiben una resistencia a la degradación y tiempos de residencia en el suelo intermedios. Las huminas incluyen moléculas más grandes y complejas, con mayor grado de humificación y resistencia a la degradación. Suelen ser la fracción más abundante y representan un stock más estable de COS, cumpliendo un papel importante en el secuestro de C (Yang et al., 2004). Otro método ampliamente difundido consiste en obtener distintas fracciones granulométricas, que se relacionan con distinto grado de protección fisicoquímica y de interacción con la fase mineral. La fracción gruesa del carbono orgánico particulado (COPg, que en general se define entre 105-2000 μm) y la intermedia (COPf, entre 53 y 105 μm) son las más lábiles y generalmente se relacionan con fracciones más jóvenes de la MO. La fracción asociada a minerales (COM, menor a 53 μm), incluye CO íntimamente asociado a la

fracción mineral, y por lo tanto más protegido contra la degradación (Six et al., 2002). La abundancia de cada fracción es en general cuantificada determinando el contenido de C en cada una de ellas.

Varios estudios sobre el efecto de los CC muestran que, si bien estos no generaron diferencias observables en el contenido total de COS, estas diferencias sí fueron significativas en algunas de las fracciones (Tabla 1.1). Sin embargo, los trabajos que estudian las fracciones del COS obtenidas por fraccionamiento químico (AF, AH y huminas) son escasos. En un estudio de largo plazo, Yang et al. (2004) encontraron que los CC solo afectaron a la fracción de las huminas, que las diferencias con el control fueron significativas en todas las profundidades estudiadas (hasta los 25 cm) y que la extensión del efecto difirió según la especie empleada como CC. Guimãraes et al. (2013) encontraron resultados similares, donde los CC no afectaron el contenido de AH ni AF, pero sí generaron un incremento en el contenido de huminas. Arlauskienė et al. (2010) encontraron que los CC generaron un incremento en la fracción de los AH, observable uno y dos años después de iniciado el ensayo. Ding et al. (2006) encontraron que los CC podían incrementar el contenido de COS, modificando también la composición química de las fracciones de AF y AH. Estos autores observaron que una mezcla de vicia y centeno generaba AF y AH menos aromáticos, y por lo tanto más dinámicos (más susceptibles a las transformaciones biológicas) que el centeno como única especie.

En cuanto al estudio de fracciones del COS obtenidas por métodos físicos, los resultados son variables (Tabla 1.1). Romaniuk et al. (2018) no observaron diferencias en el contenido de COS entre sistemas con y sin CC, pero sí en el COPg. Beltrán et al. (2021) observaron incrementos en COPg y COPf tras 8 años de CC, que no en todos los casos produjeron incrementos observables en el COS. García-González et al. (2018) observaron un incremento en el COPg+f en los primeros 4 años desde incluido el CC (sin diferencias significativas en el COS), mientras que en años subsiguientes esta diferencia desapareció, observándose en cambio un incremento en el contenido de COS. Ding et al. (2006) encontraron que los CC generaron aumentos significativos en la fracción más liviana de la MO (separada por densidad). Duval et al. (2018) hallaron un incremento en el contenido de COPf en rotaciones que incluían CC en un ensayo de 5 años de duración. Beltrán et al. (2018) encontraron que el incremento en el contenido de COS en sistemas con CC fue de 23 %, mientras que al estudiar las fracciones granulométricas los aumentos observados fueron de 61 % y 39 % en COPg y COPf, respectivamente. Duval et al. (2016) encontraron que el efecto del CC fue más importante sobre el COPg, afectando el contenido de COPf y COM en períodos de tiempo mayores. Estos autores observaron incrementos en los contenidos de COPg, COPf y COS, pero una disminución en el COM, lo que indica que además de generar un aumento en la MO del suelo, los CC pueden generar un cambio en la composición de la misma. Luo et al. (2020) señalan que las diferentes fracciones del COS pueden tener distintas dinámicas temporales. Esto puede llevar a resultados contradictorios o difíciles de interpretar, en particular al evaluar la respuesta de las fracciones más lábiles, que pueden presentar una elevada variabilidad temporal (Wander, 2004). Existe poca información sobre la dinámica temporal del COS y de su composición (Luo et al., 2020), y no se han encontrado trabajos que reporten la variabilidad temporal de las fracciones del COS durante un ciclo de cultivo.

Tabla 1.1. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) y sus diferentes fracciones en la literatura revisada.

Trabajo	Tipo de estudio	Orden de suelo	Textura	Cultivo principal	CC	Duración (años)	Labranza	Efecto sobre						
								COS	COPg	COPf	COM	AF	AH	huminas
Beltrán et al. (2021)		Molisoles	franco arcilloso/ franco limoso	S	gramíneas	8	SD	+ o ns	+	+	ns	*	*	*
Jian et al. (2020)	M	V	V	V	V	V	V	+	*	*	*	*	*	*
McClelland et al. (2020)	M	V	V	V	V	V	V	+, - o ns	*	*	*	*	*	*
Chalise et al. (2019)		Hapludol Calcico/ Pachico	limoso/ franco limoso	M - S	centeno + vicia	9-11	SD	ns	*	*	*	*	*	*
Beltrán et al. (2018)		Argiudol Típico	franco limoso	S	avena	8	SD	+	+	+	ns	*	*	*
García-González et al. (2018)		Calcixerept típico	franco arcillo limoso	M y girasol	V	1-10	SD	+ o ns	+ o ns	+ o ns	*	*	*	*

Nascente y Stone (2018)		Haplorthox Típico	franco arcilloso	S / arroz	V	2	SD	ns	*	*	*	*	*	*
Romaniuk et al. (2018)		Argiudol Típico	franco limoso	V	T	8	SD	ns	+	ns	ns	*	*	*
Álvarez et al. (2017)	M	V	V	V	V	V	V	+	*	*	*	*	*	*
Duval et al. (2016)		Argiudol Típico	franco limoso	S	avena + vicia	3, 4, 6	SD	ns + +	ns + +	ns ns +	- ns ns	*	*	*
Blanco-Canqui et al. (2015)	R	V	V	V	V	V	V	+	*	*	*	*	*	*
Mukherjee y Lal (2015)		Argiaquol típico	franco arcillo limoso	M/S	arveja y nabo	1	SD	+	*	*	*	*	*	*
Poeplau y Don (2015)	M	V	V	V	V	1-54	V	+	*	*	*	*	*	*
Varela et al. (2014)		Hapludol Tipto-árgico	franco arcilloso	S	V	5	SD	+ o ns	*	*	*	*	*	*
Guimãraes et al. (2013)		Ultisol (Hapludult típico)	franco arenoso	coco	legumi- nosas	*	LC	+	*	*	*	ns	ns	+
Blanco-Canqui et al. (2011)		Argiustol ú dico	franco limoso	T- sorgo	V	15	SD	+	*	*	*	*	*	*
Arlauskienė et al. (2010)		Cambisol	franco arcilloso	T	V	1 y 2	*	+	*	*	*	*	+	*

Fronning et al. (2008)		Haplaquol	franco	M-S	centeno	1-3	SD	ns	ns	ns	ns	*	*	*
Ding et al. (2006)		Dystrudept Fluventico	franco arenoso	M	V	9	LC	+ o ns	*	*	*	*	*	*
Villamil et al. (2006)		Argiudol Ácuico	franco limoso	S – M	V	4 y 5	SD	+ o ns	*	*	*	*	*	*
Yang et al. (2004)		Humaquept Fluvaqentico	franco	cereales	V	13	SD	ns	*	*	*	ns	ns	+

El efecto de los CC se expresa como incrementos (+), disminuciones (-), cambios no significativos (ns) y no determinado (*). Solo estudios que reportan diferencias entre CC y un tratamiento control (sin CC) fueron incluidos. La letra V significa “varios” (especies de cultivo, clases de suelo, años bajo CC, o sistemas de labranza). Se especifica el tipo de estudio en caso de ser un meta-análisis (M) o un trabajo de revisión (R). M=maíz, S=soja, T=trigo. SD=siembra directa, LC=labranza convencional. COPg=carbono orgánico particulado grueso, COPf=carbono orgánico particulado fino, MOC=carbono orgánico asociado a minerales, AF=ácidos fúlvicos, AH=ácidos húmicos.

1.3.2. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la calidad física del suelo

La CFS resulta determinante de procesos agronómicos y ambientales básicos como la germinación de las semillas, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y la resistencia del suelo a los eventos de compactación o erosión (Topp et al., 1997). La CFS se relaciona con propiedades mecánicas y de fuerza que determinan la posibilidad de las raíces de desarrollarse y explorar el perfil del suelo, y con la capacidad del suelo para almacenar y transmitir agua, aire y nutrientes (Lozano et al., 2016; Reynolds et al., 2009; 2015). La CFS es evaluada a partir de distintos indicadores, que pueden dividirse en aquellos que estiman la capacidad de almacenaje de agua, o indicadores estáticos, e indicadores que describen el movimiento de agua en el suelo, llamados indicadores dinámicos (Iovino et al., 2016). Los indicadores estáticos dan una idea de la distribución de los poros entre distintos tamaños, o más precisamente entre poros que retienen el agua del suelo con una determinada energía, e incluyen indicadores derivados de la CRH como el porcentaje de poros de distinto tamaño, el agua disponible para la planta (ADP), el punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo y capacidad de aireación (Reynolds et al., 2009). Indicadores dinámicos como la conductividad hidráulica a distintas tensiones ($K(h)$), las porosidades efectivas y la conectividad de familias de poros de distinto tamaño, dan cuenta del movimiento del agua en el suelo, e incluyen medidas obtenidas de ensayos de infiltración.

Los CC pueden afectar las propiedades físicas e hidráulicas del suelo por distintos mecanismos (Álvarez et al., 2017; Blanco-Canqui et al., 2011; Liesch et al., 2011). De manera directa, los CC modifican la estructura mediante la actividad de las raíces y generan porosidad debido al decaimiento de las mismas (Basche y DeLonge, 2019; Six et al., 2004). Los CC protegen también al suelo de los eventos externos como el impacto de las gotas de lluvia y el viento, que pueden degradar la estructura del suelo (Mukherjee y Lal, 2015). Por otra parte, la cobertura tiende a amortiguar los cambios abruptos de temperatura y humedad, que juegan un rol importante en los ciclos de estructuración del suelo. De manera indirecta, los CC pueden generar cambios en el contenido, composición y distribución de la MO, que tiene un rol fundamental en la generación y mantenimiento de la estructura (Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Novelli et al., 2013; 2017; Taboada y Álvarez, 2008). Tanto el aporte de MO como la generación de un ambiente edáfico adecuado estimulan la actividad de la micro y macrofauna del suelo, que tiene un papel importante en la generación de porosidad y estructura, y en la estabilización de los agregados (Domínguez y Bedano, 2016). La existencia de un sistema poroso bien conectado y funcional, genera las condiciones para el desarrollo de las plantas y el ingreso de agua en el suelo (Bongiovanni y Lobartini, 2006; Kay y VandenBygaart, 2002; Sasal et al., 2017). Sin embargo, el aumento en el tránsito de maquinaria por la intensificación agrícola podría contrarrestar los efectos beneficiosos del aporte de MO y de la actividad de biota y raíces, generando eventos de compactación y pérdida de estructura (Behrends Kraemer et al., 2017).

Estudiar el efecto de los CC en la CFS resulta de especial interés en el caso de los Molisoles, que son los suelos más abundantes en la Región Pampeana (Wilson et al., 2020). Estos suelos, y en particular aquellos de textura más fina (los Argiudoles), que presentan un alto contenido de limo y abundancia de arcillas no expansivas, son muy susceptibles a los eventos de compactación y al desarrollo de estructura laminar

o masiva (Chagas et al., 1994; Sandin et al., 2018; Sasal et al., 2006; 2017; Taboada et al., 1998). Por lo mismo, los Argiudoles tienen una baja capacidad de reestructuración abiótica, por lo que su estructuración y estabilidad estructural depende fuertemente de la actividad biológica (Behrends Kraemer et al., 2019; Wu et al., 1997). La presencia de CC podría permitir revertir procesos de degradación física, debilitando la estructura laminar u otras capas compactadas gracias a la actividad de las raíces y a la capacidad estructurante de la MO y biota asociada (Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Calonego et al., 2017; Sasal et al., 2017). Suelos de textura más gruesa tienden a tener estructuras más débiles, pero también una mejor respuesta a la presencia de MO (Behrends Kraemer et al., 2019; Blanco-Canqui et al., 2015).

En relación al efecto de los CC sobre indicadores estáticos de CFS, la mayor parte de la bibliografía reporta el efecto sobre la PT y la Dap. En este sentido, diferentes autores han encontrado que los CC pueden generar aumentos en la PT y disminuciones en la Dap en relación a un barbecho invernal desnudo (Basche y DeLonge, 2017; Blanco-Canqui et al., 2015; Keisling et al., 1994; Nascente y Stone, 2018; Villamil et al., 2006) (Tabla 1.2). Esto es resultado del efecto de aireación y estructuración de las raíces, del incremento en los residuos orgánicos y en el contenido de MO, y de una mayor actividad de la fauna del suelo (Villamil et al., 2006). Por el contrario, existe bibliografía para la Región Pampeana que indica un aumento de la Dap como resultado de la intensificación agrícola con inclusión de cultivos de invierno, atribuible al aumento del tránsito de maquinaria (Behrends Kraemer, 2015; Duval et al., 2015). Behrends Kraemer (2015), si bien encontró un aumento en la Dap, también reportó un aumento en la estabilidad de agregados, indicando que es posible que la intensificación de cultivos genere mejores rasgos estructurales más allá del efecto del tránsito intensificado de maquinaria. Otros autores no observaron efecto de los CC sobre estas variables, tanto en el corto (Calonego et al., 2017; Haruna et al., 2018; Mukherjee y Lal, 2015; Waggoner y Denton, 1989) como en el largo plazo (Blanco-Canqui et al., 2011; Chalise et al., 2019). Un meta-análisis sobre el efecto de los CC en la Región Pampeana, indica que la Dap se ve mínimamente afectada por la presencia de CC, mostrando incrementos pequeños (del orden de los $0,1 \text{ g.cm}^{-3}$) en 63 % de los casos, disminuciones del mismo orden en 29 % de los casos y ningún cambio en los demás (Álvarez et al., 2017). Sin embargo, la PT y la Dap no son indicadores muy sensibles a las prácticas de manejo, y no dan cuenta de la abundancia relativa de poros de distinto tamaño ni de la conectividad de esos poros (Haruna et al., 2018, Soracco et al., 2015). El suelo es una matriz compleja, dentro de la cual el sistema poroso comprende una red de poros de distintas formas y tamaños, que cumplen distintos roles en captar, distribuir y almacenar agua en el suelo. El estudio de la distribución del tamaño de poros (DTPo) permite cuantificar el volumen ocupado por familias de poros de distinto tamaño, a las que se atribuyen distintas funciones. El estudio de la fracción de poros de mayor tamaño, los macroporos, resulta de especial interés ya que son los principales responsables del movimiento de agua y de su redistribución en el perfil del suelo (Holden, 2009; Watson y Luxmoore, 1986). Además, esta fracción es en general la más dinámica ya que está determinada principalmente por la estructura y por tanto es sensible a las prácticas de manejo y a la actividad biológica. Diversos estudios reportan que los CC pueden incrementar el volumen de macroporos (Blanco-Canqui et al., 2015; Bodner et al., 2014; Gabriel et al., 2019; Haruna et al., 2018; Nascente y Stone, 2018; Yu et al., 2016). Calonego et al. (2017) observaron que solo dos años de un CC de crotalaria (*Crotalaria* L.) resultaron en un incremento de los macroporos respecto al barbecho invernal. Villamil et al. (2006) también observaron incrementos en el volumen de macroporos tras dos

años de incluir centeno como CC en una rotación de maíz/soja, y un incremento en el volumen de mesoporos al incluir centeno o vicia como CC, acompañada por una disminución en el volumen de poros ocluidos. Calegari et al. (2013), por el contrario, no observaron cambios en la macroporosidad en un ensayo de 19 años de duración, donde comparaban el efecto de diferentes CC y del barbecho invernal desnudo en un cultivo de maíz.

El estudio de la DTPo a partir de la CRH permite también el cálculo de diversos indicadores que dan cuenta de la capacidad de un suelo para retener agua a cierto potencial, lo que se relaciona a su vez con la disponibilidad de agua para el cultivo. Entre estos indicadores se encuentran el ADP, que da una medida de la capacidad del suelo para almacenar agua retenida en un rango de potenciales que podría ser aprovechable para ciertas plantas, y se obtiene como la diferencia entre el contenido de humedad del suelo a dos potenciales fijos llamados capacidad de campo y punto de marchitez permanente (PMP) (Reynolds et al., 2009). Algunos trabajos reportan aumentos en el ADP en sistemas con CC en comparación con aquellos sin CC, mientras que otros encontraron disminuciones (Tabla 1.2) (Álvarez et al., 2017; Duval et al., 2016). Basche et al. (2016) encontraron que, tras 13 años, un CC de centeno aumentó el contenido de agua en capacidad de campo en 10-11 % y el ADP un 21-22 %, en relación al barbecho invernal desnudo. Basche y DeLonge (2017) observaron que los CC incrementaron el contenido de agua en capacidad de campo, especialmente en estudios de más de 7 años de antigüedad, y con mayores incrementos en regiones con precipitaciones anuales menores a 900 mm y en suelos de textura gruesa. Villamil et al. (2006) también observaron un incremento en el ADP y en el agua contenida entre capacidad de campo y saturación, de distinta magnitud dependiendo de la secuencia de cultivos empleada, después de dos años de la inclusión de CC. Mukherjee y Lal (2015) y Blanco-Canqui et al. (2011), por el contrario, no observaron diferencias en la capacidad de retención hídrica en ensayos de 1 y 15 años de duración, respectivamente.

Tabla 1.2. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre indicadores de calidad física de suelos en la literatura revisada.

Trabajo	Tipo de	Orden de suelo	Textura	Cultivo principal	CC	Duración (años)	Labranza	Efecto sobre									
								Dap	PT	θ_{ma}	θ_{me}	ADP	FC	K/ Inf _b	ϵ_{ma}	ϵ_{me}	CW _{PT}
Basche y DeLonge (2019)	M	V	V	V	V	V	SD/LC	*	*	*	*	*	*	+	*	*	*
Chalise et al. (2019)		Calcic/ Pachic Hapludol	limoso/ franco limoso	M - S	centen o + vicia	9-11	SD	- o ns	*	*	*	ns	ns	+	*	*	*
García-González et al. (2018)		Calcixerept típico	franco arcillo limoso	M y girasol	V	1-10	SD	*	*	*	*	*	+ o ns	+ o ns	*	*	*
Haruna et al. (2018)		Aeric Fluvaquent	franco limoso	M	centen o	4	SD/LC	ns	ns	+ o ns	+ o ns	*	*	ns	*	*	*
Nascente y Stone (2018)		Haplorthox Típico	franco arcilloso	S / arroz	V	2	SD	- o ns	+ o ns	+ o ns	*	ns	*	*	*	*	*
Alvarez et al. (2017)	M	V	V	V	V	1-15	*	- o ns	ns	*	*	*	*	+	*	*	*
Basche y DeLonge (2017)	M	V	V	V	V	V	V	*	+	*	*	*	+ o ns	*	*	*	*
Calonego et al. (2017)		Rhodudalf Típico	arcilloso	V	V	1,3 y 9	SD	ns	ns	+ o ns	ns	*	*	*	*	*	*

Blanco-Canqui et al. (2015)	R	V	V	V	V	V	V	- o ns	+	*	*	*	*	+ o ns	+	*	+
Mukherjee y Lal (2015)		Argiaquol típico	franco arcillo limoso	M - S	arveja y nabo	1	SD	ns	*	*	*	ns	ns	*	*	*	*
Blanco-Canqui et al. (2011)		Argiustol údico	franco limoso	T-sorgo	V	15	SD	- o ns	*	*	*	ns	ns	+ o ns	*	*	*
Bodner et al. (2008)		Chernozem calcareo	franco / franco arenoso	cebada	V	1 y 2	LC	*	*	*	*	*	*	- o ns	+, - o ns	- o ns	*
Carof et al. (2007)		Orthic Luvisol	franco	T	V	3 y 4	SD	*	+	ns	ns	*	*	+, - o ns	+ o ns	*	ns
Villamil et al. (2006)		Argiudol Ácuico	franco limoso	S – M	V	4 y 5	SD	-	+	+ o ns	+	+	+	ns	*	*	*
Keisling et al. (1994)		Hapludalf Típico + Aerie Ochraqualf	limoso	algodón	V	17	LC	-	+	+	*	+	*	+	*	*	*
Wagger y Denton (1989)		Paleudults Ácuico	franco arenoso	M	V	3	SD	ns	ns	*	*	*	*	ns	*	*	*

El efecto de los CC se expresa como incrementos (+), disminuciones (-), cambios no significativos (ns) y no determinado (*). Solo estudios que reportan diferencias entre CC y un tratamiento control (sin CC) fueron incluidos. Se especifica el tipo de estudio en caso de ser un meta-análisis (M) o un trabajo de revisión (R). La letra V significa “varios” (especies de cultivo, clases de suelo, años bajo CC, o sistemas de labranza M=maíz, S=soja, T=trigo. SD=siembra directa, LC=labranza convencional. Dap=densidad aparente, PT=porosidad total, θ_{ma} =volumen de macroporos, θ_{me} =volumen de mesoporos, ADP=agua disponible para la planta, FC=capacidad de campo, K=conductividad hidráulica, Inf_b =tasa de infiltración básica, ϵ_{ma} =macroporosidad efectiva, ϵ_{me} =mesoporosidad efectiva, Cw_{PT} =conectividad de poros.

En cuanto a los indicadores dinámicos de CFS, diversos autores han reportado que la introducción de CC puede afectar las propiedades que determinan la entrada del agua en el suelo y su dinámica (Álvarez et al., 2017; Behrends Kraemer et al., 2015; Blanco-Canqui et al., 2011; Bodner et al., 2008; Carof et al., 2007; Duval et al., 2015; Haruna et al., 2018; Liesch et al., 2011) (Tabla 1.2). Como se mencionó antes, en lotes con CC es esperable una mayor actividad biológica que bajo un barbecho desnudo. La actividad biológica no solo incrementa el volumen sino también la conectividad de los macroporos (Villarreal et al., 2020) y la porosidad conductora de agua (Blanco-Canqui et al., 2011). En el caso de suelos susceptibles a la formación de estructura laminar, un mayor período de actividad de las raíces en el año puede favorecer el desarrollo de una estructura fragmentaria, reduciendo la estructura laminar que tiende a restringir la entrada de agua al suelo (Sasal et al., 2017). Por lo tanto, es de esperar que los CC generen un incremento en la conductividad hidráulica (K) y las tasas de infiltración. Basche y DeLonge (2019) encontraron que introducir CC llevaba a un incremento promedio en las tasas de infiltración de un 45 % bajo SD. Álvarez et al. (2017), en otra revisión, hallaron resultados similares para la Región Pampeana, donde la infiltración de agua aumentó en 82 % de los trabajos revisados, con un incremento promedio de 36 %. Estos autores observaron mayores incrementos en las tasas de infiltración pasados 4 años de la inclusión de CC, y en suelos de textura más gruesa. Chalise et al. (2019) reportaron incrementos en la tasa de infiltración de 80 % en lotes con CC en comparación con barbecho invernal, en un estudio de 10 años de duración. Varios autores observaron incrementos en la conductividad hidráulica saturada (K_0) en CC en relación a un barbecho desnudo (Castiglioni et al., 2016; Keisling et al., 1994; Liesch et al., 2011). Blanco-Canqui et al. (2015) encontraron que en general los CC aumentan la K_0 en el largo plazo, aunque este efecto frecuentemente no es observable en el corto plazo. García-González et al. (2018) observaron que los CC podían producir incrementos o ningún efecto en la tasa de infiltración y la K_0 a partir del sexto año y dependiendo de las especies cultivadas, pero no producía ningún cambio en períodos de tiempo menores. Haruna et al. (2018) y Wagger y Denton (1989) no observaron efectos de los CC sobre la K_0 (en estudios de menos de 4 años de duración).

Si bien la mayoría de los estudios sobre el efecto de las prácticas de manejo en la dinámica hídrica se centran en la determinación de las tasas de infiltración básica o la K_0 , estas variables caracterizan el flujo de agua en condiciones de saturación, mientras que la mayoría de los procesos a campo (por ejemplo, infiltración, absorción de agua por las raíces, transporte de nutrientes y solutos) se dan en un rango amplio de condiciones lejanas a la saturación (Hillel, 1998). Por lo tanto, la mayor parte del tiempo el flujo de agua en el suelo está controlado por la conductividad hidráulica no saturada ($K(h)$) y los gradientes de potencial hidráulico (Vereecken et al., 2016). Algunos autores reportan las propiedades hidráulicas cercanas a saturación, incluyendo la medida de la K a campo aplicando pequeñas tensiones, lo que permite el cálculo de las porosidades efectivas. Bodner et al. (2008) estudiaron el efecto de distintos CC en la $K(h)$ medida a campo a tensiones de 15, 8 y 2 cm. Estos autores encontraron que, en el primer año tras la inclusión de los CC, algunos CC mostraron un incremento en $K(h)$ en relación al barbecho desnudo, mientras que otros generaron una disminución. En el segundo año de estudio, por el contrario, el barbecho desnudo mostró los mayores valores de $K(h)$, y los CC valores menores y con diferencias significativas entre especies. Carof et al. (2007) estudiaron el efecto de distintos CC sobre la $K(h)$ a las tensiones de 6, 2 y 0,5 cm de agua,

reportando que los CC modificaron mínimamente la $K(h)$, generando efectos distintos dependiendo de las especies de CC, la tensión y el momento del año.

Sin embargo, el estudio de la $K(h)$ a campo suele estar limitado a un rango de humedad estrecho y cercano a saturación. Un estudio más detallado de las propiedades hidráulicas a menores contenidos de humedad, por otra parte, puede brindar información importante sobre el efecto de las prácticas de manejo en la CFS (Arya et al., 1975). Cómo ya se mencionó, la mayoría del tiempo el suelo no se encuentra saturado, si no a contenidos mucho menores y variables de humedad. La K tampoco es constante, si no que disminuye a medida que los poros se vacían (Figura 1.7). Esto es consecuencia de que disminuye el área conductora (que incluye a los poros llenos), lo que a su vez aumenta la tortuosidad de los caminos por los que se mueve el agua, y de que el agua que permanece en el suelo se encuentra en poros de menor tamaño y por lo tanto se halla más fuertemente retenida (Hillel, 1998). Además, a menores contenidos de humedad la viscosidad del agua aumenta (Hillel, 1998). En general, la curva de K en función de la humedad muestra una fuerte caída cuando los macroporos, que son los responsables de la mayor parte del flujo de agua en el suelo, se vacían. La curva de K depende de la configuración del sistema poroso, por lo tanto, es de esperar que suelos bajo distintos sistemas de manejo, que modifican la distribución de tamaño, orientación y conectividad de los poros, presenten diferencias en la curva de K , y por lo tanto en la capacidad para transmitir y almacenar agua en condiciones no saturadas. Una determinación precisa de la CRH y de la función de K resulta por lo tanto de interés para describir y cuantificar los cambios en la configuración del sistema poroso y su repercusión en las propiedades hidráulicas del suelo.

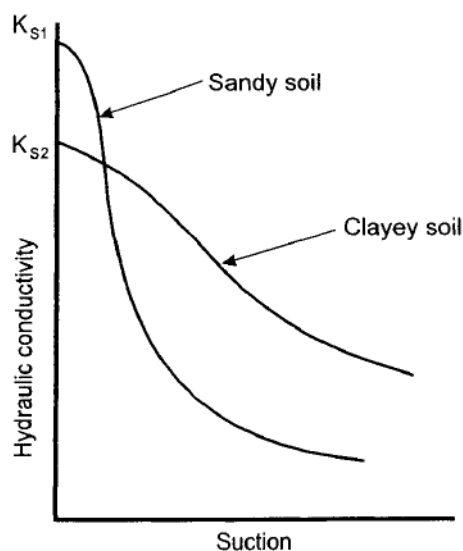


Figura 1.7. Dependencia de la conductividad hidráulica (K) con la succión (ambas variables en escala logarítmica) para suelos de textura contrastante. Extraído de Hillel (1998).

En los últimos años, varios estudios emplearon el método de evaporación simplificado (MES), un método de laboratorio que permite determinar la curva de K y la CRH en un amplio rango de contenidos de humedad (Durner, 1994; Schindler et al., 2010). Este método permite derivar una amplia variedad de indicadores de CFS (Reynolds et al., 2009). A su vez, al determinar la CRH a intervalos pequeños de humedad, permite un estudio más detallado de la DTPO (Reynolds et al., 2009). En general, la CRH y la curva de K(h) se ajustan y se describen empleando funciones uni-modales. Uno de los ajustes más utilizados es el modelo de Mualem–van Genuchten (van Genuchten, 1980), que generalmente permite un ajuste adecuado de los datos. Sin embargo, utilizar estos modelos unimodales implica una simplificación del sistema estudiado, estableciendo que existe un dominio de poros principal responsable de la mayor parte de la conductividad hidráulica, lo que en algunos casos resulta impreciso (Priesack y Durner, 2006). En suelos rígidos, bien estructurados y moderadamente expansibles, el volumen de poros presenta un arreglo donde se pueden reconocer dos dominios principales: un dominio de poros menores (asociados en general a la matriz del suelo) y un dominio de poros de mayor tamaño, determinado por la estructura del suelo (por ejemplo, espacios inter-agregados, poros formados por el decaimiento de raíces o la actividad de la fauna del suelo, y grietas entre agregados), al que se le da el nombre de porosidad estructural (Durner, 1994; Reynolds, 2017) (Figura 1.8). Es en este último dominio en el que generalmente se ve reflejado el efecto de las prácticas de manejo y de los eventos externos como la lluvia y los ciclos de humedecimiento y secado (Chandrasekhar et al., 2019). Es por esto que el uso de funciones bimodales en combinación con la determinación de la CRH mediante el MES, puede proporcionar información adicional sobre la configuración del sistema poroso, permitiendo identificar y cuantificar la fracción de poros más afectada por las prácticas agrícolas (Durner, 1994).

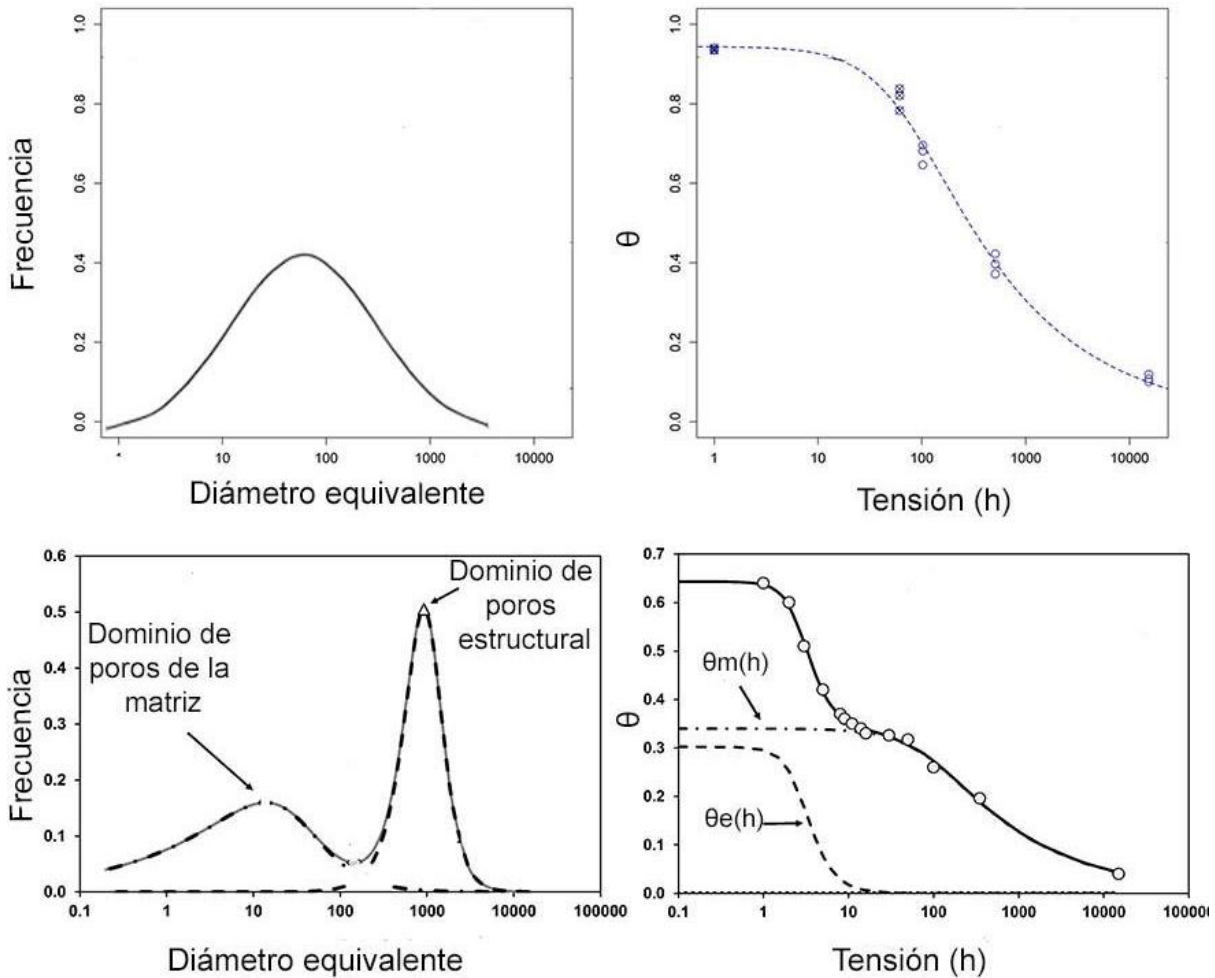


Figura 1.8. Arriba: Ajuste unimodal de la distribución de tamaño de poros (izquierda) y ajuste unimodal de la curva de retención hídrica (derecha) (Adaptado de John et al., 2021). Abajo: Ajuste bimodal de la distribución de tamaño de poros (izquierda) y ajuste bimodal de la curva de retención hídrica con la contribución de cada dominio de poros al contenido total de agua (derecha) (Adaptado de Reynolds, 2017). θ = Humedad. $\theta_e(h)$ = Curva para el dominio de poros estructural. $\theta_m(h)$ = Curva para el dominio de poros de la matriz.

Algunos autores emplearon el MES para el estudio del efecto de distintas prácticas de labranza (Alletto y Coquet, 2009; Kreiselmeyer et al., 2019, 2020; Peña-Sancho et al., 2017; Soracco et al., 2018a; 2018b; Villarreal, 2018; Villarreal et al., 2020). Por el contrario, los trabajos que abordan de esta manera el estudio del efecto de los CC en la CFS son escasos. Vendig (2019) empleó este método para comparar el efecto de dos CC sobre la DTPo, concluyendo que el brócoli, al poseer raíces fibrosas, incrementaba el volumen de los microporos de menor tamaño (0,75-7,5 μm) en superficie, en comparación con la remolacha, que posee una raíz pivotante. Otros autores usaron el método de evaporación para comparar distintas rotaciones o usos del suelo. Platt (2021) comparó el efecto sobre las propiedades físicas de plantaciones de pino, cultivos agrícolas, pasturas y un ambiente natural, usando las CRH obtenidas para determinar parámetros de almacenamiento de agua. Kiani et al. (2017), evaluaron el efecto de diferentes rotaciones sobre la curva de $K(h)$ y

parámetros derivados de la CRH. Estos autores no encontraron diferencias significativas entre los parámetros de forma de la función de $K(h)$ al comparar entre distintas rotaciones, aunque sí obtuvieron mayores valores de ADP y K_0 en las rotaciones más complejas. En otro estudio, el MES es usado para comparar lotes agrícolas con plantaciones de álamos, empleando un ajuste bimodal para describir la DTPo (Virano Riquelme et al., 2021). Estos autores encontraron que las plantaciones forestales presentaron más macroporos y menos microporos, explicados por una mayor actividad biológica y contenido de MO. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos no describen el efecto del manejo sobre la curva de $K(h)$, sino que se limitan a comparar algunos parámetros de forma, o bien indicadores específicos obtenidos de la CRH (volumen de macro, meso o microporos, ADP, K_0).

Otro aspecto a tener en cuenta al evaluar el efecto de las prácticas de manejo sobre la CFS, es la variabilidad temporal de las propiedades hidráulicas (Chandrasekhar et al., 2018). La configuración del sistema poroso y las propiedades hidráulicas resultantes son algo dinámico, que varía a medida que los ciclos de humedecimiento y secado modifican la estructura, la fauna del suelo construye nuevos poros, las raíces ocluyen poros o los vuelven a formar cuando comienza su descomposición, ocurren eventos de compactación relacionados con el pisoteo de los animales o el tránsito de maquinaria, entre otros eventos (Bormann y Klaassen, 2008; Hu et al., 2009; Jirků et al., 2013; Liesch et al., 2011; Schwen et al., 2011a; Strudley et al., 2008; Villarreal et al., 2020). Varios autores han estudiado la variabilidad durante el ciclo de cultivo de la configuración del sistema poroso y de las propiedades hidráulicas, comparando principalmente distintos sistemas de labranza (Alletto y Coquet, 2009; Haruna et al., 2018; Kreiselmeyer et al., 2019; 2020; Peña-Sancho et al., 2017; Soracco et al., 2018a; 2018b; Villarreal, 2018; Villarreal et al., 2017; 2020). Más allá del efecto temporal de las labranzas, existe una variabilidad temporal en sistemas bajo SD, causada por la actividad biológica y de las raíces durante el crecimiento de los cultivos y por el decaimiento de las raíces de cultivos previos (Jirků et al., 2013; Schwen et al., 2011a; Villarreal et al., 2017; 2020). El efecto de la cobertura también modifica el impacto de eventos naturales como la lluvia, los ciclos de humedecimiento y secado y de congelamiento, que generan cambios estacionales en la configuración del sistema poroso y en las propiedades hidráulicas (Chandrasekhar et al., 2018; Kargas et al., 2016). Esto evidencia la importancia de estudiar el efecto de las secuencias de cultivo y los períodos de barbecho en la dinámica temporal de las propiedades físicas (Sasal et al., 2017; Villarreal et al. 2020). Además, se ha reportado que la variabilidad temporal de las propiedades físicas a lo largo del ciclo de cultivo difiere según las condiciones edafoclimáticas (Villarreal et al., 2020). Sin embargo, esta dependencia se encuentra poco estudiada, en particular en suelos de textura fina como los que predominan en la Región Pampeana (Villarreal et al., 2020).

En relación a los CC, Blanco-Canqui et al. (2011) no encontraron diferencias significativas en K_0 al medirla una semana antes de terminar el CC, pero sí encontraron un incremento en K_0 en sistemas con CC cuando esta se midió dos semanas después de terminado el CC. Carof et al. (2007) estudiando el efecto de distintos CC sobre la K cercana a saturación a lo largo de un ciclo de cultivo, observaron una variabilidad temporal que fue atribuida a cambios temporales en la estructura del suelo debidos a la presencia de raíces, la actividad biológica y el efecto de la lluvia. En este estudio, los CC contribuyeron a estabilizar la estructura, manteniendo la macroporosidad y atenuando la variabilidad temporal de las

propiedades hidráulicas en relación a un barbecho desnudo. De manera similar, Kargas et al. (2016) reportaron que la variabilidad temporal de la K_0 durante el barbecho en SD resultó mayor en lotes desnudos que en lotes con malezas. Mientras que en los lotes con control químico de malezas la K_0 mostraba fuertes disminuciones después de eventos de lluvia, en los lotes con malezas la K_0 solo varió mínimamente, manteniendo valores superiores. Bodner et al. (2008) estudiaron la variabilidad temporal de $K(h)$ en lotes con y sin CC, observando efectos variables de los CC sobre la K , con aumentos, ningún efecto o disminuciones dependiendo de las especies empleadas y del momento del año. Estos autores encontraron que las curvas de $K(h)$ mostraron una diferencia del 60 % (considerando el área bajo la curva) entre años de muestreo, y un incremento de entre 0,3 y 0,5 órdenes de magnitud en el invierno. Por otra parte, observaron que los cambios estacionales no siempre afectaban a toda la curva de $K(h)$, si no que algunos años las diferencias solo eran significativas a determinadas tensiones. Tanto Bodner et al. (2008) como Carof et al. (2007) mencionan que los CC pueden generar una disminución temporal en la K , debida a una oclusión de los poros por las raíces. El decaimiento de estas raíces generaría más adelante el desarrollo de porosidad estructural. De esto se desprende la necesidad de considerar toda la curva de $K(h)$, y también de tener en cuenta el momento de muestreo y la variabilidad temporal a la hora de evaluar el efecto de las prácticas de manejo (Soracco et al., 2018b; Villarreal et al., 2020).

1.3.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre el régimen de humedad del suelo

Otra de las cuestiones a tener en cuenta a la hora de evaluar si es conveniente incluir CC es qué efecto tendrán sobre la disponibilidad de agua. La inclusión de un CC genera un consumo de agua adicional al del barbecho desnudo. Este consumo puede ocasionar un déficit para el cultivo principal, afectando su rendimiento (Alfonso et al., 2020; Nielsen et al., 2015). En la bibliografía se encuentran resultados contradictorios sobre el efecto de los CC en la disponibilidad de agua. Esto puede deberse a que el efecto difiere entre regiones climáticas, especies empleadas, tipos de suelo y años con distintos aportes de agua por precipitaciones (Álvarez et al., 2017; Andrade et al., 2017; Blanco-Canqui et al., 2015; Duval et al., 2016; Reeves, 1994; Restovich et al., 2012). El consumo de agua puede resultar en drásticas disminuciones en el rendimiento en regiones secas, donde el agua resulte una limitante. En regiones húmedas, sin embargo, una disminución en el contenido de agua puede no resultar limitante, o incluso puede ser deseada en zonas anegables o con ascenso de napa (Dabney et al., 2001). En la Región Pampeana, algunos autores reportaron menos disponibilidad de agua en secuencias de cultivos que incluían CC (Álvarez et al., 2017). Duval et al. (2016), si bien observaron un mayor consumo de agua en sistemas con CC, reportaron que esta diferencia no afectó al cultivo principal. Álvarez et al. (2017) reportaron que el agua disponible no fue afectada en el primer metro por la presencia de CC, pero disminuyó en alrededor del 20 % cuando fue medida en profundidad (2 m). En el mismo sentido, otros autores indican que el contenido de agua fue un 37 % mayor en tratamientos sin CC respecto a aquellos con CC, como resultado de la evapotranspiración de las plantas (mayor en gramíneas) (Duval et al., 2016). Por el contrario, Blanco-Canqui et al. (2011) observaron un mayor contenido de agua en presencia de CC, que correlacionaron con una menor temperatura en el suelo. Chalise et al. (2019), observaron que en general los lotes

con CC presentaban mayor contenido de agua que aquellos sin CC, en especial en los primeros 15 cm, aunque esta situación se invirtió en algunas fechas de muestreo a mayor profundidad (15-30 cm). Restovich et al. (2012), en un suelo de la Región Pampeana, observaron que la inclusión de CC no afectó la disponibilidad de agua para el cultivo de verano. El efecto de los CC sobre la disponibilidad de agua para el cultivo principal muchas veces queda determinado por las condiciones climáticas del año en cuestión. Según Blanco-Canqui et al. (2015) en regiones con déficit hídrico o en años secos, los CC pueden disminuir el contenido de agua del suelo a niveles que afecten el rendimiento de los cultivos siguientes, mientras que, en condiciones de abundantes precipitaciones, la inclusión de CC puede no generar cambios significativos en el contenido de agua del suelo.

Sin embargo, el efecto de los CC sobre la disponibilidad de agua no se debe solamente al consumo de agua. Al incrementar la cobertura, los CC disminuyen la pérdida de agua por evaporación, tanto durante su crecimiento como durante el crecimiento del cultivo principal, por el efecto de cobertura del rastrojo (Alfonso et al., 2020). El uso de especies que cubren el suelo rápidamente mejora la eficiencia del uso de agua, evitando pérdidas por evaporación directa desde el suelo. Un secado anticipado permite un mejor aprovechamiento de las precipitaciones que ocurren en primavera para recargar el perfil (Alfonso et al., 2020; Munawar et al., 1990). Por otra parte, los CC modifican propiedades físicas e hidráulicas que pueden afectar la capacidad de almacenaje de agua y su distribución en el perfil (Chandrasekhar et al., 2018). Como ya se mencionó antes, los CC pueden modificar la DTPo, generando un cambio en la capacidad de almacenaje de agua de los suelos (Álvarez et al., 2017; Basche et al., 2016; Villamil et al., 2006). Gabriel et al. (2019) concluyeron que el consumo de agua por el cultivo de cobertura puede ser compensada por una mejora en la capacidad de retención hídrica y una disminución en la pérdida de agua por drenaje. Basche et al. (2016) observaron un aumento en el contenido de agua bajo CC, tanto en años secos como en años húmedos, que relacionaron con un incremento en el contenido de agua a capacidad de campo y del ADP bajo este sistema de manejo. Los CC pueden también incrementar el volumen y/o la conectividad de los macroporos, favoreciendo el flujo de agua en profundidad (Calegari et al., 2013; Calonego et al., 2017; Restovich et al., 2012; Villamil et al., 2006). Por último, los CC pueden modificar la variabilidad temporal de la configuración del sistema poroso y de la curva de $K(h)$ en el ciclo de cultivo (Bodner et al., 2008; Carof et al., 2007). Todo esto va a tener un impacto en el balance hídrico, así como en la disponibilidad de agua para el cultivo siguiente. Si el CC logra mejorar las propiedades hidráulicas, su implementación puede mejorar la disponibilidad de agua para el cultivo principal (Basche et al., 2016).

De lo expuesto anteriormente surge la necesidad de profundizar en el estudio del efecto de los CC sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos. En particular hace falta reunir más información del efecto de los CC en suelos de diferentes clases texturales y en distintas escalas de tiempo, sobre la dinámica de la MO y sobre las propiedades físicas que determinan el flujo de agua en el suelo.

1.4. HIPÓTESIS

1 – Los CC en sistemas bajo SD generan un aumento en el contenido de MO del suelo en comparación con rotaciones sin CC.

2 – El contenido de MO y sus fracciones no es constante durante el ciclo de cultivo, siendo más variables los contenidos de las fracciones más lábiles en sistemas con CC que con barbecho desnudo.

3 – Los CC en sistemas bajo SD generan una mejora en la CFS, siendo este efecto más evidente en indicadores dinámicos que en estáticos, y en suelos de textura fina que en suelos de textura más gruesa.

4 – La introducción de CC en un suelo bajo SD con maíz como cultivo de verano produce un cambio en la DTPo, con una disminución en los poros de la matriz y un incremento en los poros estructurales, en comparación con un barbecho desnudo.

5 – La introducción de CC en un suelo bajo SD con maíz como cultivo de verano mejora la conectividad de los poros estructurales, incrementando $K(h)$ durante el primer año desde su inclusión, en comparación con un barbecho desnudo.

6 – La porosidad estructural puede resultar un indicador de CFS útil para determinar el efecto en el corto plazo de los CC.

7 – Los CC, en comparación con un barbecho desnudo, generan condiciones que permiten un mayor contenido de agua al momento de la siembra y durante el crecimiento del CP en un Argiudol típico bajo SD.

8 – El uso de parámetros hidráulicos obtenidos mediante el método BEST permite una simulación adecuada de la dinámica hídrica mediante el software Hydrus-1D, comparable con la simulación hecha a partir de parámetros obtenidos mediante el MES.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Contribuir al conocimiento sobre el efecto de los CC sobre las propiedades del suelo en sistemas productivos bajo SD.

1.5.2. Objetivos particulares

1 – Evaluar el efecto de los CC sobre el contenido, composición y variabilidad temporal de la MO, en relación al barbecho desnudo, en suelos característicos de la Región Pampeana bajo SD.

2 – Evaluar el efecto de los CC sobre la CFS y su variabilidad temporal, en relación al barbecho desnudo, en suelos característicos de la Región Pampeana bajo SD.

3 – Evaluar la variabilidad temporal a lo largo del ciclo de cultivo de la curva de $K(h)$ y de la configuración del sistema poroso en un suelo de la Región Pampeana bajo SD con y sin CC.

4 – Evaluar el efecto de los CC sobre el contenido y la disponibilidad de agua durante el ciclo de cultivo, en relación al barbecho desnudo, en un suelo de la Región Pampeana bajo SD.

1.6. DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Los ensayos de la presente tesis se realizaron en cuatro sitios representativos de la Región Pampeana, con suelos de texturas contrastantes. Los cuatro sitios pertenecen a ensayos de las Estaciones Experimentales del INTA ubicadas en Chascomús, Pergamino y Villegas, y de la Chacra Experimental Bellocq (dependiente del Ministerio de Desarrollo Agrario de la Provincia de Buenos Aires), ubicadas en Chascomús, Pergamino, General Villegas y Bellocq (Provincia de Buenos Aires) (Figura 1.9). En la tabla 1.3 se detallan las principales características de cada sitio.

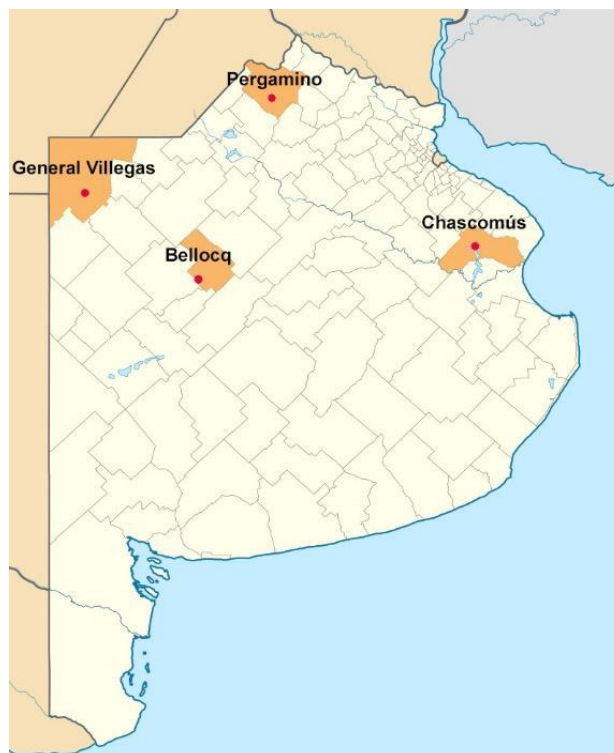


Figura 1.9. Ubicación de los sitios de estudio.

Tabla 1.3. Principales características de los sitios de estudio.

Sitio	Chascomús	Pergamino	Villegas	Bellocq
Altitud (msnm)	16	66	105	79
Temperatura media anual (°C)	15,6	16,4	16,2	16,2
Precipitación anual (mm)	946	947	929	885
Tipo de suelo	Argiudol abrupto	Argiudol típico	Hapludol típico	Hapludol éntico
Clase textural	Franco	Franco limoso	Franco arenoso	Franco arenoso
Arcilla (%)*	18,6	22,6	14,3	12,7
Limo (2-20 µm) (%)*	27,6	33,3	11,7	11,1
Limo (20-53 µm) (%)*	21,5	23,7	10,7	9,9
Arena (53-75 µm) (%)*	22,1	14,1	13,6	10,2
Arena (75-106 µm) (%)*	9,4	5,7	17,4	10,3
Arena (106-250 µm) (%)*	0,6	0,5	29,9	41,4
Arena (>250 µm) (%)*	0,1	0	2,4	4,4

* valores promedio para los primeros 20 cm correspondientes al horizonte A.

1.6.1. Sitio General Villegas

Los muestreos se realizaron en un lote experimental del INTA General Villegas, en las cercanías de General Villegas, Provincia de Buenos Aires (35°01' S, 63°00' O). El suelo es un Hapludol típico de textura franco arenosa (Soil Survey Staff, 2014), de la serie Lincoln (Tabla 1.3). El clima de la región es templado, con temperatura media anual 16,2 °C y precipitación anual promedio de 929 mm. El ensayo se inició en 2004, en parcelas de 5 m de ancho y 20 m de largo, con un diseño experimental completamente al azar con dos rotaciones de cultivos de verano (soja y maíz/soja), y con dos sub-tratamientos, con y sin CC:

- i) a) Soja en SD sin CC (S).
b) Soja en SD con CC (S_{CC}).
- ii) a) Maíz/soja en SD sin CC (R).
b) Maíz/soja en SD con CC (R_{CC}).

El CC empleado es centeno (*Secale cereale* L. M. Bieb), que es secado químicamente previo a la siembra del cultivo principal con glifosato. El CC se fertiliza a la siembra con fósforo y con urea cuando se encuentra en estado de macollaje. Anualmente el maíz (*Zea mays* L.) se fertiliza con fósforo en la siembra, y con urea en estadio de V3-V6. La soja (*Glycine max* L.) no se fertiliza, pero las semillas son inoculadas con inoculantes comerciales. El control de malezas

se realiza de forma química con glifosato y carfentrazone. En la tabla 1.4 se detallan las labores realizadas en el período estudiado:

Tabla 1.4. Labores realizadas durante el período de estudio en el sitio Villegas.

Fecha	Tarea	Muestreo	Estado del cultivo
2/10/2018	Siembra del maíz		
5/11/2018	Siembra de la soja		
10/4/2019	Cosecha del maíz		
16/4/2019	Cosecha de la soja		
15/5/2019	Siembra del CC		
13/9/2019	Finalización del CC		
17/10/2019		VIL	Rastrojo del CC

CC=Cultivo de cobertura.

1.6.2. Sitio Pergamino

Los muestreos se realizaron en la chacra experimental del INTA Pergamino, ubicada en las cercanías de la localidad de Pergamino, Provincia de Buenos Aires (33°56' S, 60°33' O). El suelo es un Argiudol típico, fino, illítico, térmico (Soil Survey Staff, 2014), de textura franco limosa (Tabla 1.3). El clima de la región es templado, con temperatura media anual 16,4 °C y precipitación anual promedio de 947 mm. Los lotes estudiados estaban bajo monocultivo de soja (*Glycine max* L.) en SD desde 1987. En 2010 se planteó un ensayo con un diseño experimental completamente al azar en lotes de 14 m de ancho por 45 m de largo, con dos tratamientos:

- i) Soja en SD sin CC (S).
- ii) Soja en SD con CC (S_{CC}).

El CC consiste en un consociado de 60% avena (*Avena sativa* L.) y 40% vicia (*Vicia villosa* Roth), que es secado químicamente previo a la siembra del cultivo principal (glifosato y 2,4 D). El control de malezas en el barbecho desnudo se realiza con aplicación de agroquímicos. La soja se fertiliza a la siembra con fósforo, mientras que el CC no se fertiliza. Se realizaron tres muestreos, el primero al inicio del cultivo principal en el año 2018 (PER-CP₀), el segundo al finalizar el cultivo principal (PER-CP_f) y el tercero al final del barbecho (PER-B_f). En la tabla 1.5 se detallan las labores realizadas en el período estudiado:

Tabla 1.5. Labores realizadas durante el período de estudio en el sitio Pergamino.

Fecha	Tarea	Muestreo	Estado del cultivo
23/11/2017	Siembra de la soja		
16/4/2018	Cosecha de la soja		
17/4/2018	Siembra del CC		
30/10/2018	Finalización del CC		
7/11/2018	Siembra de la soja		
27/11/2018		PER-CP _o	Soja en V2
23/4/2019	Cosecha de la soja		
24/4/2019		PER-CP _f	Rastrojo de soja
30/4/2019	Siembra del CC		
7/10/2019	Finalización del CC		
16/10/2019		PER-B _f	CC en pie
20/11/2019	Siembra de la soja		

CC=Cultivo de cobertura.

1.6.3. Sitio Bellocq

Los muestreos se realizaron en la Chacra Experimental Bellocq (dependiente del Ministerio de Desarrollo Agrario de la Provincia de Buenos Aires), ubicada cerca de la localidad de Bellocq, partido de Carlos Casares, Provincia de Buenos Aires (35°55' S, 61°29' O). El suelo es un Hapludol éntico, bien drenado, de escaso desarrollo, de textura franco arenosa (Tabla 1.3). El clima en la región es templado, con temperatura media anual 16,2°C y precipitación anual promedio de 885 mm (Díaz-Zorita et al., 2002). Antes del establecimiento del ensayo, el lote había estado tres años en SD, con soja (dos años) y moha para rollos (un año). En el año 2017, sobre un rastrojo de soja de primera, se instaló un ensayo en parcelas de 10 x 30 m con un diseño experimental completamente al azar con distintas secuencias e intensidades de cultivos principales en SD (indicados con letras mayúsculas), algunas de las cuáles incluían CC (indicados con letras minúsculas):

- i) Maíz - soja (M-S).
- ii) Vicia/maíz - centeno/soja (v/M-c/S).
- iii) Soja - trigo/soja (S-T/S).
- iv) Centeno/soja - trigo/soja (c/S-T/S).
- v) Trigo/soja - maíz (T/S-M).
- vi) Trigo/soja - vicia/maíz (T/S-v/M).

El control de malezas se realizó con aplicación de agroquímicos (glifosato, dicamba, prosulfuron, triasulfuron, 2,4 D, atrazina, metalocloro y picloram). La finalización de los CC se realizó de manera mecánica para el centeno (*Secale cereale* L. M. Bieb) y químicamente en el caso de la vicia (*Vicia villosa* Roth) y el trigo (*Triticum aestivum* L.). Todos los cultivos se fertilizaron a la siembra con fósforo. La vicia y la soja se inocularon a la siembra. El trigo y el maíz se fertilizaron con urea en post-emergencia. En la tabla 1.6 se detallan las labores realizadas en el período estudiado:

Tabla 1.6. Labores realizadas durante el período de estudio en el sitio Bellocq.

Fecha	Tarea	Muestreo	Estado del cultivo
15/10/2018	Siembra de la soja		
15/11/2018	Siembra del maíz		
28/12/2018	Siembra de la soja de segunda		
20/4/2019	Cosecha de la soja		
10/5/2018	Cosecha de la soja de segunda		
8/6/2019	Siembra de vicia y trigo		
18/6/2019	Cosecha del maíz		
23/6/2019		BEL	Vicia y trigo en emergencia, maíz y soja en pie
28/6/2019	Siembra del centeno		
1/12/2019	Finalización de la vicia		
4/12/2019	Finalización del trigo		
15/10/2019	Finalización del centeno		

1.6.4. Sitio Chascomús

Los muestreos se realizaron en la Chacra Experimental Integrada Chascomús (MDA-INTA), ubicada en las cercanías de la localidad de Chascomús, Provincia de Buenos Aires (35°44' S, 58°03' O). El suelo es un Argiudol abrupto, fino, illítico, térmico (Soil Survey Staff, 2014) de textura franca (Tabla 1.3). El clima en la región es templado, con temperatura media anual 15,6 °C y precipitación anual promedio de 946 mm. Antes del establecimiento del ensayo en 2018, los lotes se encontraban en SD con cultivos de maíz (*Zea mays* L.) alternados con pasturas desde hacía 8 años, con la siguiente secuencia de cultivos: maíz (2011/2012) – pastizal (2012/2014) – pastizal - maíz (2015/2016) – maíz (2016/2017) – maíz (2017/2018). En 2018 se inició el ensayo, con lotes de 20 x 87 m con un diseño experimental completamente al azar con dos tratamientos:

- vii) Maíz en SD con CC invernada (M_{CC}).
- viii) Maíz en SD con barbecho desnudo en el invierno (M).

El CC consistió en un consociado de 67% cebada (*Hordeum vulgare* L.) y 33% vicia (*Vicia villosa* Roth) el primer año, y 48% avena (*Avena sativa* L.), 31% vicia y 21% cebada (*Hordeum vulgare* L.) el segundo año. En el tratamiento sin cultivo de cobertura el control de malezas durante el barbecho se realizó con aplicación de agroquímicos (atrazina, full2). La finalización del CC se realizó de manera mecánica. Se realizaron muestreos en cinco fechas: al inicio del ensayo, previo a la siembra del primer CC (CHA_o), durante el período de barbecho en el año 2018 (CHA-B1), al inicio del cultivo principal (CHA-CP_o), al final del cultivo principal (CHA-CP_f), y durante el período de barbecho del año 2019 (CHA-B2). El siguiente cultivo de verano después de finalizados los muestreos de suelo fue soja (*Glycine max* L.). En la tabla 1.7 se detallan las labores realizadas en el período estudiado:

Tabla 1.7. Labores realizadas durante el período de estudio en el sitio Chascomús.

Fecha	Tarea	Muestreo	Estado del cultivo
3/8/2018		CHA _o	Pre-siembra del CC
1/9/2018	Siembra del CC		
5/9/2018	Instalación sensores de humedad		
24/10/2018		CHA-B1	CC vegetativo
5/12/2018	Desinstalación sensores de humedad		
15/12/2018	Finalización del CC		
28/12/2018	Siembra del maíz		
4/1/2019		CHA-CP _o	Maíz en emergencia
22/1/2019	Instalación de sensores de humedad		
3/4/2019	Desinstalación sensores de humedad	CHA-CP _f	Maíz maduro
16/4/2019	Pastoreo del maíz		
3/5/2019	Siembra del CC		
5/6/2019	Instalación de sensores de humedad		
26/9/2019	Desinstalación sensores de humedad	CHA-B2	CC maduro
10/11/2019	Finalización del CC		
11/11/2019	Siembra de la soja en lote sin CC		
27/11/2019	Siembra de la soja en lotes con CC		
14/5/2020	Cosecha de la soja		

CC=Cultivo de cobertura.

En la Tabla 1.8 se resumen las principales características de los ensayos experimentales.

Tabla 1.8. Principales características de los ensayos experimentales.

Sitio	Duración	Labranza		Cultivo principal	Cultivo de cobertura	Finalización
Chascomús	2	SD	1er año	maíz	cebada/vicia	mecánica (desmalezadora)
			2do año	maíz	avena/vicia/ cebada	mecánica (rolo)
Pergamino	8	SD		soja	avena/vicia	química
General Villegas	15	SD	Monocultivo	soja		
			Rotación	maíz - soja	centeno	química
Belloq	2	SD	1er año	maíz -	vicia -	química -
			2do año	soja	centeno	mecánica
			1er año	soja -	centeno	
			2do año	trigo/soja	-	mecánica
			1er año	trigo/soja -	-	
			2do año	maíz	vicia	química

SD = Siembra directa.

CAPÍTULO 2 – Efecto de los cultivos de cobertura sobre el carbono orgánico del suelo

2.1. INTRODUCCIÓN

El estudio de prácticas de manejo que permitan mantener o incluso incrementar el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) cobra especial interés en el actual contexto de crisis ambiental, donde la degradación de los suelos se ve acelerada por la adopción de prácticas agrícolas no sustentables. La pérdida de materia orgánica (MO) significa una disminución en la cantidad de nutrientes, pero contribuye también a la degradación física de los suelos, que pierden fertilidad y funcionalidad. La pérdida de MO (y por lo tanto de carbono, C) de los suelos es también una preocupante fuente de gases de efecto invernadero de origen antrópico (Lal, 2009b). Prácticas de manejo que contribuyan a incrementar el stock de COS son, por el contrario, una alternativa de interés para mitigar los efectos del cambio climático (Lal, 2009b; Poeplau y Don, 2015). Los cultivos de cobertura (CC) son una práctica que ha cobrado especial interés en los últimos años, por proveer múltiples beneficios y servicios ecosistémicos, como controlar la erosión, controlar malezas permitiendo reducir el uso de agroquímicos, regular el régimen hídrico y mejorar la calidad física y química de los suelos. Uno de los motivos para incluir CC en las rotaciones agrícolas es que pueden incrementar el contenido de MO del suelo (Blanco-Canqui et al., 2015; Dabney et al., 2010; Poeplau y Don, 2015).

La presencia de CC afecta el contenido de COS por diferentes mecanismos. Al tratarse de cultivos que se desarrollan entre los períodos de crecimiento (o bien entre los surcos) de un cultivo principal, generando biomasa que luego no es cosechada, los CC generan un aporte de MO extra. Por otra parte, al mantener el suelo cubierto y protegido contra los eventos erosivos, y mantener condiciones de temperatura y humedad más adecuadas para la vida del suelo, los CC pueden disminuir las tasas de mineralización y pérdida de MO, que por el contrario se ven aceleradas en un barbecho desnudo (Bolinder et al., 2020; Oliveira et al., 2019). Este aporte de residuos, sumado a las menores tasas de mineralización, puede generar un incremento en la MO del suelo. Adicionalmente, este aumento en el contenido de MO del suelo puede derivar en una mejora del rendimiento del cultivo principal, lo que también significa un mayor aporte de MO (Poeplau y Don, 2015). Sin embargo, en la bibliografía se reportan efectos contradictorios de los CC sobre el COS (Bolinder et al., 2020; Jian et al., 2020). Numerosos estudios reportan que los CC incrementan el contenido de COS en comparación con prácticas que mantienen el suelo desnudo (Beltrán et al., 2018; Blanco-Canqui et al., 2011; 2015; Jian et al., 2020). Por otra parte, algunos autores no encontraron efectos significativos en el COS por la inclusión de CC bajo diferentes condiciones experimentales (Chalise et al., 2019; Fronning et al., 2018; Nascente y Stone, 2018; Romaniuk et al., 2018; Yang et al., 2004) y otros autores reportan disminuciones (Álvarez et al., 2017; Poeplau y Don, 2015). Estos resultados reflejan el hecho de que el efecto de los CC sobre el COS va a depender de diversos factores, incluyendo las especies elegidas como CC y como cultivos principales, el clima de la región y del año en cuestión, el tiempo transcurrido desde

que se adoptó la práctica, la textura y estructura del suelo y el contenido inicial de C, entre otros (Blanco-Canqui et al., 2015; Lal, 2004; McClelland et al., 2020). Estos factores van a influir por un lado en la producción de biomasa y por otro en los procesos de transformación que deben sufrir los residuos para pasar a formar parte de la MO del suelo.

La mayoría de los trabajos reportan que los cambios inducidos por los CC son observables, o bien son de mayor magnitud en los primeros 5 o 10 cm del perfil del suelo (Beltrán et al., 2018; Duval et al., 2016; Mazetto Júnior et al., 2019). Esto se debe a que es en la capa más superficial del suelo donde ingresa la mayor cantidad de residuos, si bien la principal fuente de COS son los residuos provenientes de las raíces (Basile-Doelsch et al., 2020; Rasse et al., 2005). Por otra parte, el estudio de la dinámica del COS en capas más profundas resulta relevante, en especial en relación a la capacidad de los suelos para almacenar C. Con este objetivo, la inclusión de gramíneas y otras especies de raíces profundas estimularía la acumulación de COS en profundidad (Romaniuk et al., 2018). Sin embargo, la presencia continua de raíces estimula la biota microbiana y puede producir un efecto disruptivo y de aireación en el suelo (Blanco-Canqui et al., 2015), facilitando la bio-disponibilidad y descomposición de MO acumulada en capas más profundas (Paul, 2016).

No existe consenso sobre cuál es el efecto del clima y la textura del suelo en los cambios que la inclusión de CC puede generar en el COS (Bolinder et al., 2020). Poeplau y Don (2015) concluyeron que el clima y la textura no modificaron el efecto de los CC en el COS. Otros autores observaron incrementos en el COS mayores en suelos de textura gruesa que en suelos de textura más fina, para la Región Pampeana (Álvarez et al., 2017; Beltrán et al., 2021). Por el contrario, Blanco-Canqui et al. (2015) y Jian et al. (2020), observaron mejores respuestas en suelos de textura fina. Según Jian et al. (2020), estos suelos mostraron incrementos promedio de 39 % en el COS, contra un 10-11 % en suelos de textura media a gruesa. Tampoco existe información concluyente sobre el resultado del aporte de MO en suelos con distinto contenido inicial de COS (Bolinder et al., 2020). Mientras que algunos autores sostienen que la acumulación de COS es más difícil en suelos erosionados con bajo contenido inicial de C (Arrouays et al., 2006), otros reportan que es en estos suelos en los que los CC tienen mayor capacidad para incrementar el contenido de COS (Blanco-Canqui et al., 2015).

En cuanto a las especies empleadas como CC, según Blanco-Canqui et al. (2013a) las gramíneas son más efectivas para incrementar el COS, debido a que sus residuos de descomposición más lenta favorecen los procesos de humificación por sobre los de mineralización. La mezcla de leguminosas y gramíneas, por otra parte, puede generar una mayor producción de biomasa (Blanco-Canqui et al., 2015). Según Jian et al. (2020), emplear gramíneas como CC no siempre se tradujo en un incremento en el COS mientras que el uso de una especie de leguminosa, mezclas de leguminosas, y mezclas de gramíneas y leguminosas generaron un incremento en el COS, siendo el porcentaje de cambio mayor para este último grupo. Por el contrario, Poeplau y Don (2015) no encontraron diferencias significativas al clasificar los CC en leguminosas o no-leguminosas. Varela et al. (2014), observaron que los CC de avena o centeno produjeron un aumento en el COS en un cultivo de soja, mientras que el

empleo de raigrás no produjo diferencias significativas. La capacidad de los CC de incrementar el COS depende de que exista una rotación que genere un aporte suficiente de residuos orgánicos, y de que exista un balance adecuado entre especies de las distintas familias en toda la rotación (Beltrán et al., 2018; Duval et al., 2016; Romaniuk et al., 2018; Villamil et al., 2006). Villamil et al. (2006) observaron un incremento mayor en el COS en rotaciones incluyendo gramíneas y leguminosas (maíz/centeno-soja/centeno+vicia o maíz/centeno-soja/vicia) que en rotaciones más sencillas con menos frecuencia de leguminosas (maíz-soja y maíz/centeno-soja/centeno), indicando la necesidad de una fuente de nitrógeno (N) suficiente para la incorporación de los residuos de las gramíneas a la MO del suelo. De manera similar, Romaniuk et al. (2018) observaron que incluir trigo como CC en un cultivo de soja podía producir incrementos en el COS, mientras que incluirlo en una rotación en la que ya había gramíneas no generaba cambios. Jian et al. (2020) también observaron efectos diferentes sobre el COS según cuál fuera el cultivo principal. Según estos autores, la inclusión de CC en cultivos de soja, o rotaciones maíz-soja o maíz-trigo/soja no generó efectos significativos en el COS, con estudios que reportaron ningún efecto, incrementos o disminuciones, mientras que sí se observó un efecto significativo en cultivos de trigo, vegetales y en otras rotaciones. Álvarez et al. (2017), por el contrario, no encontraron diferencias al comparar estudios con cereales o con monocultivo de soja como cultivo principal.

Los efectos del tiempo desde la implementación de los CC resultan también contradictorios. Algunos autores encontraron una correlación entre la magnitud en el incremento del COS y el tiempo transcurrido desde la inclusión de los CC (Poeplau y Don, 2015) mientras que otros no (Álvarez et al., 2017). Según Bolinder et al. (2020) en el largo plazo, los CC pueden generar incrementos promedio de entre el 8 y el 13 % en el COS. Varios autores coinciden en que este incremento es observable pasados algunos años de la implementación de la práctica (Bolinder et al., 2020). Sin embargo, Mukherjee y Lal (2015) observaron que un año de CC bastó para incrementar el contenido de COS en los primeros 10 cm, en un Argiaquol bajo cultivo de soja. Blanco-Canqui et al. (2013a) observaron que algunos CC produjeron un incremento en el COS tras 5 años en un cultivo de trigo, pero este efecto desapareció a los 9 meses de finalizado el CC, indicando que durante los primeros años el efecto de los CC puede ser transitorio. En cuanto a los estudios que reportan que los CC pueden generar una disminución en el contenido de COS, en todos los casos se trata de estudios de menos de 6 años de duración (Álvarez et al., 2017; Poeplau y Don, 2015). Esto fue atribuido a que un shock de MO en el sistema puede estimular la actividad microbiana permitiéndole degradar compuestos del stock más estable del COS, fenómeno que se conoce como efecto de *priming* (Dijkstra et al., 2020; Huang et al., 2021; Oliveira et al., 2019; Paul, 2016; Poeplau y Don, 2015). Otra explicación es que la elevada variabilidad espacial del contenido de MO en relación a la magnitud de los cambios inducidos por el manejo puede enmascarar los resultados o llevar a conclusiones erróneas (Goidts et al., 2009; Poeplau y Don, 2015). En todo caso, el efecto de la introducción de CC sobre la variabilidad temporal del contenido y composición de la MO durante el ciclo de cultivo, y durante los primeros años desde su implementación, no se encuentra bien estudiado y resulta de interés. Por otra parte, algunos trabajos se centran en el estudio de las fracciones más dinámicas del

COS, que pueden resultar más sensible a los cambios provocados por las prácticas agrícolas (Ding et al., 2006; Plaza-Bonilla et al., 2014).

2.1.1. Efecto de los cultivos de cobertura en fracciones químicas del carbono orgánico del suelo

Como ya se mencionó en la introducción, los trabajos que estudian el efecto de los CC sobre los ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) y huminas son escasos. En un ensayo donde se evaluó el efecto de varios CC sobre el COS en un Cambisol franco arcilloso, Arlauskienė et al. (2010) encontraron que los CC generaron un incremento en la fracción de los AH, observable uno y dos años después de iniciado el ensayo. Por otra parte, Yang et al. (2004) observaron un incremento en el contenido de huminas en los primeros 10 cm de suelo, tras 13 años de CC en un Humaquept fluvaquentico franco con cereales como cultivo principal y centeno y trébol como CC. Guimarães et al. (2013) también observaron un incremento en el contenido de huminas en los primeros 25 cm en un Ultisol franco arenoso, con coco como cultivo principal, y leguminosas como CC. Sin embargo, estos autores no observaron cambios en las fracciones de AF y AH. Estos resultados indican que, si bien se considera a las huminas como una fracción más estable del COS, esta puede sufrir modificaciones debidas a las prácticas de manejo, y que fracciones consideradas más dinámicas como los AF pueden no reflejar el efecto de estas prácticas, por ser más susceptibles a otros procesos como la transformación química, degradación o traslocación (Guimarães et al., 2013). Santos et al. (2014) y Ramos et al. (2020), observaron que distintas especies de CC en un cultivo de maíz generaron cambios en los contenidos de AH y AF, así como en las fracciones físicas, aunque estos autores no comparan con el contenido en un barbecho desnudo.

2.1.2. Efecto de los cultivos de cobertura en fracciones físicas del carbono orgánico del suelo

En cuanto al efecto de los CC sobre fracciones físicas del COS, algunos autores observaron un incremento en el carbono orgánico particulado grueso (COPg), incluso cuando no se observaron cambios en el contenido de COS (Romaniuk et al., 2018). Duval et al. (2016) observaron que un CC de avena/vicia produjo aumentos en el COPg en comparación con un barbecho desnudo de 50 y 31 % en las capas de 0-5 cm y de 5-10 cm, respectivamente. Beltrán et al. (2018) hallaron que 8 años de avena como CC produjo incrementos de un 39 % en el COPg en un cultivo de soja. Romaniuk et al. (2018) reportaron valores de COPg tres veces mayores cuando un CC de trigo se incluyó en un cultivo de soja, en comparación con el barbecho desnudo. En varios trabajos se reporta también un incremento en el contenido de carbono orgánico particulado fino (COPf) en lotes con CC en comparación con lotes bajo barbecho desnudo, aunque frecuentemente estos incrementos son menores o solo se observan a tiempos mayores que los incrementos en el COPg. Beltrán et al. (2021)

observaron incrementos en COPg y COPf tras 8 años de CC, siendo mayores para el COPg. Estos cambios no en todos los casos produjeron incrementos observables en el COS. Beltrán et al. (2018) observaron un incremento del 39 % en el COPf en lotes con CC, mientras que el incremento en el COPg fue de 61 %. Duval et al. (2016) estudiaron el efecto de CC en comparación con un barbecho desnudo a los 3, 4 y 6 años de su implementación. Estos autores, observaron un incremento en COPg a partir del cuarto año, mientras que el incremento en COPf solo pudo ser observado a partir del sexto año. Duval et al. (2016) también observaron un cambio en la fracción del carbono orgánico asociado a minerales (COM), con menor contenido en lotes bajo CC que bajo barbecho desnudo. Esta diferencia solo fue observable a los 3 años de iniciado el ensayo (y no en años subsiguientes), y fue atribuida a mejores condiciones para la estabilización de la MO observadas en el lote bajo barbecho desnudo (mayor contenido de humedad en un año seco). Si bien el COM se trata de una fracción considerada más estable y con tasas de transformación bajas, algunos estudios sugieren que cambios en el manejo pueden afectar fracciones estabilizadas de COS (Six et al., 2002; Piñeiro et al., 2009; Hopkins et al., 2012), y que las raíces de los CC pueden tener un efecto disruptivo semejante a la acción de las labranzas estimulando la mineralización del COS (Blanco-Canqui et al., 2015).

2.2. MARCO TEÓRICO

La MO en uno de los componentes más reconocidos de la fertilidad edáfica, siendo el producto y la fuente de la vida en el suelo (Wander, 2004). Su contenido tiene una profunda influencia en la mayoría de las propiedades fisicoquímicas de los suelos y en su fertilidad, aun cuando solo compone entre un 0,5 y un 5 % en peso de los horizontes superficiales en suelos minerales. La MO está formada por moléculas complejas, con una elevada superficie específica y numerosos grupos funcionales que le permiten interactuar con iones y moléculas orgánicas (Murphy, 2015). Por esto, exhibe una gran capacidad de intercambio catiónico (siendo responsable de entre un 20 y un 70 % de la capacidad de intercambio catiónico de muchos suelos). Además, puede retener numerosos nutrientes y contaminantes, entre ellos metales pesados y pesticidas (Sparks, 2003). Por lo mismo, la MO actúa como buffer en el suelo, regulando los cambios de pH en un rango cercano a la neutralidad (Murphy, 2015; Sparks, 2003). La MO interactúa también con la fracción mineral del suelo y especialmente con las arcillas, actuando como una sustancia cementante en los procesos de estructuración y formación de agregados (Hochman et al., 2021; Tisdall y Oades, 1982). Por otra parte, la MO alimenta la biota del suelo, una gran variedad de micro y macro-organismos que cumplen un rol crucial en el ciclado de nutrientes, la generación y el mantenimiento de la estructura, y la formación de más MO (Sparks, 2003). Por su color oscuro, la MO absorbe energía solar generando un incremento en la temperatura del suelo, que puede resultar crucial para la germinación de algunas semillas (Pansu y Gautheyrou, 2007). Otra importante propiedad es su capacidad de retención hídrica (Lal, 2020). La MO puede retener varias veces su peso en agua, con lo cual modifica las propiedades hídricas del suelo, y a la vez actúa como un moderador de la humedad amortiguando los ciclos de humedecimiento y secado

(Murphy, 2015). Además de su rol estructural y de funcionar como un motor para la vida en el suelo, la MO conforma un compartimento importante dentro del ciclo de C, que almacena unas tres veces la cantidad de C presente en la atmósfera (Swift, 1996). Sumado a su importancia por la cantidad de C que almacena, la MO del suelo es un compartimento dinámico, pudiendo actuar a la vez como fuente y como sumidero de C atmosférico (Adetunji et al., 2020; Lal, 2001).

Existen diversos términos para definir a la fracción orgánica del suelo, con definiciones distintas y que en general no coinciden exactamente en el universo que engloban (Kleber y Johnson, 2010). En este caso vamos a usar el término *materia orgánica del suelo*, para referirnos a todos aquellos compuestos orgánicos de origen animal, vegetal o microbiológico (excluyendo organismos vivos) (Sollins et al., 1996; Swift, 1996). Dentro del conjunto de la MO, se puede distinguir entre las sustancias no húmicas (que incluyen el debrís o restos orgánicos de origen reconocible, y todos los compuestos identificables y de estructura conocida, como ser proteínas y carbohidratos) y las sustancias húmicas (que incluyen el resto del material amorfo y altamente transformado) (Hayes y Swift, 2020; Swift, 1996). Si bien la importancia de la MO del suelo y sus múltiples funciones son ampliamente reconocidas, siendo el contenido de MO uno de los indicadores de fertilidad edáfica más utilizados en agronomía, las estructuras moleculares de estos compuestos y su interacción con la fase mineral son aún tema de estudio (Baveye y Wander, 2019; Kögel-Knabner y Rumpel, 2018; Schnitzer y Monreal, 2011). Esto se debe a que la MO es un conjunto de un sinnúmero de macromoléculas distintas, de muy diverso tamaño, composición y estructura molecular (Hayes y Swift, 2020). Así, una aproximación para describir la composición de la MO de un suelo es estudiar la composición química de la MO como un conjunto. En general, sus componentes principales son el C (que típicamente constituye entre el 52 y el 58 % del peso molecular), el oxígeno (34-39 %), el hidrógeno (3-5 %) y el N (3,7-4,1 %), presentando otros elementos como el fósforo y el azufre en menores proporciones. Sin embargo, esta aproximación no brinda mayor información sobre la diversidad ni la abundancia relativa de distintos grupos de moléculas.

La MO es un conjunto complicado formado por un continuo de moléculas heterogéneas y complejas, que varían entre sí en tamaño, composición y propiedades (Wander, 2004; Oik et al., 2019a). Sus pesos moleculares pueden variar entre cientos y millones de daltons (Swift, 1996). En cuanto a su composición, en líneas generales se conoce que presentan grupos aromáticos con múltiples sustituyentes, cadenas alifáticas de diferente longitud y múltiples grupos funcionales, predominando los grupos carboxilo, hidroxilo y carbonilo, pudiendo presentar también otros grupos como quinonas, ésteres, aldehídos, aminas y amidas (Kögel-Knabner y Rumpel, 2018; Swift, 1996). Es a esta complejidad, a la presencia de grupos funcionales y a su elevada superficie específica a lo que se debe la elevada reactividad de la MO. Estas macromoléculas pueden presentar diversos arreglos que les dan propiedades únicas. Además, estos compuestos no son estáticos, sino que están sometidos a constantes transformaciones, principalmente por la actividad microbiológica (Hayes y Swift, 2020; Janzen, 2006; Kleber y Johnson, 2010). Presentan entonces historias, edades y grados de transformación diverso, que le otorgan distinto grado de estabilidad y

resistencia a la degradación microbológica (con tiempos de permanencia en el suelo que pueden ir de unas pocas horas a miles de años) (Hayes y Swift, 2020; Swift, 1996). Los componentes de la MO pueden verse sometidos a múltiples transformaciones, que simplificaremos en dos grandes grupos. Un primer grupo incluye aquellas reacciones que tienden a su degradación a sustancias más simples y eventual mineralización de la MO (Janzen, 2006; Rasse et al., 2005). Por otra parte, existe otra serie de transformaciones biológicas cuyos productos son otros compuestos, generalmente más resistentes a la degradación que los precursores, y que aquí llamaremos reacciones de humificación (Hayes y Swift, 2020; Janzen, 2006). En cuanto a la estabilización de los compuestos orgánicos, esta parece ser el resultado de dos procesos principales: la transformación química (que incluye transformaciones de origen biológico) hacia estructuras más estables y menos reactivas (más recalcitrantes), y la estabilización y protección mediante interacción fisicoquímica con la fase mineral y los agregados del suelo (Hayes y Swift, 2020; Murphy, 2015; Sollins et al., 1996; Swift, 1996; Rasse et al., 2005). La Figura 2.1, que representa un complejo órgano-mineral, es ilustrativa de la enorme complejidad en composición y estructura que puede presentar una molécula de MO.

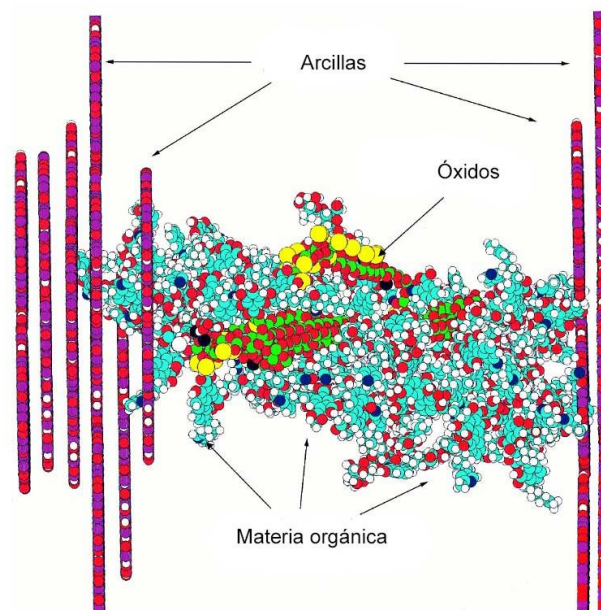


Figura 2.1. Modelo de un complejo órgano-mineral. El mismo incluye MO, en interacción con otras sustancias orgánicas, óxidos de hierro de origen mineral y láminas de arcilla. Los colores indican distintos elementos: hidrógeno, sodio y potasio (blanco); carbono (celeste); oxígeno (rojo); nitrógeno (azul); silicio (violeta); hierro (verde); calcio (amarillo); y magnesio (negro). Adaptado de Leinweber y Schulten (1999).

Dada la complejidad del sistema, existen distintas aproximaciones para el estudio de la composición de la MO. Muchos trabajos se han centrado en la evolución química de la MO a partir de transformaciones biológicas en el proceso de

humificación. La estabilización química de la MO es el producto de cambios en la composición elemental, en la presencia y en el número de grupos funcionales, en la aromaticidad y en la conformación de las moléculas orgánicas (Hayes y Swift, 2020; Sollins et al., 1994). Dentro de este enfoque se incluyen técnicas básicas de extracción y cuantificación de distintos compuestos o grupos de compuestos, hasta el uso de técnicas modernas como técnicas cromatográficas, isótopo-específicas y de espectroscopía (infrarroja, de resonancia magnética nuclear y de resonancia de espín electrónico, entre otras) (Hayes y Swift, 2020; Kögel-Knabner, 2000; Pansu y Gautheyrou, 2007; Schnitzer y Monreal, 2011). Sin embargo, este enfoque para el estudio de la evolución de la MO basado en su composición química, que nace con el estudio mismo de la MO del suelo hacia fines del siglo XIX y que se sigue empleando en la actualidad, ha sido criticado (Basile-Doelsch et al., 2020; Kleber y Johnson, 2010; Kögel-Knabner et al., 2008; Kögel-Knabner y Rumpel, 2018). Esto se debe a que si bien es un hecho que distintas moléculas poseen distinto grado de resistencia a la degradación biológica, este no es el único mecanismo de protección de la MO. Existe también una protección fisicoquímica dada por el grado de interacción con la matriz mineral y la accesibilidad por parte de la biota del suelo al sitio donde se encuentra la MO (Kögel-Knabner y Rumpel, 2018). Por lo tanto, una molécula sencilla y no químicamente recalcitrante puede tener tiempos de residencia largos en el suelo, como resultado de una protección física (Kleber y Johnson, 2010; Robertson et al., 2019). Los compuestos orgánicos pueden establecer distinto tipo y grado de interacción con la fase mineral, como ser sufrir una sorción superficial debida a distintos mecanismos fisicoquímicos, actuar como agente cementante entre partículas en la formación de agregados, o encontrarse ocluidos dentro de los agregados (Oliveira et al., 2019; Swift, 1996). Esta interacción con la fase mineral puede resultar en una protección de la MO contra los procesos de degradación en el suelo (Kögel-Knabner y Rumpel, 2018; Robertson et al., 2019; Six et al., 2002;). La protección fisicoquímica se da por distintos mecanismos que incluyen la imposibilidad de acceso de los microorganismos y enzimas (principales responsables de la degradación), la falta de oxígeno y una disminución en la reactividad como causa de las interacciones intermoleculares con la fase mineral (Murphy, 2015; Six et al., 2002; 2004; Sollins et al., 1996). Si bien en la bibliografía existen posiciones encontradas entre los autores a favor de una aproximación basada en las propiedades y composición química (Schnitzer y Monreal, 2011; Nobili et al., 2020; Olk et al., 2019a; 2019b) y aquellos que rechazan esta postura a favor de estudiar la MO en relación al grado de interacción con la fase mineral (Christensen, 2001; Kleber y Johnson, 2010; Kleber y Lehmann, 2019; Lavalley et al., 2019; Lehmann y Kleber, 2015), las dos aproximaciones, y en particular la combinación de ambas, pueden proveer información valiosa para la caracterización de la MO del suelo (Nobili et al., 2020; Olk et al., 2019a; von Lützow et al., 2007).

Para el estudio conceptual de la composición y dinámica de la MO, resulta de utilidad su división en pools teóricos, que son grupos de compuestos a los que se atribuye distintas propiedades y tiempo de permanencia en el suelo (o “tasas de transformación”) (Sollins et al., 1996). Los modelos consideran típicamente tres pools principales: un pool activo, cuya tasa de transformación se mide en el orden de años; un pool de descomposición lenta o intermedio, que tiene tiempos de permanencia en

el suelo de décadas; y un pool persistente, con tasas de decaimiento del orden de siglos a milenios (Wander, 2004). De estos pools, el activo y el intermedio son los que más influyen la disponibilidad de nutrientes y más rápidamente reflejan cambios derivados del manejo. El pool persistente, que generalmente es el más abundante, se comporta como un reservorio estable de MO y genera la mayor contribución a la capacidad de sorción e intercambio catiónico, a la capacidad de retener agua y al secuestro de C (Wander, 2004). En este marco teórico, la dinámica de la MO se define como la entrada, salida, o transferencia entre pools o compartimentos (Sollins et al., 1996). Es importante destacar que la dinámica de la MO no es un proceso lineal ni unidireccional, sino que, de manera continua y en cada subgrupo o pool de MO que podamos definir, se dan procesos que pueden modificar la estabilidad de la misma (entendida como el producto de la recalcitrancia, las interacciones con la fase mineral y la accesibilidad) hacia estados más o menos resistentes a la degradación (Basile-Doelsch et al., 2020; Doane et al., 2003; Janzen, 2006; Kleber y Johnson, 2010; Paul, 2016; Zech et al., 1997).

En un esquema muy general de la dinámica de la MO en el suelo, esta se forma a partir de residuos orgánicos, que pueden proceder de la biomasa aérea de las plantas, de las raíces y materiales derivados (exudados e hifas), y de la biomasa y residuos de microorganismos y fauna edáfica (Figura 2.2) (Basile-Doelsch et al., 2020; Chertov y Komarov, 1997; Cotrufo et al., 2013; Paul, 2016). Dentro del compartimento de la MO, las moléculas orgánicas pueden sufrir múltiples y continuas transformaciones en su composición química y en la interacción con la fracción mineral, que modifican su resistencia a la degradación. La MO puede ser mineralizada, es decir degradada a compuestos más simples con eventual liberación de dióxido de carbono y nutrientes, proceso que le permite cumplir su función de fuente de nutrientes para las plantas y la fauna del suelo (Janzen, 2006). Algo que no debe ser pasado por alto es que no hay un orden en la evolución de la MO y su paso por pools de distinta dinámica (Paul, 2016). Toda la MO, independientemente de en qué pool teórico se la clasifique, es susceptible a transformaciones fisicoquímicas que incrementen o disminuyan su estabilidad (Huang et al., 2021). Del mismo modo, todos los compuestos orgánicos, incluso aquellos englobados en el pool más lento de MO, así como los residuos que aún no fueron transformados en MO, pueden ser mineralizados (Basile-Doelsch et al., 2020; Chertov y Komarov, 1997), aunque las tasas de transformación de los distintos pools de MO pueden ser muy distintos. Además de los procesos de humificación, mineralización y transformación de la MO entre distintos pools, pueden ocurrir cambios en el contenido de MO debido al lixiviado de compuestos solubles hacia capas más profundas del suelo, o por traslocación hacia otras posiciones del terreno (Basile-Doelsch et al., 2020; Chertov y Komarov, 1997; Zech et al., 1997). Esta dinámica y el balance entre las entradas y salidas así como entre los distintos pools de MO, va a depender de múltiples factores entre los que se encuentran: la cantidad y calidad de los residuos que ingresan al suelo y las características de la MO previamente presente, la comunidad de descomponedores presentes en el suelo, factores climáticos como la frecuencia e intensidad de las lluvias y la temperatura, factores edáficos como la textura y estructura del suelo, factores del terreno como la pendiente, entre otros (Chertov y Komarov, 1997; Paul, 2016). Además, esta dinámica se va a ver afectada por la presencia y características

de las especies vegetales, cobertura del suelo y prácticas de manejo como las labranzas (Paul, 2016).

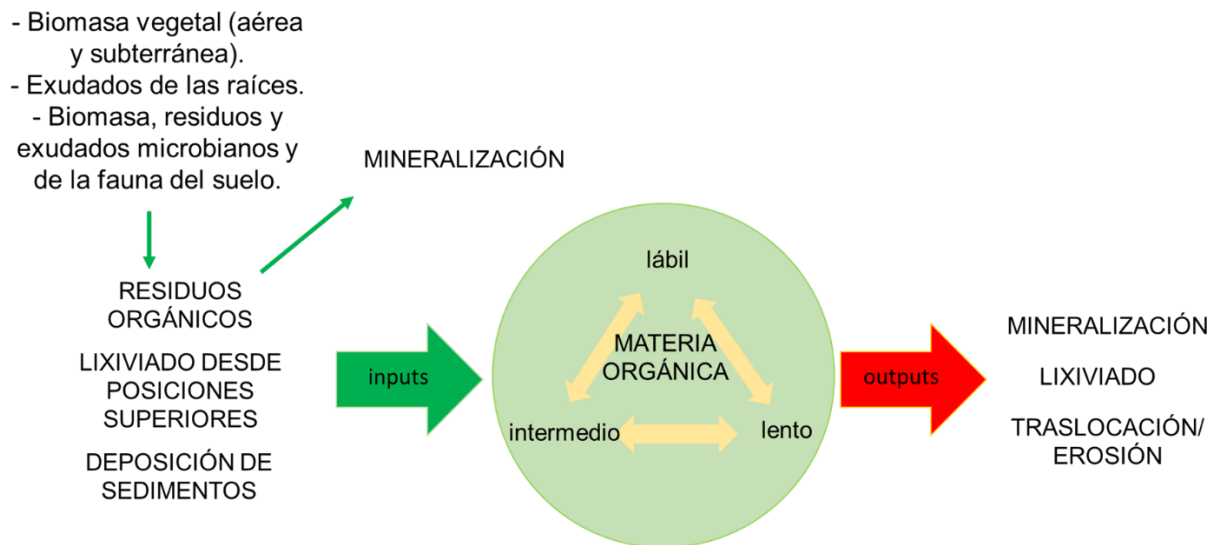


Figura 2.2. Esquema de la dinámica de la materia orgánica en el suelo, identificando inputs, outputs y la transformación entre distintos pools teóricos con distintas tasas de transformación (un pool lábil, un pool intermedio y un pool lento).

2.2.1. Fraccionamiento de la materia orgánica

Una aproximación práctica al estudio de la composición de la MO es el fraccionamiento en laboratorio de grupos de compuestos con propiedades similares (como ser propiedades fisicoquímicas, peso molecular o grado de interacción con partículas y agregados de distintos tamaños) (Lavallee et al., 2020; Swift, 1996). Desde fines del siglo XVIII, se han utilizado numerosos métodos para la extracción y fraccionamiento de la MO, con un primer objetivo de intentar caracterizarla químicamente (Wander, 2004), pero también de obtener fracciones que describan su funcionalidad y su dinámica en el suelo (Recio-Vazquez et al., 2014). Al tener propiedades comunes, se espera que estos compuestos tengan también funciones y una dinámica similar en el suelo (Swift, 1996). Al elegir este abordaje para el estudio de la MO es preciso tener en cuenta dos cosas. Una es que las fracciones obtenidas son conjuntos de moléculas arbitrarios y dependientes del método, que pueden presentar propiedades comunes, y a los que por sus características se puede asociar a distintos pools teóricos de MO de diferente edad y estabilidad (Cambardella y Elliott, 1992; Christensen, 2001; Olk et al., 2019a). Otra es que los constituyentes de la MO sufren (en mayor o menor grado) transformaciones como resultado de los procesos de extracción (Olk et al., 2019a; Swift, 1996; Wander, 2004). Sin embargo, este abordaje resulta muy útil para ver los efectos de las prácticas de manejo. El estudio de las fracciones más dinámicas de la MO permite detectar cambios inducidos por manejo en períodos de tiempo más cortos que el estudio del conjunto de la MO (Bongiovanni y Lobartini, 2006; Ding et al., 2006; Duval et al., 2013; Plaza-Bonilla et

al., 2014; Olk et al., 2019a). Más aún, puede existir una correlación entre algunas de estas fracciones y propiedades edáficas de interés, como ser la estructura y las propiedades hidráulicas (Murphy, 2015; Recio-Vazquez et al., 2014).

Métodos químicos de fraccionamiento según solubilidad a distintos pHs

Existen diferentes métodos químicos para fraccionar la MO en base a su solubilidad en distintos solventes o a su resistencia a la degradación por distintos agentes químicos (von Lützow et al., 2007). Una manera ampliamente difundida consiste en fraccionar la MO a partir de su solubilidad a diferentes pHs. De esta manera, se obtienen tres fracciones principales: los AH, los AF y las huminas (Olk et al., 2019a; Schnitzer y Monreal, 2011). Estas fracciones se relacionan con familias de moléculas con grado de humificación, composición química y peso molecular similares, y por lo tanto similar resistencia a la degradación biológica (Yang et al., 2004). Los AF se definen como la fracción que permanece en solución tanto a pH ácido como alcalino (Hayes y Swift, 2020). Son sustancias de color claro en solución, y tienen menor peso molecular y mayor contenido de oxígeno que el resto de las sustancias húmicas, resultando más polares (Schnitzer y Monreal, 2011). Esta fracción presenta tasas de transformación altas, con lo que se suele asociar a un pool más dinámico de MO. Al ser más solubles y móviles, los AF podrían ser los principales responsables del transporte de cationes dentro del suelo por medio de la formación de complejos organo-metálicos (Benites et al., 2003). Los AH son una fracción soluble a pH alcalino pero que precipita al disminuir el pH por debajo de 2 (Schnitzer y Monreal, 2011). Esta fracción, que se caracteriza por su color oscuro en solución, está compuesta por polímeros de peso molecular relativamente alto responsables de la mayor parte de la capacidad de intercambio catiónico de origen orgánico (Benites et al., 2003; Swift, 1996). Los AH presentan tasas de transformación y resistencia a la degradación intermedia entre los AF y las huminas. Tanto los AH como AF cumplen un importante rol en la estabilización de agregados y en la fertilidad del suelo (Yang et al., 2004). Las huminas son la fracción que permanece insoluble tanto a pH ácido como pH alcalino. Suele ser la fracción más abundante, y dada su resistencia a la degradación representa un stock más estable de MO, y por ende cumple un papel importante en el secuestro de C (Yang et al., 2004). Fraccionamientos ulteriores permiten obtener otras fracciones con propiedades más cercanas dentro de cada fracción, como ser ácidos húmicos grises y marrones, ácidos fúlvicos crónicos y apocrónicos, u otras (Duchaufour, 1982; Pansu y Gautheyrou, 2007). En todo caso, y como ya se mencionó antes, todas estas fracciones son artefactos de laboratorio, y los compuestos extraídos en cada una de ellas dependen de las condiciones experimentales elegidas (por ejemplo, del pH, del tiempo, y del ácido y la base usados para la extracción) (Swift, 1996).

Algunos autores son críticos al fraccionamiento químico de la MO, por un lado, por la agresividad de los procedimientos que modifican la naturaleza de los compuestos extraídos, y por otro porque no siempre las fracciones obtenidas reflejan la función y la dinámica de la MO (Kleber y Lehmann, 2019; Wander, 2004). Estos autores plantean que además de la evidente dificultad que representa por su

complejidad, el estudio de la diversidad de estructuras químicas presentes en la MO es de cuestionable utilidad práctica (Wander, 2004). Esto se debe a que los procesos de estabilización de la MO no son consecuencia únicamente de un cambio en la composición química hacia estructuras más resistentes a la degradación, sino que también (e incluso para algunos autores principalmente) a los procesos de interacción entre compuestos orgánicos y minerales, que generan una protección fisicoquímica contra la degradación biológica (Christensen, 2001; Kögel-Knabner y Rumpel, 2018; Rasse et al., 2005; Robertson et al., 2019; Sollins et al., 1996). Sin embargo, este es el enfoque más tradicional del estudio de la composición de la MO y sigue siendo usado para estudiar el efecto de distintas prácticas de manejo (Olk et al., 2019a; 2019b).

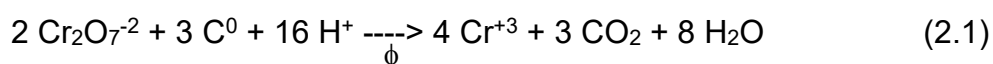
Métodos físicos de fraccionamiento por granulometría

Existen diversos métodos basados en principios físicos para el fraccionamiento de la MO, como ser la separación por densidad, la sedimentación, o el fraccionamiento de distintos tamaños de partículas por tamizado (Pansu y Gautheyrou, 2007). Una metodología ampliamente difundida consiste en obtener distintas fracciones granulométricas, que se relacionan con distinto grado de protección fisicoquímica y de interacción con la fase mineral (Kögel-Knabner et al., 2008; Lavalley et al., 2019; Wander, 2004). Para esto es preciso generar una dispersión del suelo en agregados más pequeños (microagregados y complejos órgano-minerales), que puede ser física o física y química, para luego separar las fracciones según su tamaño (von Lützow et al., 2007). La dispersión física puede ser por ultra-sonido o por agitación (Christensen, 1992) y la división por tamaños se hace empleando tamices (Cambardella y Elliot, 1992). Una vez más, la división entre estas fracciones es arbitraria y va a depender del método usado (entre otras cosas del método de dispersión escogido y del tamaño de malla de los tamices) (von Lützow et al., 2007). Una división común considera tres fracciones principales: la fracción gruesa se define como aquella de tamaño entre 106-2000 μm , la fracción fina como aquella entre 53-106 μm y la fracción asociada a minerales aquella de tamaño menor a 53 μm . La MO asociada a las fracciones gruesa y fina es en general MO más lábil, mientras que la que se encuentra asociada a minerales es MO íntimamente ligada a la fracción mineral, y por lo tanto más protegida contra la degradación (Cambardella y Elliott, 1992; Duval et al., 2013; Lavalley et al., 2019). La fracción gruesa suele incluir restos recientes de plantas y hongos, por lo que resulta muy sensible a las prácticas de manejo, pero también presenta una elevada variabilidad temporal y en profundidad (Wander, 2004). Por presentar distintos grados de estabilización (y por lo tanto distinta resistencia a la degradación) se suele asociar estas fracciones a pools de MO de distinta antigüedad. Sin embargo, algunos autores cuestionan que esto sea así, argumentando que MO de reciente formación puede resultar rápidamente estabilizada (Lavalley et al., 2019).

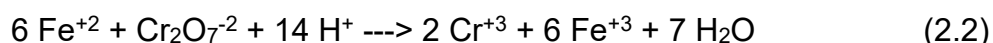
2.2.2. Estimación del contenido de materia orgánica

Existen diversos métodos para determinar el contenido de MO. En general, estos se basan en uno de los siguientes principios: determinación de la masa de materia orgánica removida por ignición u oxidación química; o determinación de uno de los constituyentes de la materia orgánica presente en un porcentaje relativamente constante (generalmente el C). El COS, es uno de los estimativos más ampliamente usado del contenido de MO. Uno de los métodos que más se han empleado para cuantificar el COS es la determinación del contenido de C oxidable por dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) (Schulte y Hoskins, 1995), que en general representa entre un 60 y un 86 % del carbono orgánico total (Walkley y Black, 1934). Esta metodología consiste en oxidar el C orgánico presente en una muestra con una cantidad conocida y en exceso de agente oxidante ($K_2Cr_2O_7$), en medio ácido generado con ácido sulfúrico (H_2SO_4), reacción catalizada por el calor espontáneo producido por la disolución del ácido (que genera una temperatura aproximada de 120 °C) (Schulte y Hoskins, 1995). El exceso de $K_2Cr_2O_7$ es luego titulado con sal de Mohr ($FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$), empleando un indicador colorimétrico para determinar el punto final. A continuación, se detallan las reacciones que ocurren:

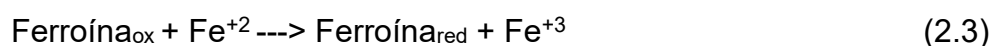
1- Oxidación del C orgánico por el $K_2Cr_2O_7$:



2- El exceso de Cr^{+6} que no se redujo (que no reaccionó con el C) es reducido por el Fe^{+2} de la sal de Mohr:



3- Una vez que todo el Cr^{+6} pasó a Cr^{+3} , el exceso de Fe^{+2} reacciona con el indicador ferroína, haciéndolo pasar de su forma oxidada, de color azul, a su forma reducida de color naranja/rojo:



2.3. HIPÓTESIS

1- Los CC en sistemas bajo siembra directa (SD) generan un aumento en el contenido de MO del suelo en comparación con rotaciones sin CC. El impacto de la inclusión del CC es mayor sobre las fracciones más lábiles de la MO, que resultan indicadores más sensibles que el carbono orgánico total.

2- El contenido de MO y sus fracciones no es constante durante el ciclo de cultivo, siendo más variables los contenidos de las fracciones más lábiles en sistemas con CC que con barbecho desnudo.

2.4. OBJETIVOS

Evaluar el efecto de los CC sobre el contenido, composición y variabilidad temporal de la MO, en relación al barbecho desnudo, en suelos característicos de la región pampeana bajo SD.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Sitios de estudio y muestreo

Para el estudio del efecto de los CC sobre el COS y sus fracciones en el largo plazo, se tomaron muestras en el sitio Villegas (VIL) en un momento del año y en el sitio Pergamino (PER) en tres fechas a lo largo de un año. Para el estudio del efecto de los CC en el corto plazo desde su implementación, se tomaron muestras en los sitios Bellocq (BEL) y Chascomús (CHA) a los dos años de iniciados los ensayos (en CHA, fecha CHA-B2). Para estudiar el efecto de los CC sobre la dinámica temporal del COS y sus fracciones, se tomaron muestras en el sitio CHA en cinco fechas durante los dos primeros años del ensayo: previo a la siembra del primer CC (CHA₀), durante el período de barbecho del 2018 (CHA-B1), al inicio del cultivo principal (CHA-CP₀), al final del cultivo principal (CHA-CP_f), y durante el período de barbecho del 2019 (CHA-B2). Para cada sitio, fecha y tratamiento, se tomaron muestras disturbadas, compuestas y por triplicado, a cuatro profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm y 20-40 cm). Los muestreos se realizaron en lotes adyacentes en la misma posición del paisaje.

2.4.2. Fraccionamiento químico del carbono orgánico del suelo

El fraccionamiento químico se realizó siguiendo el método propuesto por Benites et al. (2003), que es una modificación del método propuesto por Schnitzer (1982) y cuyos conceptos básicos son: disolución de los AF y AH con álcali y separación de las huminas por centrifugación; precipitación de los AH por acidificación y separación de los AF por filtración; y redisolución de los AH con álcali.

Una masa conocida de suelo seco a 40°C y tamizado por 2 mm (aproximadamente 1 g) se colocó en tubos de centrifuga de 50 ml. Se añadieron 20 ml de hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 N, y los tubos fueron agitados manualmente y dejados en reposo por 24 h, con el objetivo de extraer los AF y AH. El sobrenadante (primera extracción de AH+AF) fue separado de la fase sólida por centrifugación (20 min a 4000 rpm). El sobrenadante se reservó y el sólido fue sometido a una segunda extracción más corta: El sólido se resuspendió con NaOH 0,1 N, se agitó manualmente y tras 1 h de reposo se centrifugó por 20 min a 4000 rpm. Los sobrenadantes de las dos extracciones se juntaron y fueron acidificados con ácido sulfúrico (H₂SO₄) 20 % V/V hasta alcanzar un pH de 1,0 ± 0,1, para producir la

precipitación de los AH. Tras 24 h, la mezcla se pasó por un filtro de vacío, empleando un filtro de éster de celulosa de 0,45 µm de tamaño de poro. El líquido filtrado, que consiste en una solución de AF, fue trasvasado y llevado a un volumen final de 50 ml con agua destilada en matraz. A continuación, la fracción retenida en el filtro fue disuelta con NaOH 0,1 N y filtrada por el mismo filtro. El filtrado resultante, que consiste en una solución de AH, fue trasvasado y llevado a un volumen final de 50 ml con agua destilada en matraz. Las fracciones fueron conservadas en la heladera hasta la determinación de COS en cada fracción, que se realizó mediante una adaptación del método de Walkley y Black (1934), según se detalla en el apartado 2.4.4. La determinación fue realizada en cada muestra por duplicado.

2.4.3. Fraccionamiento físico del carbono orgánico del suelo

El fraccionamiento físico se realizó siguiendo el método descrito por Duval et al. (2013) en base al método propuesto por Cambardella y Elliot (1992). Una masa inicial de 50 g de suelo (previamente secado a 40°C y tamizado por 2 mm) se dispersó mediante agitación en un agitador rotatorio, con agua y bolitas de vidrio durante 16 horas. Luego, la suspensión se tamizó a través de una torre de tamices de 106 y 53 µm, y fue lavada hasta que el agua de lavado salía limpia al ojo. De esta manera se obtuvieron tres fracciones:

- el carbono orgánico particulado grueso (COPg), que es la fracción asociada a partículas entre 106 y 2000 µm,
- el carbono orgánico particulado fino (COPf), que es la fracción entre 53 y 106 µm, y
- el carbono orgánico asociado a minerales (COM), que es la fracción menor a 53 µm, que fue descartada y estimada por diferencia.

Las fracciones COPg y COPf fueron trasvasadas a placas de vidrio, se secaron a 40°C durante 24 h y se pesó el material colectado. La determinación del contenido de COS de cada fracción se realizó siguiendo el método de Walkley y Black (1934) descrito en 2.4.4.

2.4.4. Determinación de carbono orgánico

El contenido de carbono orgánico total y de las fracciones se determinó por el micro-método de oxidación húmeda descrito en SAMLA (2004), que es una adaptación del método de Walkley y Black (1934). En el caso de los AF y AH, el volumen de H₂SO₄ se ajustó para alcanzar el pH de reacción en el medio líquido de la muestra según Benites et al. (2003). En el caso del COPg y el COPf, la cantidad de los distintos reactivos se ajustó para lograr determinar estas muestras que contienen un mayor porcentaje de C orgánico oxidable. Los procedimientos para cada una de

las fracciones se detallan a continuación. Para determinar el punto final se usó el indicador ferroína.

Determinación y cálculo del contenido de COS

Para la determinación del COS, una masa conocida de entre 0,1 y 0,2 g de muestra de suelo seca y tamizada por tamiz de 0,5 mm fue colocada en tubos de ensayo de 30 ml. Para cada muestra, la determinación se realizó por duplicado. A cada tubo de ensayo se le agregó 1,5 ml de solución de dicromato ($K_2Cr_2O_7$, 1N) y 3 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). Los tubos fueron agitados suavemente de manera manual, y dejados por 20 min en una caja de telgopor para mantener la temperatura generada por el calor de disolución del ácido. Pasados los 20 minutos, se agregó agua destilada hasta completar aproximadamente la mitad del tubo, con el fin de ayudar a detener la reacción y facilitar la visualización del punto final de la titulación. Las muestras fueron luego llevadas a heladera por 20 minutos. Se agregaron 2 gotas del indicador ferroína ($Fe(1,10\text{-fenantrolina})SO_4$). Las muestras se titularon con sal de Mohr ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$, 0,3 N), con un aireador de pecera dentro de la muestra para mantener la agitación, usando como punto final el cambio de color verde azulado a marrón-anaranjado. En cada tanda de determinaciones se incluyeron dos blancos, a los que no se agregó muestra de suelo.

El contenido de COS fue determinado a partir del $K_2Cr_2O_7$ que reaccionó con el COS, que se obtiene como el $K_2Cr_2O_7$ inicial menos el $K_2Cr_2O_7$ excedente que reaccionó con la sal de Mohr según la siguiente ecuación:

$$\% COS = \frac{12 \text{ gC}}{4 \text{ eq}} \times \frac{(V_{K_2Cr_2O_7} \times C_{K_2Cr_2O_7} - V_{Mohr} \times C_{Mohr})}{m_{suelo}} \times 100 \quad (2.4)$$

donde $V_{K_2Cr_2O_7}$ y V_{Mohr} son los volúmenes de $K_2Cr_2O_7$ y sal de Mohr expresados en L, y $C_{K_2Cr_2O_7}$ y C_{Mohr} las concentraciones expresadas en $eq \cdot L^{-1}$; m_{suelo} es la masa inicial de suelo expresada en g, y $12/4 \text{ g} \cdot eq^{-1}$ la masa equivalente del C en la reacción.

Por su parte, la concentración de la solución de sal de Mohr se calculó según la siguiente ecuación:

$$C_{Mohr} = \frac{(V_{K_2Cr_2O_7} \times C_{K_2Cr_2O_7})}{V_{Mohr \text{ blanco}}} \quad (2.5)$$

donde $V_{Mohr \text{ blanco}}$ es el volumen de sal de Mohr empleado en la titulación del blanco. Las determinaciones fueron realizadas por duplicado.

Adicionalmente se calculó el contenido promedio de COS por hectárea para cada fecha y tratamiento, considerando los primeros 40 cm de suelo, como un promedio ponderado del COS en las distintas capas, según la siguiente ecuación:

$$COS [Tn. ha^{-1}] = \sum COS_i [Kg C. Kg^{-1}] \times Dap_i [Kg. m^{-3}] \times Prof_i [m] \times \frac{10000 [m^2 \cdot ha^{-1}]}{1000 [Kg \cdot Tn^{-1}]} \quad (2.6)$$

donde COS_i es el contenido promedio de COS en la capa i , Dap_i es la densidad aparente del suelo en esa capa y $Prof_i$ el espesor de esa capa, y la sumatoria se realiza en las cuatro capas de suelo estudiadas (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm y 20-40 cm). Al emplearse los contenidos promedio, estos datos son descriptivos y por lo tanto no se realizó un análisis estadístico.

Determinación y cálculo del contenido de ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas

Para la determinación del contenido de COS en las fracciones de AF y AH, se tomaron alícuotas de 5 ml de cada muestra. Las alícuotas de 5 ml se colocaron en tubos de ensayo de 30 ml, se agregó 1 ml de $K_2Cr_2O_7$ (0,252 N) y 5 ml de H_2SO_4 concentrado. Las determinaciones fueron realizadas por duplicado, siguiendo lo descrito para la determinación del COS, pero titulando con sal de Mohr 0,06 N. El contenido de C en la fracción de huminas se estimó por diferencia, sustrayendo el contenido de AF y AH al contenido de COS.

El contenido de C en cada una de las fracciones se calculó según las siguientes ecuaciones:

$$\% AF = \frac{12 \text{ gC}}{4 \text{ eq}} \times \frac{(V_{K_2Cr_2O_7} \times C_{K_2Cr_2O_7} - V_{Mohr} \times C_{Mohr})}{m_{suelo}} \times \frac{50}{5} \times 100 \quad (2.7)$$

$$\% AH = \frac{12 \text{ gC}}{4 \text{ eq}} \times \frac{(V_{K_2Cr_2O_7} \times C_{K_2Cr_2O_7} - V_{Mohr} \times C_{Mohr})}{m_{suelo}} \times \frac{50}{5} \times 100 \quad (2.8)$$

$$\% \text{ huminas} = \% COS - \% AF - \% AH \quad (2.9)$$

donde 50/5 es la relación entre el volumen al que se diluye la fracción (50 mL) y la alícuota titulada (5 mL).

Determinación y cálculo del contenido de carbono orgánico en las fracciones físicas

Para la determinación del contenido de C en las fracciones de COPg y COPf, una cantidad conocida de muestra (entre 0,5-0,7 g) seca y tamizada por tamiz de 0,5 mm fue colocada en tubos de ensayo de 30 ml. Para cada muestra, la determinación se realizó por duplicado. A cada tubo de ensayo se le agregó una cantidad conocida de entre 1,5 y 3 ml de $K_2Cr_2O_7$ (1N) (según el contenido de C presente en las muestras) y el doble de volumen de H_2SO_4 concentrado. La determinación se realizó siguiendo lo descrito para la determinación del COS.

El contenido de C en la fracción de COM se estimó por diferencia, sustrayendo el contenido de COPg y COPf al contenido de COS. El cálculo del contenido de C en cada fracción se realizó según las siguientes ecuaciones:

$$\% COPg = \frac{12 \text{ gC}}{4 \text{ eq}} \times \frac{(V_{K_2Cr_2O_7} \times C_{K_2Cr_2O_7} - V_{Mohr} \times C_{Mohr})}{m_{titulada}} \times \frac{m_{COPg}}{m_{suelo \ i}} \times 100 \quad (2.10)$$

$$\% \text{ COPf} = \frac{12 \text{ gC}}{4 \text{ eq}} \times \frac{(V_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} \times C_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} - V_{\text{Mohr}} \times C_{\text{Mohr}})}{m_{\text{titulada}}} \times \frac{m_{\text{COPf}}}{m_{\text{suelo } i}} \times 100 \quad (2.11)$$

$$\% \text{ COM} = \% \text{ COS} - \% \text{ COPg} - \% \text{ COPf} \quad (2.12)$$

donde m_{titulada} es la masa de cada fracción que se emplea en la titulación, expresada en g; m_{COPg} y m_{COPf} son las masas recuperadas de los tamices de las fracciones COPg y COPf, respectivamente, en g; y $m_{\text{suelo } i}$ es la masa inicial de suelo que se dispersa (50 g).

Cálculo de la contribución relativa de cada fracción al carbono orgánico del suelo

La contribución de cada fracción al COS expresada en porcentaje se obtuvo como:

$$\% \frac{\text{fracción}}{\text{COS}} = 100 \times \frac{\% \text{ fracción}}{\% \text{ COS}} \quad (2.13)$$

2.4.5. Análisis estadístico

En cada sitio y para cada profundidad se realizaron tests de ANAVA para determinar el efecto de los factores estudiados y de la interacción sobre las variables estudiadas (COS y sus fracciones, y contribución relativa de cada fracción al COS). Para VIL, se realizó un ANAVA bifactorial con el cultivo principal (con 2 niveles: soja y rotación) y la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factores. Para PER, se realizó un ANAVA bifactorial con la fecha (con 3 niveles: PER-CP_o, PER-CP_f y PER-B_f) y la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factores. Para BEL, se realizó un ANAVA bifactorial con el cultivo principal (con 3 niveles: maíz-soja, trigo/soja-maíz y soja-trigo/soja) y la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factores. En CHA, para analizar el efecto acumulado de dos años de CC se realizó un ANAVA unifactorial en CHA-B2, con la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factor. Para evaluar la variabilidad temporal en CHA, se realizó un ANAVA bifactorial con la fecha (con 5 niveles: CHA_o, CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f, CHA-B2) y la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factores. Los valores fueron expresados como la media ± el desvío estándar. Los resultados de los ANAVA se detallan en el Anexo I. En todos los casos, si existió interacción entre los factores se analizaron los datos generando una nueva variable a partir de los dos factores. Las medias fueron comparadas usando la prueba de Fisher LSD 50, con nivel de significancia de 0,05, y la presencia de diferencias significativas se indicó usando letras diferentes. Todos los análisis se realizaron usando el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2008).

2.5. RESULTADOS

2.5.1. Efecto a largo plazo de los cultivos de cobertura en dos suelos de diferente textura

Villegas

En el Anexo I – Tabla I se muestran los resultados del ANAVA para el sitio VIL. En la capa de 0-5 cm, el COS, las huminas y el COM presentaron interacción entre los factores (presencia de CC y cultivo principal). El resto de las fracciones no presentaron efectos significativos de los factores estudiados. En la capa de 5-10 cm, el COS y las huminas presentaron efecto del cultivo principal; el COPg y el COM presentaron efectos independientes del CC y el cultivo principal. Las demás fracciones no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 10-20 cm, el COPf presentó efecto del cultivo principal, mientras que el COS y las demás fracciones no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 20-40 cm, el COS presentó efectos independientes del CC y el cultivo principal, el COM presentó efecto de la interacción entre CC y cultivo principal y las demás fracciones no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En cuanto al efecto sobre la contribución relativa de cada una de las fracciones al COS, en las capas de 0-5 y 10-20 cm no hubo interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 5-10 cm, el COPg/COS presentó interacción entre CC y cultivo principal, mientras que las razones entre las demás fracciones y el COS no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 20-40 cm, el COPf/COS y el COM/COS presentaron efecto de la presencia de CC, mientras que las razones entre las demás fracciones y el COS no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados.

En líneas generales se observó que los CC pueden incrementar el COS en los primeros 10 cm (por incrementos en COPg, COM y huminas), a la vez que pueden producir una disminución en la capa de 20-40 cm. El efecto de los CC fue mayor en el cultivo de soja que en la rotación soja-maíz, aunque la rotación tendió a presentar mayor contenido de COS, huminas, COPf y COM que el cultivo de soja, independientemente de la presencia de CC. Además, las fracciones físicas resultaron más sensibles a la inclusión de CC que las fracciones químicas.

En la Figura 2.3 se muestra el contenido de COS para los distintos tratamientos en las distintas profundidades para el sitio VIL. En la capa de 0-5 cm, puede observarse un mayor contenido de COS en sistemas con CC. En la profundidad de 5-10 cm, se observa un mayor contenido de COS en la rotación (soja-maíz) que en el cultivo de soja, sin efecto de la presencia de CC. Mayores valores de COS en la rotación se repiten en la profundidad de 20-40 cm. En esta profundidad también se observa mayor contenido de COS en sistemas sin CC. En la profundidad de 10-20 cm no se observaron diferencias significativas en el contenido de COS. El

contenido de COS en los primeros 40 cm de suelo, fue de 25 t.ha⁻¹ para R_{CC}, 33 t.ha⁻¹ para R, 20 t.ha⁻¹ para S y 25 t.ha⁻¹ para S_{CC}.

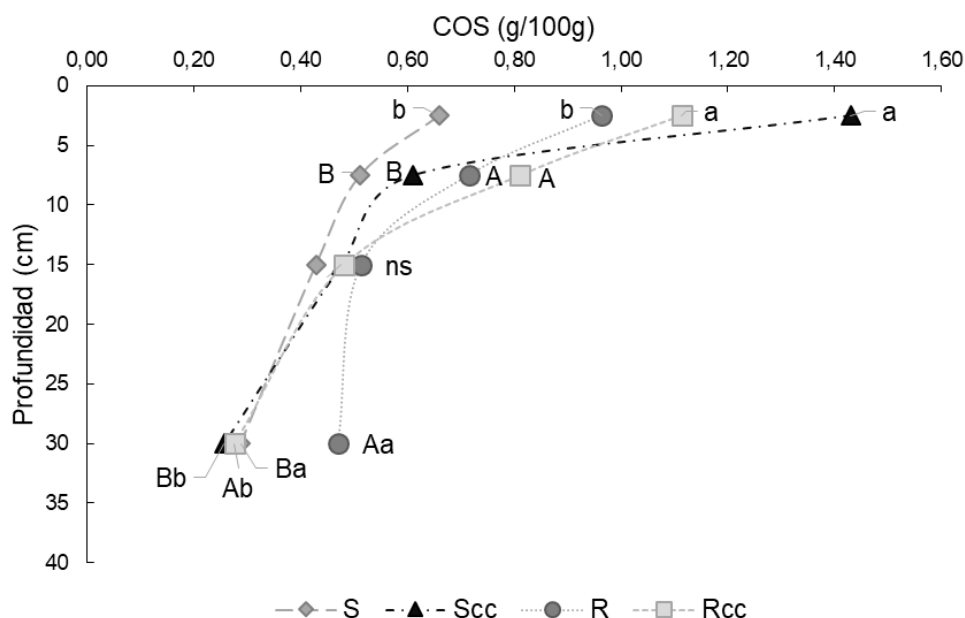


Figura 2.3. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Villegas (VIL). S = soja, S_{CC} = soja con CC, R = rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivos principales, y letras minúsculas indican diferencias cuando hubo efecto de la presencia del CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.

En cuanto a las fracciones obtenidas por métodos químicos, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en las fracciones de AF y AH en ninguna de las profundidades estudiadas (Figura 2.4). Se observaron diferencias entre tratamientos en el contenido de huminas en los primeros 10 cm de suelo. En la capa de 0-5 cm el contenido de huminas siguió el orden S_{CC} > R=R_{CC} > S. En la capa de 5-10 cm, el contenido de huminas fue mayor en lotes bajo rotación soja-maíz (con y sin CC), que en lotes donde el cultivo de verano fue soja.

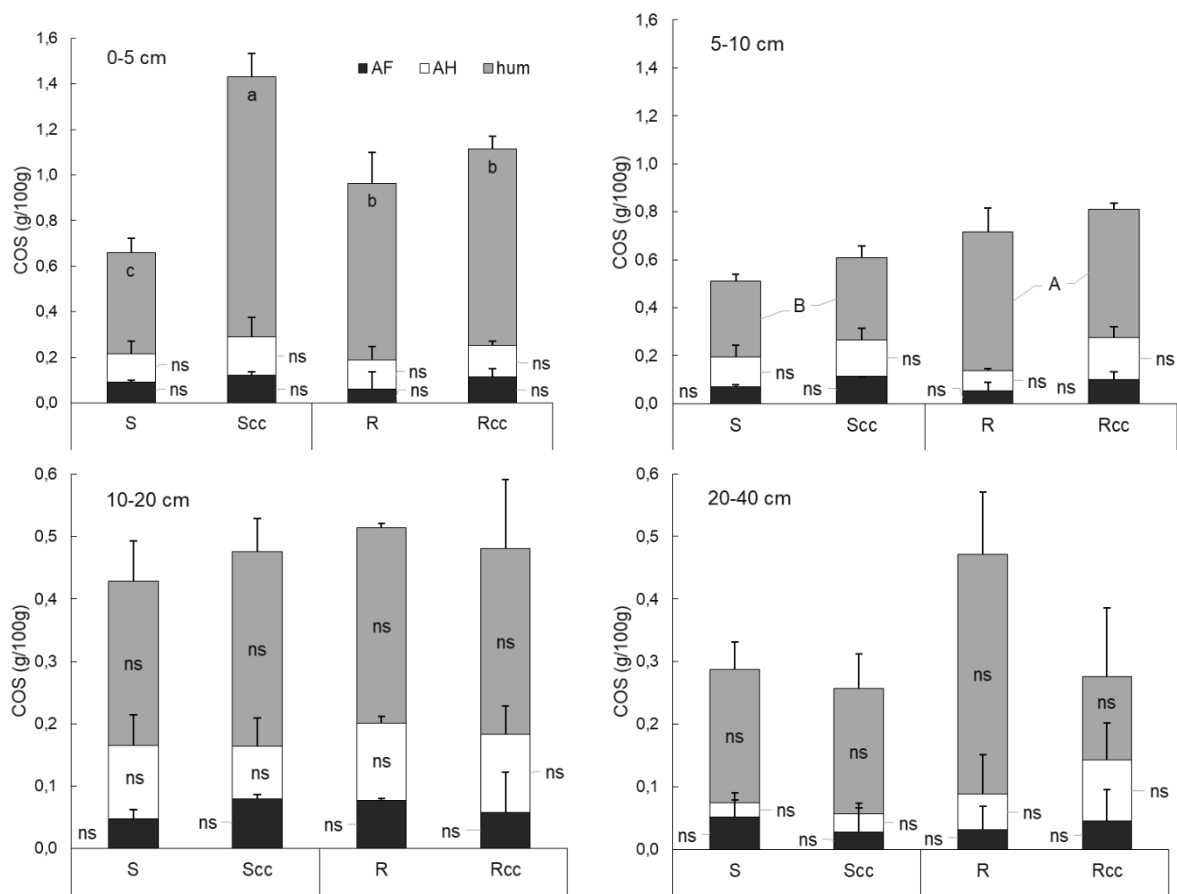


Figura 2.4. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Villegas (VIL). AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. S = soja, Scc = soja con CC, R = rotación soja-maíz, Rcc = rotación soja-maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivos principales, y letras minúsculas indican efectos del factor cultivo principal*CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.

Al analizar las fracciones físicas del COS, se observan diferencias entre tratamientos en distintas fracciones y en todas las profundidades (Figura 2.5). En superficie (0-5 cm), se observaron diferencias en el contenido de COM, que siguió el orden Scc > R=Rcc > S. En 5-10 cm, se observaron diferencias en el COM, que fue mayor en la rotación soja-maíz en comparación con el cultivo de soja (independientemente de la presencia de CC) y en los lotes con CC que en los lotes sin CC. En esta profundidad también se observaron diferencias en el contenido de COPg, que fue mayor en Rcc que en el resto de los sistemas. En la capa de 10-20 cm, sólo se observaron diferencias significativas en el COPf, que fue mayor en la rotación soja-maíz en comparación con el cultivo de soja (independientemente de la presencia de CC). En la capa de 20-40 cm R presentó el mayor contenido de COM, seguido por S y Scc (sin diferencias significativas entre estos dos últimos tratamientos). La rotación con CC presentó el menor valor de COM, que no tuvo diferencias con Scc pero fue significativamente menor a R y S.

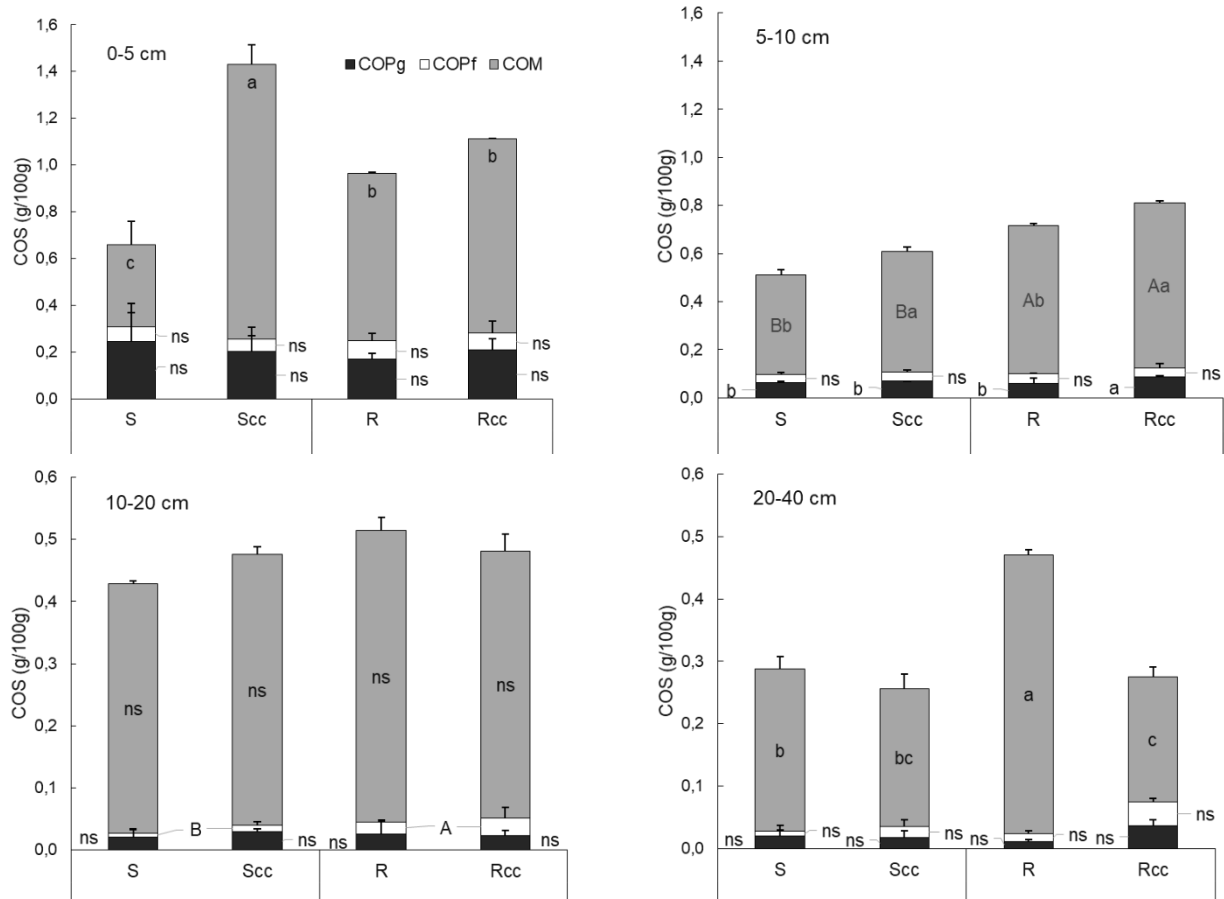


Figura 2.5. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Villegas (VIL). COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. S = soja, S_{cc} = soja con CC, R = rotación soja-maíz, R_{cc} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivos principales, mayúsculas y minúsculas indican los efectos independientes del cultivo principal y de la presencia de CC, respectivamente, y letras minúsculas indican efectos del factor cultivo de principal*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p -valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.

En cuanto a la composición del COS y su distribución entre las distintas fracciones, no se observó efecto de los factores en la contribución relativa de las distintas fracciones del COS obtenidas por métodos químicos (Tabla 2.1). En promedio, los AF representaron el 12 ± 4 %, los AH el 19 ± 8 % y las huminas el 70 ± 10 % del COS. En el caso de las fracciones obtenidas por métodos físicos, se observó efecto de los factores sobre la composición relativa del COS (Tabla 2.2). El COPg/COS en la profundidad de 5-10 cm siguió el orden $S > S_{cc}=R_{cc} > R$. En esta profundidad, la contribución relativa de las demás fracciones al COS no varió de manera significativa. En la profundidad de 20-40 cm, se observó un mayor COPf/COS y un menor COM/COS en lotes con CC que en lotes sin CC.

Tabla 2.1. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos químicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Villegas (VIL).

		S	S_{CC}	R	R_{CC}
AF/COS (%)	0-5 cm	14 ±1	8 ±1	6 ±8	10 ±3
	5-10 cm	13 ±2	18 ±0,2	8 ±9	12 ±4
	10-20 cm	11 ±3	17 ±1	15 ±1	10 ±10
	20-40 cm	18 ±9	11 ±15	6 ±8	20 ±20
AH/COS (%)	0-5 cm	19 ±9	12 ±6	13 ±6	12 ±2
	5-10 cm	24 ±4	25 ±7	12 ±5	22 ±1
	10-20 cm	27 ±12	18 ±10	24 ±2	26 ±9
	20-40 cm	8 ±5	11 ±7	12 ±13	40 ±20
hum/COS (%)	0-5 cm	67 ±9	80 ±7	80 ±14	77 ±5
	5-10 cm	62 ±5	56 ±8	81 ±14	66 ±3
	10-20 cm	62 ±15	66 ±11	61 ±1	62 ±23
	20-40 cm	74 ±15	78 ±22	81 ±21	48 ±40

AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. S = soja, S_{CC} = soja con CC, R = rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC. La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas sobre la contribución relativa de las fracciones al COS en ninguna de las profundidades estudiadas.

Tabla 2.2. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos físicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Villegas (VIL).

		S	S_{CC}	R	R_{CC}
COPg/COS (%)	0-5 cm	37 ±25	14 ±7	18 ±2	19 ±4
	5-10 cm	12 ±1 a	11,4 ±0,1 b	8,4 ±0,1 c	11 ±1 b
	10-20 cm	5 ±3	6 ±1	5 ±4	5 ±2
	20-40 cm	7 ±3	7 ±5	2 ±1	13 ±4
COPf/COS (%)	0-5 cm	10 ±9	6 ±1	8 ±3	7 ±5
	5-10 cm	7 ±5	3,8 ±0,3	6 ±1	4,4 ±0,3
	10-20 cm	1 ±2	3 ±1	3,8 ±0,3	6 ±4
	20-40 cm	2 ±3 B	7 ±4 A	3 ±1 B	14 ±2 A
COM/COS (%)	0-5 cm	53 ±15	82 ±6	74 ±1	74,6 ±0,1
	5-10 cm	81 ±4	82 ±3	86 ±1	85 ±1
	10-20 cm	94 ±1	92 ±2	91 ±4	89 ±6
	20-40 cm	91 ±7 A	86 ±9 B	95 ±2 A	73 ±6 B

COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. S = soja, S_{CC} = soja con CC, R = rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma fracción y profundidad, letras mayúsculas indican efecto de la presencia de CC (con vs sin CC) y letras minúsculas indican efecto del factor cultivo principal*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p -valor < 0,05). La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas para esa fracción a esa profundidad.

Pergamino

En el Anexo I – Tabla II se muestran los resultados del ANAVA para el sitio PER. En la capa de 0-5 cm, el COS presentó interacción entre los factores estudiados (fecha y presencia de CC), al igual que la fracción de las huminas y el COPg. El COPf presentó efectos independientes de la fecha y el CC, y las demás fracciones no presentaron efectos significativos de los factores estudiados. En la capa de 5-10 cm, el COS presentó interacción entre los factores estudiados, al igual que las huminas, mientras que el COPf presentó efecto de la fecha. El resto de las fracciones no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 10-20 cm, el COS, las huminas, el COPf y el COM presentaron efecto de la fecha. El COPg presentó efecto del CC, mientras que los AF y AH no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 20-40 cm, el COS y las fracciones de AF, AH, huminas y COM presentaron interacción entre los factores estudiados, mientras que el COPf y el COPg no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En cuanto al ANAVA para la contribución relativa de cada una de las fracciones al COS, en la capa de 0-5 cm la relación AF/COS presentó efecto de la fecha, al igual que COPf/COS. El COPg/COS presentó efectos independientes de los factores fecha y CC, y el COM/COS presentó efecto únicamente de los CC. Las razones entre las demás fracciones y el COS no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 5-10 cm, AF/COS, AH/COS y hum/COS presentaron interacción entre los factores estudiados. El COPg/COS presentó efectos independientes de los factores fecha y CC, el COPf/COS presentó efecto de la fecha y el COM/COS no presentó interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 10-20 cm, AF/COS, AH/COS y COPf/COS presentaron efecto de la fecha, el COPg/COS presentó efecto de la presencia de CC, el COM/COS presentó interacción entre los factores fecha y CC, y hum/COS no presentó interacción ni efecto de los factores estudiados. En la capa de 20-40 cm, AF/COS, AH/COS y hum/COS presentaron interacción entre los factores estudiados, mientras que COPg/COS, COPf/COS y COM/COS no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados.

En líneas generales, en PER los CC incrementaron el COS, afectando distintas fracciones a distintas profundidades en las distintas fechas. El efecto de los CC fue mayor en los primeros 5 cm de suelo, donde incrementaron el contenido de COPg, COPf y huminas. Además, las distintas fracciones mostraron una variabilidad temporal en ocasiones mayor que el efecto de los CC.

En la figura 2.6 se muestran los valores de COS para las distintas fechas y profundidades. En PER-CP_o (al comienzo del cultivo principal), se observó un mayor contenido de COS en S_{CC} en la capa de 5-10 cm, sin diferencias significativas en las demás profundidades. En PER-CP_f (entre la cosecha del cultivo principal y la siembra del CC), solo se observaron diferencias significativas en el contenido de COS en la capa de 0-5 cm, donde el COS fue mayor en lotes con CC. En PER-B_f (después del secado del CC), el contenido de COS fue mayor en la capa de 20-40 cm en S_{CC}. Al considerar los primeros 40 cm de suelo, el contenido de COS en PER-CP_o y PER-CP_f estuvo entre 44 y 49 t.ha⁻¹, mientras que en PER-B_f el contenido de COS en los primeros 40 cm estuvo bastante por debajo de ese rango en S (36 t.ha⁻¹) y por encima en S_{CC} (51 t.ha⁻¹).

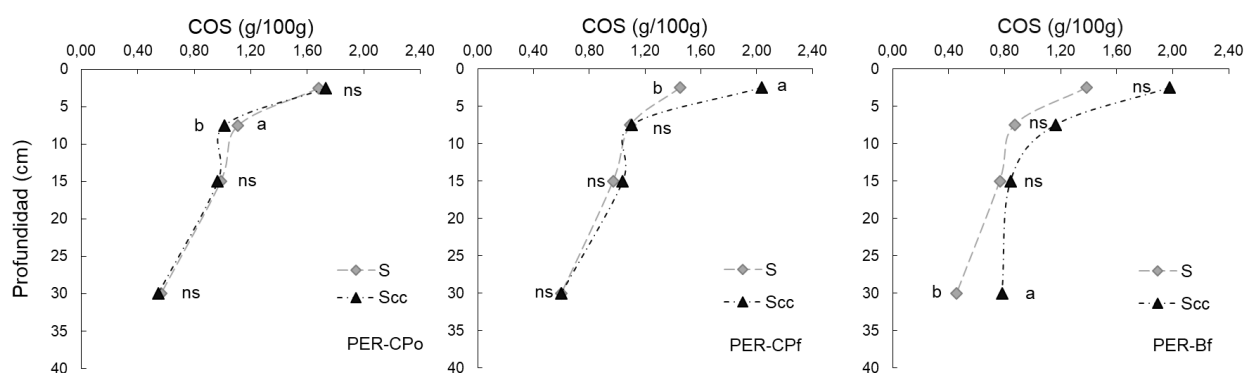


Figura 2.6. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Pergamino (PER). S = soja, S_{CC} = soja con CC. Para una misma profundidad, distintas letras indican diferencias entre tratamientos (con vs sin CC) (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.

En cuanto al contenido de distintas fracciones obtenidas por métodos químicos, la fracción más afectada por la fecha de muestreo y la presencia de CC fueron las huminas, mientras que los AF y AH solo mostraron diferencias entre tratamientos en la profundidad de 20-40 cm, en la tercera fecha (Figura 2.7). Los AF además, mostraron una variación temporal en la capa de 0-5 cm, donde se observó un menor contenido en PER-CP_f (poscosecha verano) que en PER-B_f (después del secado del CC). En la capa de 0-5 cm, el CC generó un incremento en el contenido de huminas en PER-CP_f y PER-B_f, mientras que en el tratamiento sin CC el contenido de huminas disminuyó en PER-B_f. La misma tendencia en la fracción de las huminas se observó en la capa de 5-10 cm, donde el contenido de huminas disminuyó en S y aumentó en S_{CC} en la tercera fecha, resultando en S_{CC} > S. En la capa de 10-20 cm, no se observaron diferencias entre tratamientos, pero si una variabilidad temporal en el contenido de huminas, que disminuyó en PER-B_f respecto de PER-CP_o y PER-CP_f. En la capa de 20-40 cm se observaron cambios en las tres fracciones. En PER-CP_o y PER-CP_f el contenido de cada una de las fracciones se mantuvo relativamente constante, sin diferencias entre tratamientos. En PER-B_f, el contenido de huminas

disminuyó en S y aumentó en S_{CC}, resultando S_{CC} > S. Por el contrario, el contenido de AH y AF aumentó en S en PER-B_f, resultando S > S_{CC}.

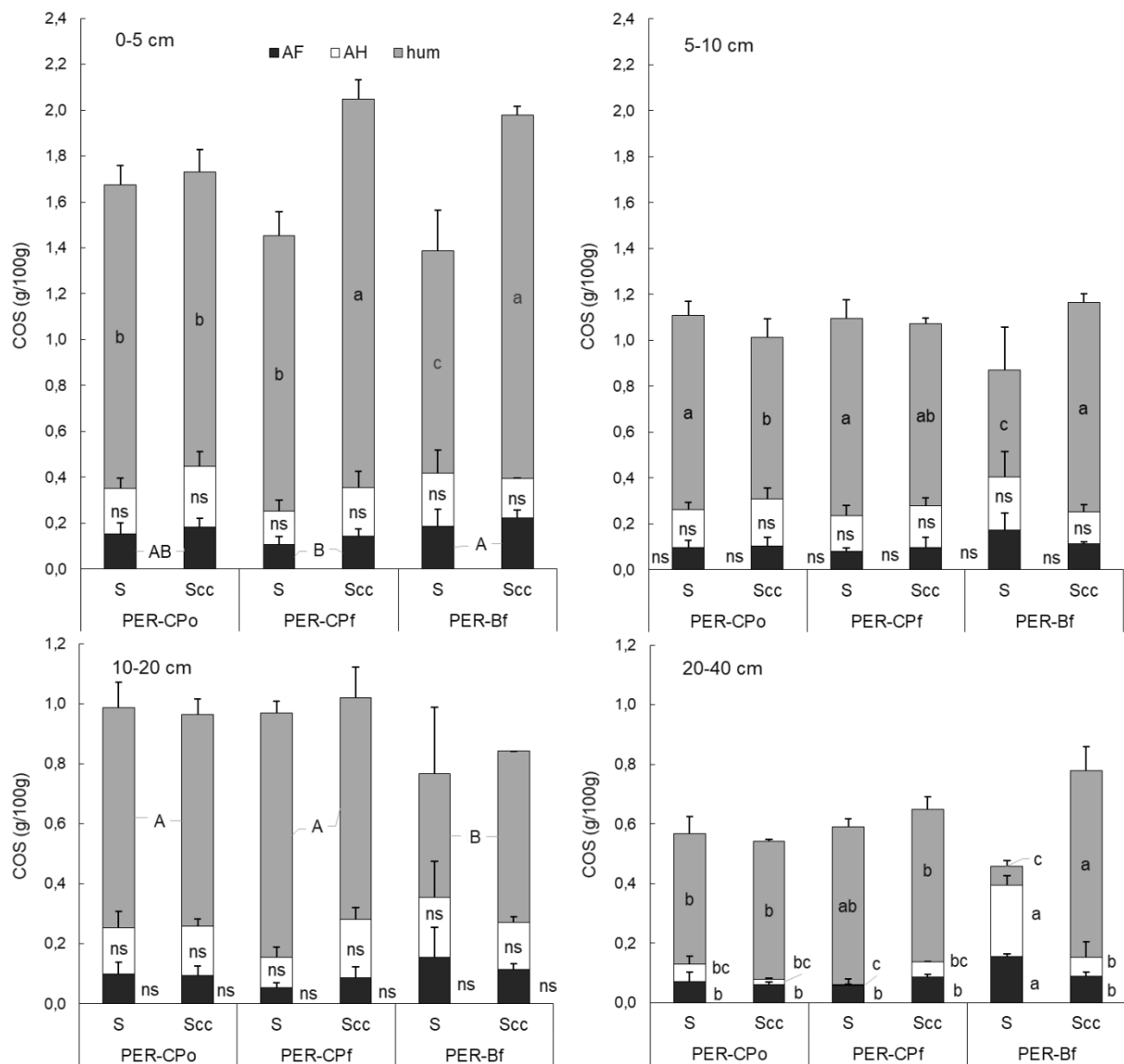


Figura 2.7. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Pergamino (PER) en tres fechas (PER-CP₀, PER-CP_f y PER-B_f). AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. S = soja, S_{CC} = soja con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre fechas, y letras minúsculas indican efectos de la interacción fecha*CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.

En cuanto a las fracciones obtenidas por métodos físicos (Figura 2.8), en la capa de 0-5 cm se observó mayor COP_g en S_{CC} que en S, con diferencias significativas en PER-CP_f y en particular en PER-B_f, donde el COP_g fue mayor que en el resto de las fechas y tratamientos. En esta capa el COP_f también fue mayor en

S_{CC} que en S. Además, el COPf mostró una variabilidad temporal, presentando menor contenido de COPf en PER-B_f que en PER-CP_o y PER-CP_f. En el resto de las profundidades, no se observó efecto del CC sobre el COPg ni sobre el COPf. En la capa de 5-10 cm el COPf mostró una disminución en el tiempo, con menor contenido en PER-B_f que en PER-CP_o y sin diferencias entre tratamientos. No hubo diferencias significativas en el contenido de COM entre las distintas fechas y tratamientos en los primeros 10 cm de suelo. En la capa de 10-20 cm, solo se observaron diferencias en el COM, con una disminución en PER-B_f respecto de PER-CP_o y PER-CP_f, y sin diferencias significativas entre tratamientos. En la capa de 20-40 cm, se observaron valores relativamente constantes de COM en las primeras dos fechas. En PER-B_f, el CC produjo un incremento en el COM, mientras que el barbecho desnudo produjo una disminución en esta fracción respecto a fechas anteriores, resultando en valores mayores de COM en S_{CC} que en S.

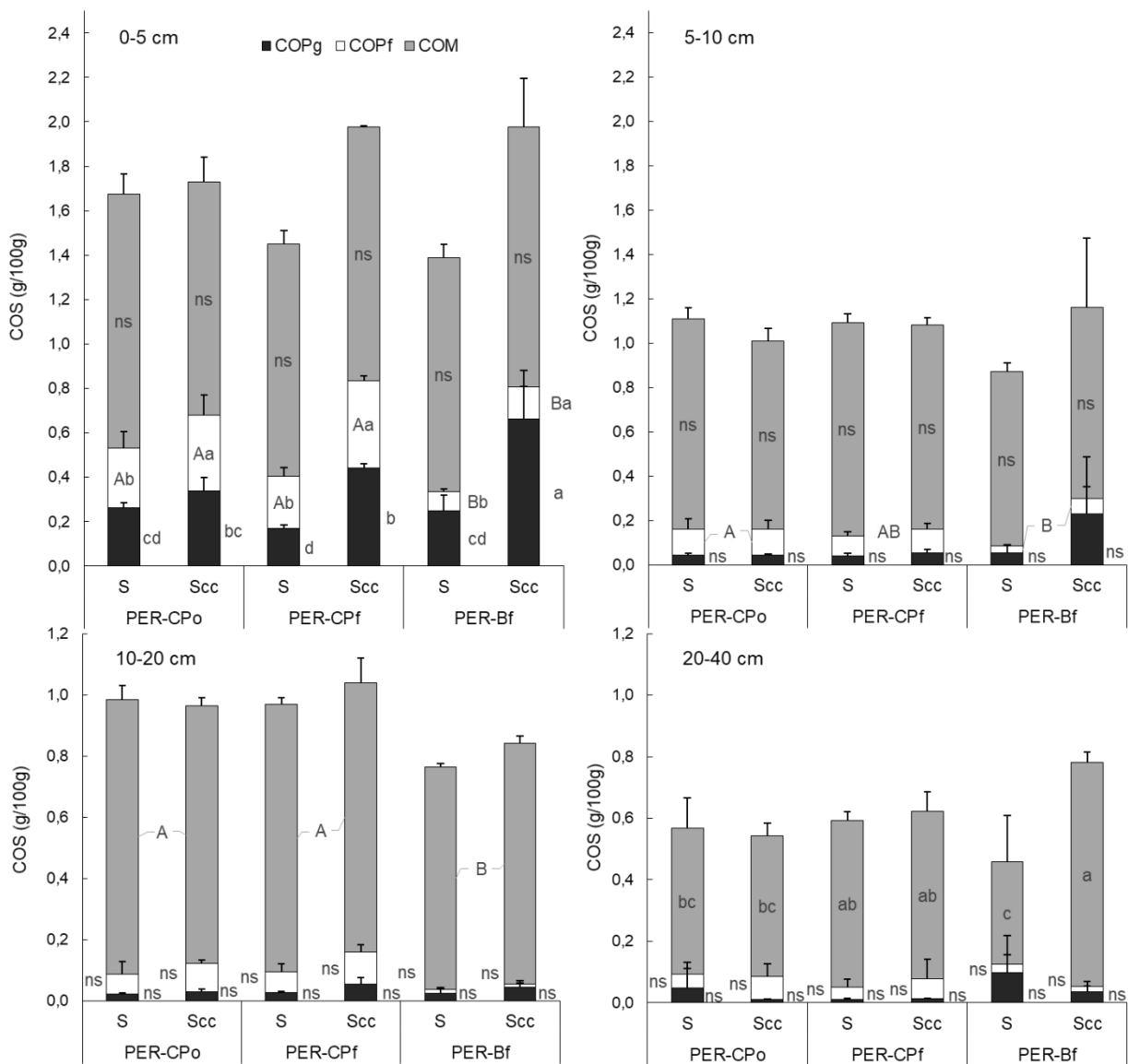


Figura 2.8. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Pergamino (PER) en tres fechas (PER-CP_o, PER-CP_f y PER-B_f). COPg = carbono

orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. S = soja, S_{CC} = soja con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre fechas, y letras minúsculas indican efectos de la interacción fecha*CC (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.

En cuanto a la contribución relativa de los AF, AH y huminas al COS (Tabla 2.3), se observa que hubo una variabilidad temporal importante con una tendencia a menor AF/COS y AH/COS en PER-CP_f. El CC generó diferencias en la composición del COS principalmente en PER-B_f. En esta fecha se observó un incremento en la proporción de AF y AH y una disminución en la proporción de huminas en S con respecto a S_{CC} y a las fechas anteriores en las capas de 5-10 y 20-40 cm. Al analizar la contribución relativa de las fracciones físicas al COS (Tabla 2.4), se observa que el COPg/COS mostró diferencias entre tratamientos en las capas de 0-5 y 10-20 cm, donde la proporción de COPg fue mayor en S_{CC} que en S en las tres fechas. Además, el COPg/COS en la capa de 0-5 cm fue mayor en PER-B_f que en PER-CP_o y PER-CP_f. El COPf/COS mostró una disminución significativa en PER-B_f respecto de las fechas anteriores en los primeros 20 cm. En cuanto al COM/COS, en la capa de 0-5 cm fue mayor en S que en S_{CC}. En la capa de 10-20 cm, COM/COS mostró un incremento en PER-B_f respecto a PER-CP_f, siendo además significativamente mayor en S que en S_{CC}.

Tabla 2.3. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos químicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Pergamino (PER).

	PER-CP _o		PER-CP _f		PER-B _f		
	S	S _{CC}	S	S _{CC}	S	S _{CC}	
AF/COS (%)	0-5 cm	9 ±3	11 ±2	7 ±2	7 ±2	13 ±5	11 ±2
		A		B		A	
	5-10 cm	9 ±3 b	10 ±4 b	7 ±1 b	9 ±4 b	20 ±9 a	10 ±1 b
	10-20 cm	10 ±4	10 ±3	5 ±2	8 ±4	3 ±2	13 ±2
	B		B		A		
	20-40 cm	13 ±6 b	11 ±2 b	10 ±4 b	14 ±1 b	34 ±2 a	11 ±2 b
AH/COS (%)	0-5 cm	12 ±3	15 ±4	10 ±3	10 ±4	17 ±7	8,7 ±0,1
	5-10 cm	15 ±3 b	20 ±5 ab	14 ±4 b	16 ±3 ab	27 ±13 a	12 ±3 b
	10-20 cm	16 ±6	17 ±3	11 ±3	10 ±10	33 ±20	19 ±2
		AB		B		A	
	20-40 cm	10 ±5 b	3,6 ±0,7 b	0,3 ±0,5 b	8,6 ±0,2 b	53 ±7 a	8 ±6 b
hum/COS (%)	0-5 cm	79 ±5	74 ±6	83 ±7	0,83 ±0,04	70 ±13	80 ±2
	5-10 cm	76 ±5 a	70 ±8 a	79 ±7 a	0,72 ±0,02 a	54 ±21 b	78 ±3 a
	10-20 cm	74 ±9	73 ±5	84 ±4	0,8 ±0,1	69 ±37	67,8 ±0,1
	20-40 cm	77 ±10 a	85 ±1 a	89 ±4 a	0,85 ±0,07 a	14 ±4 b	80 ±10 a

AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. S = soja, S_{CC} = soja con CC. Para una misma fracción y profundidad, letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre fechas (p-valor < 0,05). Letras minúsculas indican el efecto de la interacción entre fecha y presencia de CC. La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas para esa fracción a esa profundidad.

Tabla 2.4. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos físicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Pergamino (PER).

	PER-CP _o		PER-CP _f		PER-B _f		
	S	S _{CC}	S	S _{CC}	S	S _{CC}	
COPg/COS (%)	0-5 cm	16 ±1 b	20 ±3 a	12 ±1 b	22 ±1 a	18 ±5 b	34 ±11 a
		B		B		A	
	5-10 cm	4 ±1	4 ±1	4 ±1	5 ±2	6 ±4	20 ±22
	10-20 cm	2 ±1 b	3 ±1 a	3 ±1 b	5 ±2 a	4 ±3 b	5 ±2 a
	20-40 cm	10 ±10	2,0 ±0,1	2 ±1	2,3 ±0,2	21 ±26	5 ±4
COPf/COS (%)	0-5 cm	16 ±5	20 ±5	16 ±3	19 ±1	6 ±1	7,2 ±0,1
		A		A		B	
	5-10 cm	10 ±4	12 ±4	8 ±2	10 ±2	3 ±1	6 ±5
	10-20 cm	7 ±4	10 ±1	7 ±3	10 ±2	2 ±1	1,1 ±0,5
	20-40 cm	8 ±7	14 ±8	7 ±4	11 ±11	6 ±7	2,2 ±0,2
COM/COS (%)	0-5 cm	68 ±5 a	61 ±6 b	72 ±4 a	56,2 ±0,2 b	76 ±4 a	59 ±11 b
	5-10 cm	85 ±5	84 ±6	88 ±4	84 ±3	90 ±5	74 ±27
	10-20 cm	91 ±5	87 ±3	90 ±2	85 ±8	95 ±1	94 ±3
	20-40 cm	8 ±2	84 ±8	90 ±5	90 ±10	70 ±30	93 ±4

COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. S = soja, S_{CC} = soja con CC. Para una misma fracción y profundidad, letras minúsculas en cada columna indican el efecto de la presencia de CC, y letras mayúsculas entre medio de los tratamientos indican el efecto de la fecha (p-valor < 0,05). La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas para esa fracción a esa profundidad.

2.5.2. Efecto a corto plazo de los cultivos de cobertura en dos suelos de diferente textura

Bellocc

En el Anexo I – Tabla III se muestran los resultados del ANAVA para el sitio BEL. En la capa de 0-5 cm, el COS y el COM presentaron interacción entre los factores estudiados (cultivo principal y presencia de CC), y el resto de las fracciones no presentaron interacción ni efectos significativos de los factores estudiados. En las capas de 5-10 y 10-20 cm, el COS y el COM presentaron interacción entre los factores estudiados, las huminas presentaron efecto del cultivo principal, y las demás

fracciones no presentaron interacción ni efecto significativo de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 20-40 cm, el COS presentó efectos independientes del cultivo principal y el CC. La fracción de las huminas, el COPg y el COM presentaron interacción entre los factores estudiados, y el resto de las fracciones no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En cuanto al efecto sobre la contribución relativa de cada una de las fracciones al COS, en las capas de 0-5, 5-10 y 10-20 cm ninguna de las razones entre las fracciones y el COS presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 20-40 cm, AF/COS, AH/COS y hum/COS no presentaron interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores estudiados. El COPg/COS y el COM/COS presentaron interacción entre los factores estudiados, mientras que el COPf/COS presentó efecto del CC.

En BEL, los CC tuvieron efectos distintos en el contenido y composición del COS dependiendo de la secuencia de cultivos. Los CC afectaron principalmente el COS y el COM, y tuvieron un efecto mayor sobre las fracciones físicas que sobre las fracciones químicas. En todos los casos los CC produjeron una disminución en el contenido de COM en los primeros 10 cm de suelo y en la capa de 20-40 cm, pero que no siempre condujo a disminuciones en el COS. Los CC no tuvieron mayor efecto en las fracciones del COS obtenidas por métodos químicos.

En la figura 2.9 se observan los valores de COS para los distintos tratamientos. Los tratamientos sin CC (M-S, T/S-M y S-T/S) tendieron a tener mayores contenidos de COS que las mismas rotaciones de cultivos principales incluyendo CC (v/M-c/S, T/S-v/M y c/S-T/S, respectivamente). En la rotación maíz-soja, el contenido de COS fue mayor en todas las profundidades en el tratamiento sin CC que con CC (v/M-c/S). En la rotación trigo/soja-maíz, el tratamiento sin CC mostró valores mayores que el tratamiento con CC (T/S-v/M), con diferencias significativas en la capa de 20-40 cm. En soja-trigo/soja, también se observaron valores mayores de COS en el tratamiento sin CC que en el tratamiento con CC (c/S-T/S), con diferencias significativas en la capa de 5-10 cm. Al comparar todos los tratamientos se observaron los mayores contenidos de COS en M-S, T/S-M y T/S-v/M, valores intermedios en S-T/S y contenidos menores en c/S-T/S y v/M-c/S.

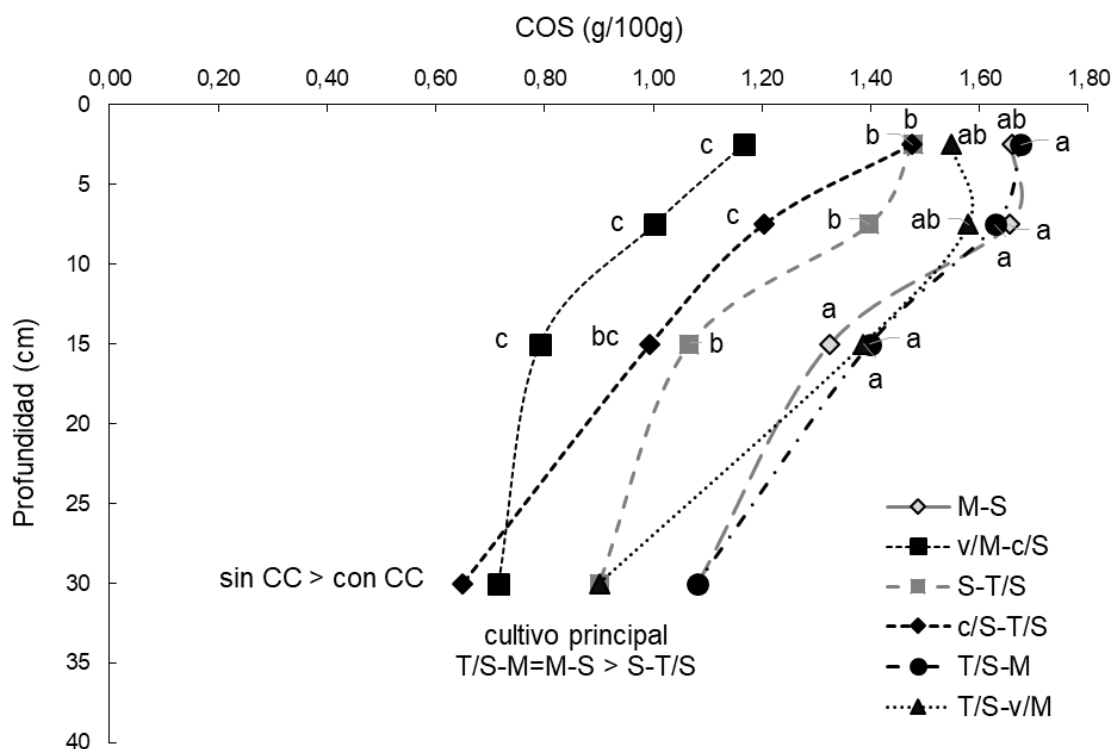


Figura 2.9. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Bellocq (BEL), para distintas rotaciones. M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma profundidad, letras diferentes indican efecto del factor cultivo principal*CC (p-valor < 0,05). En la capa de 20-40 cm, se observaron efectos independientes del cultivo principal y de la presencia de CC.

Al considerar los primeros 40 cm de suelo, el COS fue de 45 t.ha⁻¹ en v/M-c/S, 49 t.ha⁻¹ en c/S-T/S, 56 t.ha⁻¹ en S-T/S, 64 t.ha⁻¹ en T/S-v/M, 67 t.ha⁻¹ en M-S y 68 t.ha⁻¹ en T/S-M.

Al estudiar las fracciones obtenidas por métodos químicos (Figura 2.10), no se observaron diferencias significativas entre lotes en los AF ni en los AH en ninguna de las capas estudiadas. Las huminas no presentaron diferencias significativas en los primeros 10 cm. En la capa de 10-20 cm, se observó el efecto de la rotación del cultivo principal en el contenido de huminas, con T/S-M > S-T/S=M-S (sin efecto del CC). En la capa de 20-40 cm, el contenido de huminas siguió el siguiente orden: M/S=T/S-M > T/S-v/M > S-T/S > v/M-c/S=c/S-T/S. Además, para una misma rotación de los cultivos principales, el contenido de huminas en esta capa fue siempre mayor para los tratamientos sin CC.

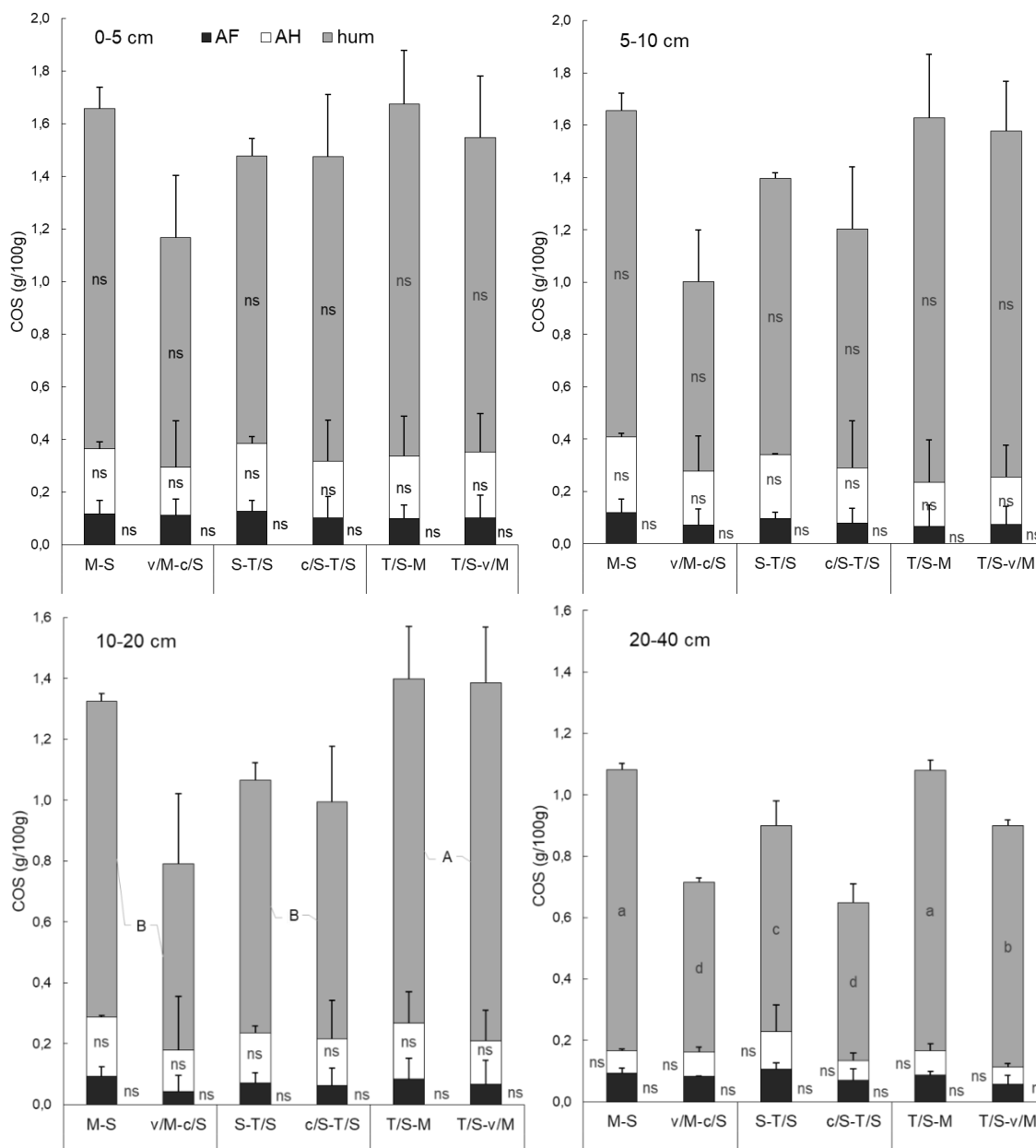


Figura 2.10. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Bellocq (BEL). AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre rotaciones de los cultivos principales (M-S, S-T/S y T/S-M), y letras minúsculas indican efectos del factor cultivo principal*CC (p -valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.

Al estudiar las fracciones del COS obtenidas por métodos físicos (Figura 2.11), se observó que el efecto de los CC fue más marcado en la fracción del COM, que presentó diferencias en las cuatro profundidades estudiadas. En las capas de 0-5 y 5-10 cm, el contenido de COM siguió el orden M-S=T/S-M > S-T/S= T/S-v/M > c/S-T/S > v/M-c/S. En la capa de 10-20 cm, el contenido de COM siguió el orden M-

S=T/S-M=T/S-v/M > S-T/S=c/S-T/S > v/M-c/S. En la capa de 20-40 cm el contenido de COM fue M-S > T/S-M > T/S-v/M > S-T/S > v/M-c/S > c/S-T/S. Además, los tres tratamientos sin CC (M-S, S-T/S y T/S-M) presentaron contenidos significativamente mayores de COM que las mismas rotaciones de cultivos principales con CC (v/M-c/S, c/S-T/S y T/S-v/M, respectivamente) en las capas de 0-5, 5-10 y 20-40 cm de profundidad. El contenido de COPf no mostró diferencias significativas entre lotes en ninguna de las profundidades estudiadas. La fracción COPg solo mostró diferencias significativas en la capa de 20-40 cm, donde el contenido de COPg fue mayor para los tratamientos S-T/S y v/M-c/S y menor para los tratamientos M/S y c/S-T/S, con valores intermedios para T/S-M y T/S-v/M. El contenido de COPg en 20-40 cm fue mayor para el tratamiento con CC en la rotación maíz-soja y menor en la rotación trigo/soja-maíz.

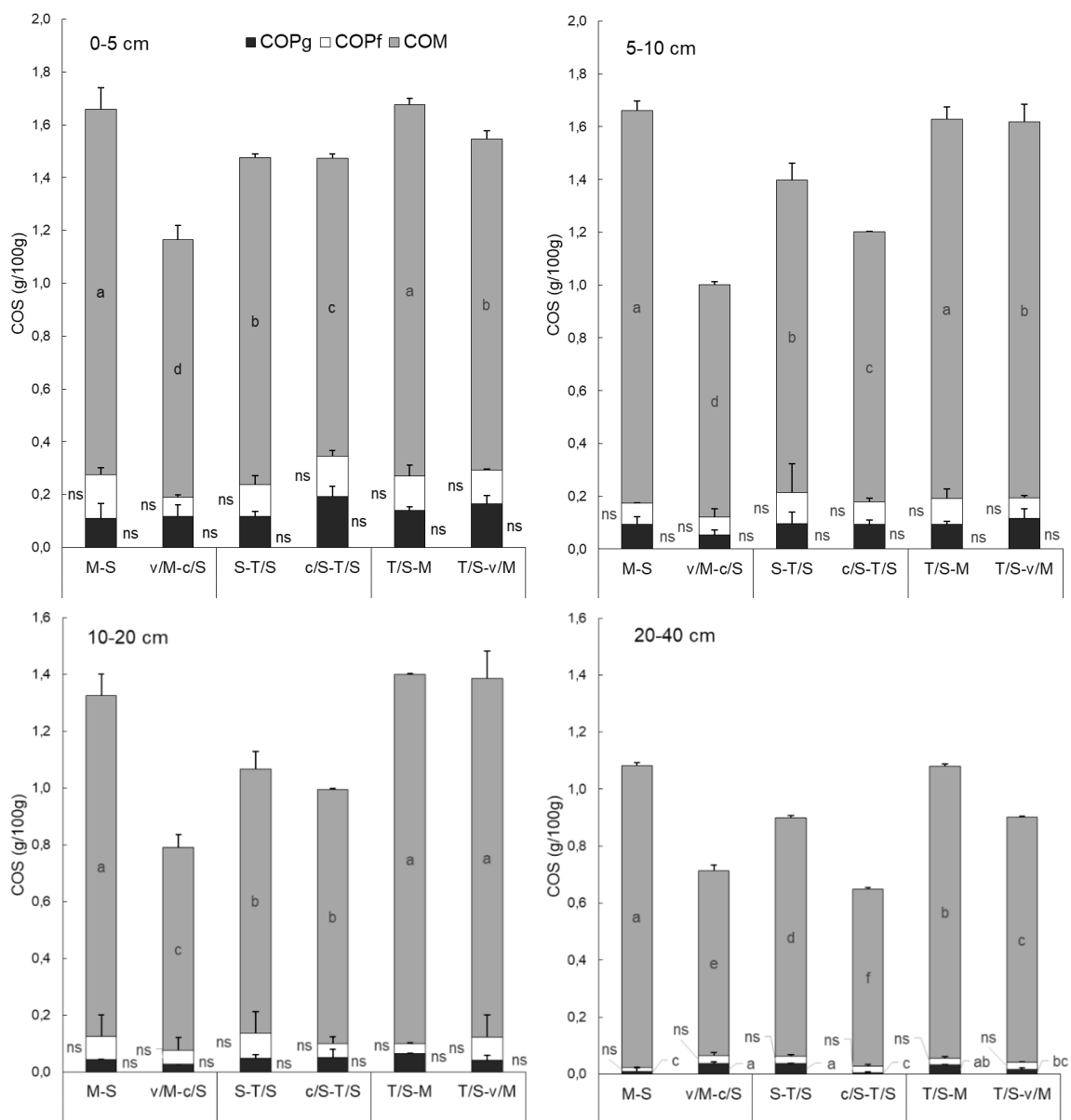


Figura 2.11. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Bellocq (BEL). COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono

orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma profundidad, letras minúsculas indican efecto del factor cultivo principal*CC (con vs sin CC) (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.

No hubo diferencias entre tratamientos en la proporción de AF, AH y huminas y su contribución relativa al COS (Tabla 2.5). En la capa de 0-20 cm, los AF, AH y huminas representaron un 7 ± 1 %, 15 ± 3 % y 78 ± 4 %, respectivamente. En la capa de 20-40, los AF representaron un 10 ± 2 %, los AH 9 ± 3 % y las huminas 81 ± 6 %. La composición relativa de las fracciones obtenidas por métodos físicos no fue afectada por los tratamientos en los primeros 20 cm. En la capa de 20-40 cm se observaron diferencias en la composición entre tratamientos. Los tratamientos con CC mostraron mayor COPf/COS que los sin CC, sin diferencias significativas entre rotaciones del cultivo principal. En el caso de la rotación maíz-soja se observó un mayor COPg/COS y menor COM/COS con CC, mientras que en el caso de soja-trigo/soja se observó un mayor COPg/COS y un menor COM/COS en el tratamiento sin CC.

Tabla 2.5. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos químicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Bellocq (BEL).

		M-S	v/M-c/S	T/S-M	T/S-v/M	S-T/S	c/S-T/S
AF/COS (%)	0-5 cm	7 ±3	10 ±5	6 ±3	7 ±6	9 ±3	7 ±5
	5-10 cm	7 ±3	7 ±6	4 ±5	5 ±4	7 ±2	7 ±5
	10-20 cm	7 ±2	5 ±7	6 ±5	5 ±6	7 ±3	6 ±6
	20-40 cm	9 ±2	11,5 ±0,1	8 ±1	6 ±3	12 ±2	11 ±6
AH/COS (%)	0-5 cm	15 ±2	20 ±20	14 ±9	16 ±9	18 ±2	15 ±11
	5-10 cm	17 ±1	20 ±10	10 ±10	11 ±8	17,5 ±0,2	18 ±15
	10-20 cm	15 ±1	20 ±20	13 ±7	10 ±7	15 ±2	15 ±13
	20-40 cm	7 ±4	11 ±2	8 ±2	6 ±1	13 ±9	10 ±4
hum/COS (%)	0-5 cm	78 ±5	80 ±20	80 ±12	77 ±15	74 ±5	78 ±16
	5-10 cm	75 ±4	70 ±20	86 ±15	84 ±12	76 ±1	76 ±20
	10-20 cm	78 ±2	80 ±30	81 ±12	85 ±13	78 ±5	78 ±18
	20-40 cm	85 ±2	77 ±2	86 ±3	87 ±2	73 ±9	79 ±9

No hubo efecto del tratamiento para ninguna de las fracciones en las distintas profundidades. AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia.

Tabla 2.6. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos físicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Bellocq (BEL).

		M-S	v/M-c/S	T/S-M	T/S-v/M	S-T/S	c/S-T/S
COPg/COS (%)	0-5 cm	7 ±3	10 ±4	8 ±1	11 ±2	8 ±1	13 ±3
	5-10 cm	6 ±2	5 ±2	6 ±1	7 ±2	7 ±3	8 ±1
	10-20 cm	3,4 ±0,1	3,3 ±0,1	4,6 ±0,1	3 ±1	5 ±1	5 ±3
	20-40 cm	1 ±1 bc	5 ±1 a	3,1 ±0,1 ab	2 ±1 bc	4,2 ±0,1 a	1 ±1 c
COPf/COS (%)	0-5 cm	10 ±2	6 ±1	8 ±2	8,3 ±0,1	8 ±2	10 ±2
	5-10 cm	4,9 ±0,1	7 ±3	6 ±2	4,9 ±0,6	8 ±8	7 ±1
	10-20 cm	6 ±6	6 ±6	2,5 ±0,3	6 ±6	8 ±7	5 ±3
	20-40 cm	1,2 ±0,1 B	4 ±2 A	2,1 ±0,7 B	2,8 ±0,2 A	2,6 ±0,9 B	3 ±1 A
COM/COS (%)	0-5 cm	83 ±5	84 ±4	84 ±2	81 ±2	84 ±1	77 ±1
	5-10 cm	90 ±2	88 ±1	88 ±3	88 ±3	85 ±5	85,2 ±0,2
	10-20 cm	91 ±6	90 ±6	93,0 ±0,3	91 ±7	87 ±6	89,9 ±0,4
	20-40 cm	98 ±1 a	91 ±2 b	96 ±1 a	95,4 ±0,5 a	91 ±1 b	96 ±1 a

COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma fracción y profundidad, letras mayúsculas indican efecto de la presencia de CC, y letras minúsculas indican efecto del factor cultivo principal*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p-valor < 0,05). La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas para esa fracción a esa profundidad.

Chascomús

En el Anexo I – Tabla IV se muestran los resultados del ANAVA simple para evaluar el efecto de la presencia de CC en el COS, sus fracciones y la contribución relativa de cada fracción al COS tras dos años de inicio de la práctica (fecha CHA-B2). En CHA, dos años consecutivos de CC en un cultivo de maíz bajo SD no generaron cambios significativos en el contenido de COS con respecto a un barbecho desnudo en ninguna de las profundidades estudiadas (Figura 2.12). Los CC tampoco generaron cambios significativos en ninguna de las fracciones obtenidas por métodos químicos (Figura 2.13). De las fracciones obtenidas por métodos físicos, solo se observaron diferencias en la fracción COPf en la capa de 20-40 cm, donde el tratamiento M_{CC} tuvo mayor COPf que M (Figura 2.14). La presencia de CC tampoco provocó cambios en la composición relativa del COS (Tablas 2.7 y 2.8), con la excepción de la capa de 20-40 cm, donde COM/COS fue mayor en M que en M_{CC}. Al considerar los primeros 40 cm de suelo, el contenido de COS fue de 61 y 62 t.ha⁻¹ en M y M_{CC}, respectivamente.

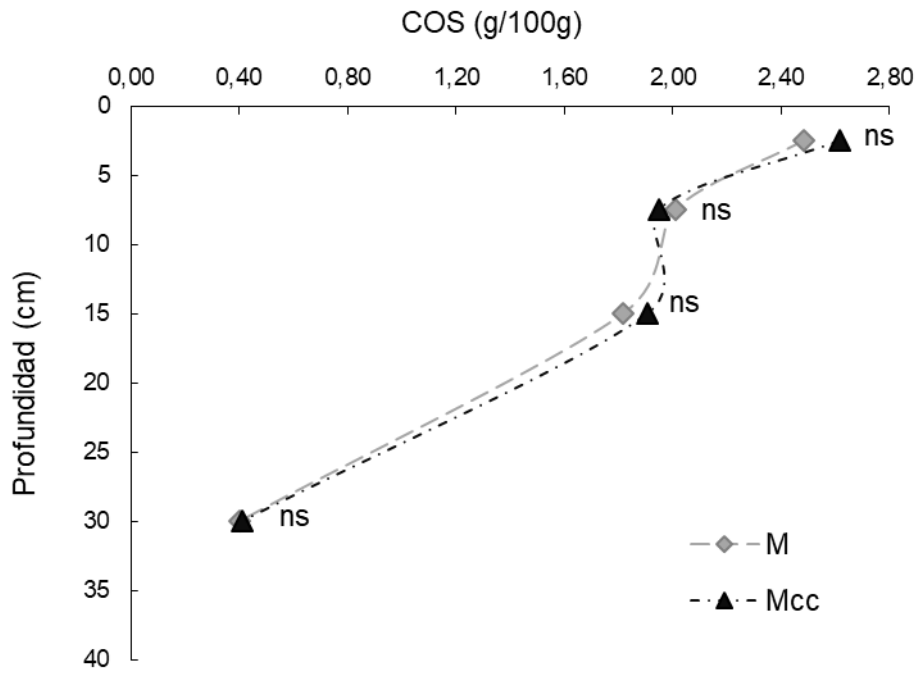


Figura 2.12. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Chascomús (CHA-Bf). M = maíz, Mcc = maíz con CC. Para una misma profundidad, ns indica que no hubo efectos significativos (p -valor $> 0,05$).

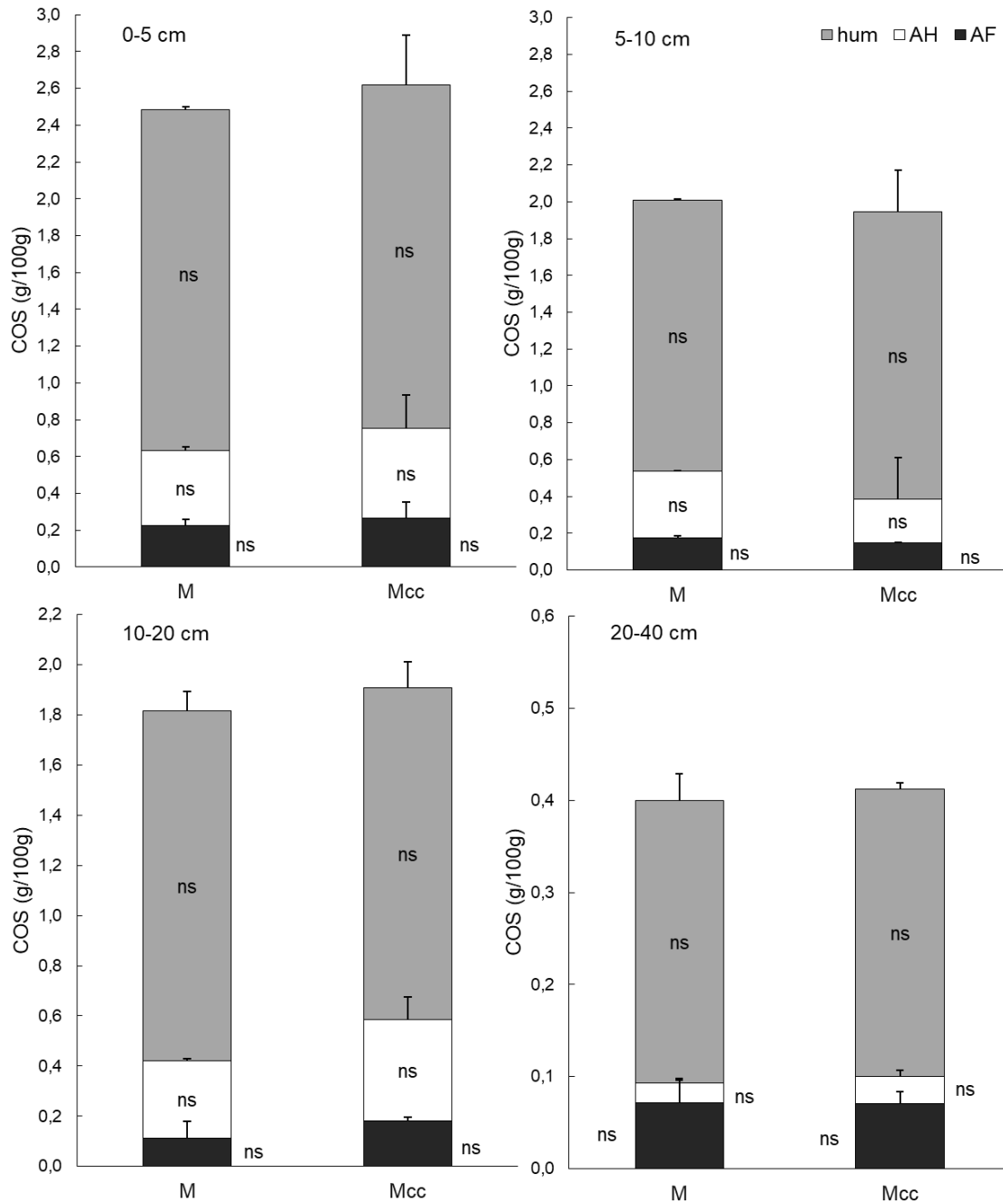


Figura 2.13. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Chascomús (CHA-Bf). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para una misma profundidad, ns indica que no hubo diferencias significativas (p-valor > 0,05).

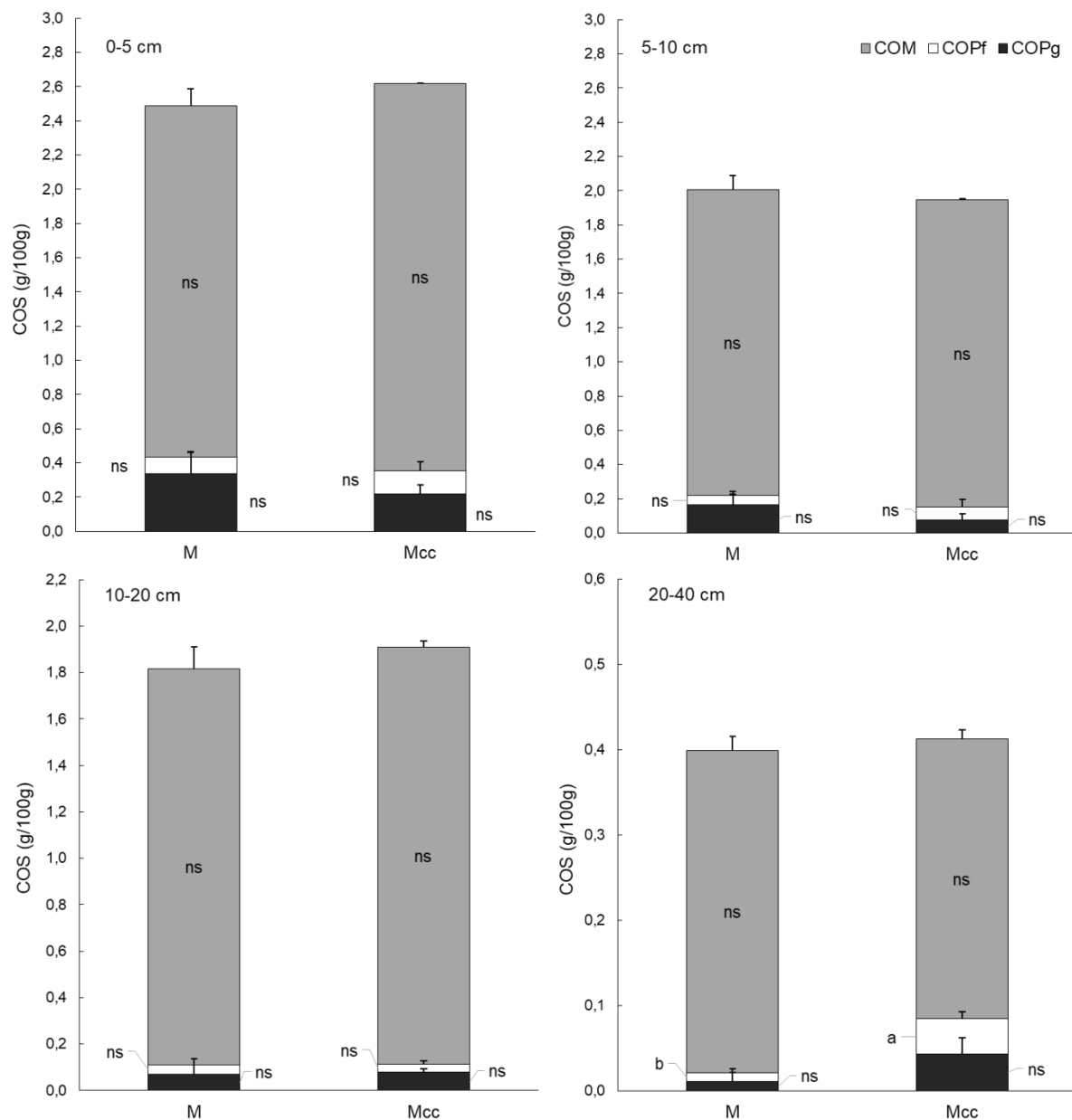


Figura 2.14. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Chascomús (CHA-Bf). COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. M = maíz, M_{cc} = maíz con CC. Para una misma profundidad, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (con vs sin CC) (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.

Tabla 2.7. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos químicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Chascomús (CHA-Bf).

	AF/COS (%)		AH/COS (%)		hum/COS (%)	
	M	M _{CC}	M	M _{CC}	M	M _{CC}
0-5 cm	9 ±1	10 ±3	16 ±1	18 ±7	75 ±1	71 ±10
5-10 cm	8,7 ±0,4	8,7 ±0,2	17,9 ±0,1	12 ±12	73,4 ±0,3	80 ±11
10-20 cm	6 ±4	10 ±1	17 ±1	21 ±5	77 ±4	69 ±6
20-40 cm	18 ±7	17 ±3	5 ±1	7 ±2	77 ±7	76 ±2

M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas para esa fracción a esa profundidad.

Tabla 2.8. Contribución relativa de las distintas fracciones obtenidas por métodos físicos al carbono orgánico del suelo (COS) en Chascomús (CHA).

	COPg/COS (%)		COPf/COS (%)		COM/COS (%)	
	M	M _{CC}	M	M _{CC}	M	M _{CC}
0-5 cm	14 ±5	8 ±2	4 ±1	5 ±2	83 ±4	86,5 ±0,1
5-10 cm	8 ±4	4 ±2	2,8 ±0,2	4 ±2	89 ±4	92,1 ±0,3
10-20 cm	4 ±4	4 ±1	2 ±1	2 ±1	94 ±5	94 ±1
20-40 cm	3 ±3	10 ±5	3 ±1	10 ±2	95 ±4 a	80 ±3 b

COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. Para una misma fracción y profundidad, letras diferentes indican efecto del tratamiento (M = maíz, M_{CC} = maíz con CC) (p -valor < 0,05). La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas para esa fracción a esa profundidad.

2.5.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la variabilidad temporal del carbono orgánico del suelo y sus fracciones.

En el Anexo I – Tabla V se muestran los resultados del ANAVA para el sitio CHA, considerando las cinco fechas durante los primeros dos años del ensayo (CHA₀: previo a la siembra del primer CC, CHA-B1: durante el primer período de barbecho incluyendo CC y barbecho desnudo, CHA-CP₀: al inicio del cultivo principal, CHA-CP_f: al final del cultivo principal, y CHA-B2: durante el segundo período de barbecho. En la capa de 0-5 cm, el COS no presentó interacción ni efecto de ninguno de los factores estudiados (fecha y presencia de CC). Las fracciones de AF, AH, hum, COPf y COM presentaron efecto de la fecha, mientras que el COPg presentó efecto de la interacción entre los factores estudiados. En la capa de 5-10 cm, el COS así como las

fracciones de huminas y COPg presentaron efecto de la interacción entre los factores fecha y CC. Los AF, AH y COPf presentaron efecto de la fecha, mientras que el COM no presentó interacción ni efecto de ninguno de los factores estudiados. En la capa de 10-20 cm, el COS, así como las fracciones de huminas y COM, presentaron efecto de la interacción entre los factores fecha y CC. Los AF presentaron efectos independientes de los factores fecha y CC. Los AH y COPf presentaron efecto de la fecha, mientras que el COPg no presentó efecto de la interacción ni de ninguno de los factores. En la capa de 20-40 cm, el COS, AF, COPg y COPf presentaron efecto de la fecha, las huminas y COM presentaron interacción entre la fecha y la presencia de CC, y AH no presentó interacción ni efecto de ninguno de los factores estudiados.

En líneas generales, el COS y sus fracciones mostraron una variabilidad temporal, que tendió a ser mayor en presencia de CC. En la figura 2.15 se muestra el contenido de COS en las distintas fechas y para las distintas profundidades. En superficie (0-5 cm) el COS no presentó diferencias significativas entre tratamientos ni variación temporal. En la capa de 5-10 cm, se observa una variabilidad temporal con un comportamiento distinto entre los tratamientos. En líneas generales, se observa una disminución en el COS entre el principio y el final del ensayo. En M, esta disminución es gradual y continua. En M_{CC}, por el contrario, se observa una disminución más abrupta entre CHA₀ y CHA-B1 (tras la introducción del CC), seguida por un aumento en CHA-CP₀ (al finalizar el CC), momento en el que los valores no difirieron entre tratamientos. Este patrón se repite en CHA-CP_f respecto a CHA-CP₀, donde M_{CC} presentó una disminución en el COS más abrupta hacia el final del cultivo de maíz, que luego fue compensada hacia el final del segundo CC (CHA-B2), donde las diferencias entre tratamientos desaparecieron nuevamente.

Este patrón se repite en la capa de 10-20 cm, donde M_{CC} mostró una disminución gradual entre la primera y la quinta fecha, mientras que M mostró una fuerte disminución en el COS en CHA-B1 (con la inclusión del CC), seguida por un incremento una vez finalizado el CC (CHA-CP₀), donde el valor de COS fue intermedio a los de CHA₀ y CHA-B1. En esta fecha, no hubo diferencias entre los tratamientos. En CHA-CP_f, M_{CC} volvió a mostrar una disminución en el COS, con valores menores a los de M, que nuevamente se revirtió en CHA-B2 (hacia el final del segundo ciclo de CC). En la profundidad de 20-40 cm, no hubo diferencia entre tratamientos y si efecto de la fecha, con valores de COS significativamente menores en CHA-B2 que en CHA₀ y CHA-CP₀, y con valores intermedios en las demás fechas.

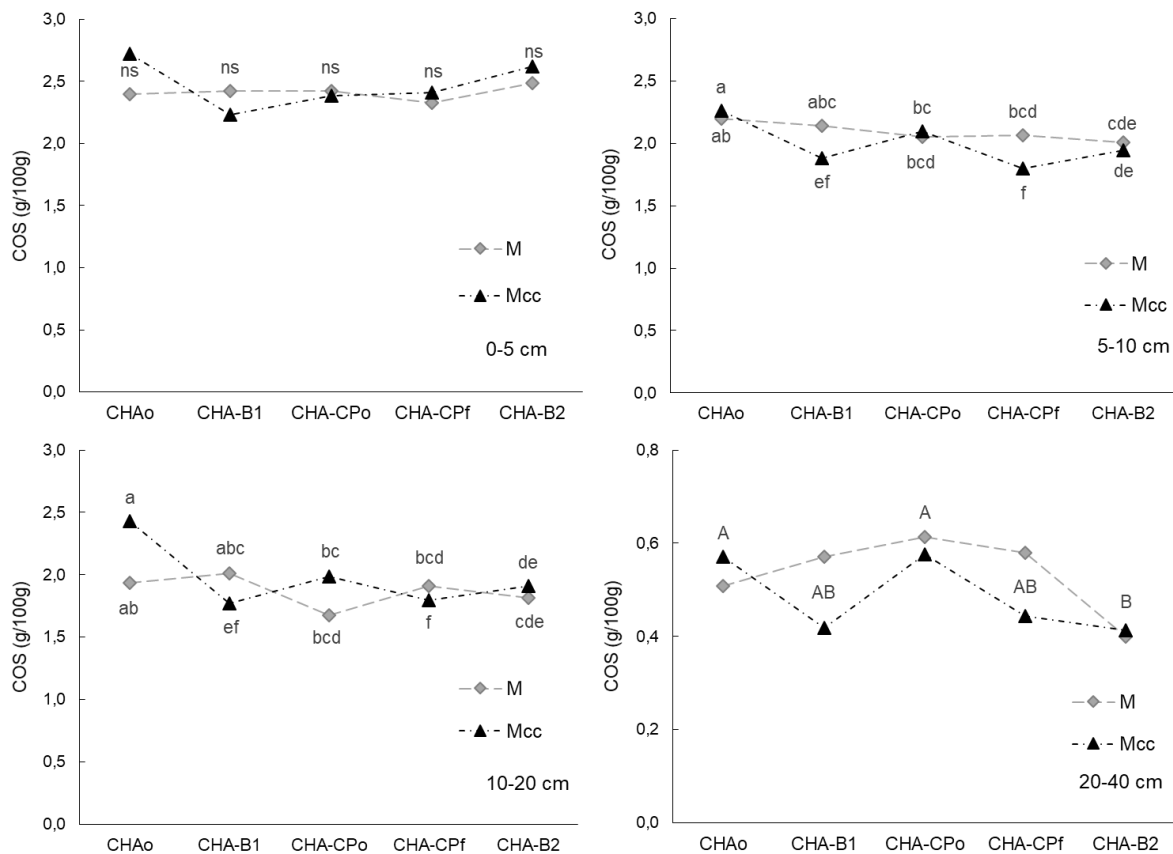


Figura 2.15. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS) en el sitio Chascomús (CHA) en las cinco fechas. M = maíz, M_{cc} = maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican efecto de la fecha y letras minúsculas indican efecto del factor fecha*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p -valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.

Si bien en la capa de 0-5 cm no hubo efecto de la fecha en el contenido de COS, si se observó una variabilidad temporal en el contenido de AF, AH y huminas (Figura 2.16). El contenido de AF en 0-5 cm fue CHA_o=CHA-B₂ > CHA-B₁=CHA-CP_o=CHA-CP_f. El contenido de AH fue mayor en CHA_o que en el resto de las fechas. En CHA-B₁ se observaron los menores valores de AH, que aumentaron nuevamente en CHA-B₂ (con valores intermedios y sin diferencias significativas en CHA-CP_o y CHA-CP_f). El contenido de huminas fue CHA_o < CHA-B₁=CHA-CP_o=CHA-CP_f=CHA-B₂.

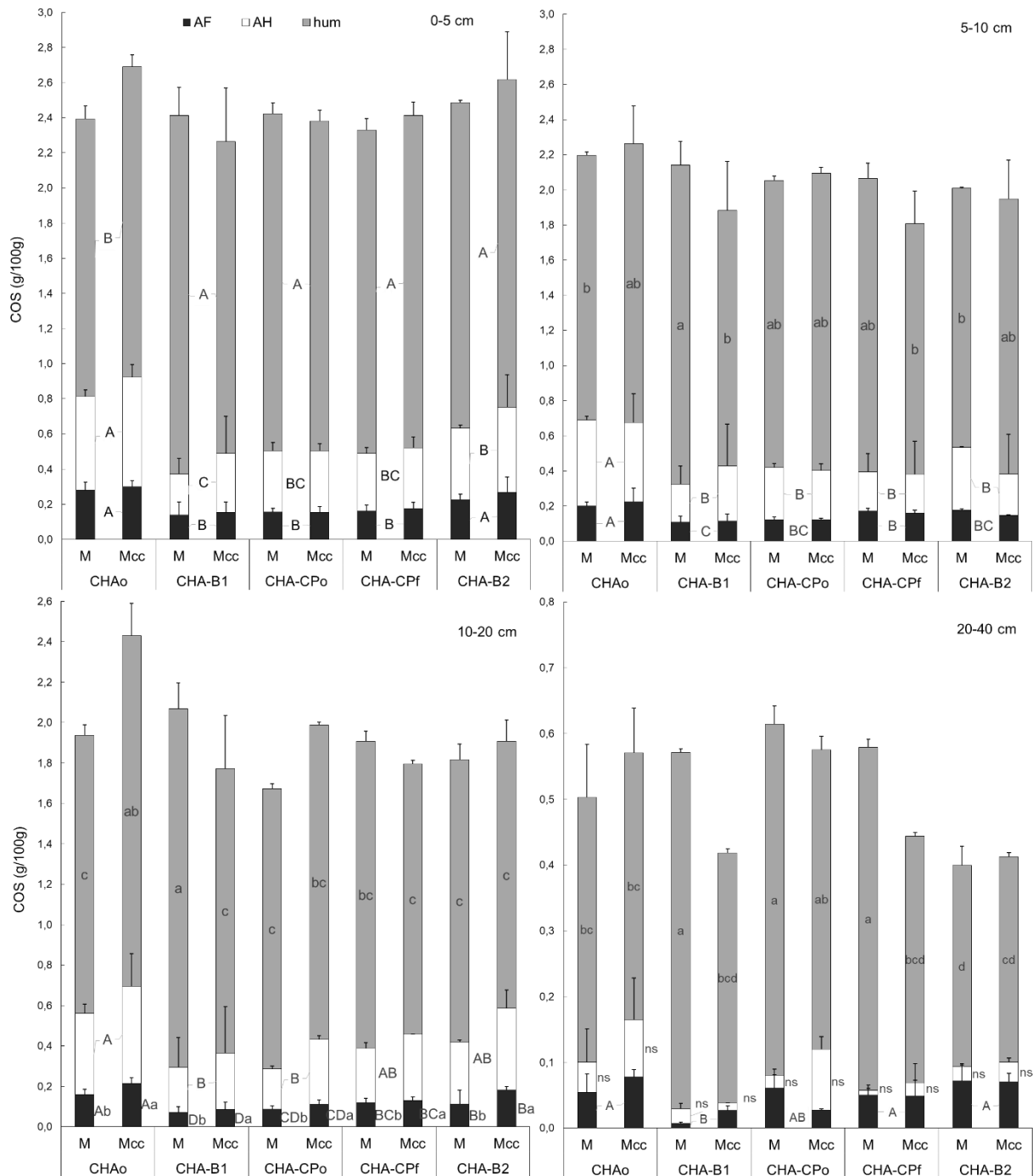


Figura 2.16. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos químicos en el sitio Chascomús (CHA) en las cinco fechas. AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. M = maíz, Mcc = maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican efecto de la fecha y letras minúsculas indican efecto del factor cultivo de fecha*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p -valor $< 0,05$). Letras mayúsculas y minúsculas indican los efectos independientes de la fecha y la presencia de CC, respectivamente (p -valor $< 0,05$). ns indica que no hubo efectos significativos.

En la capa de 5-10 cm existió una interacción entre la fecha y el tratamiento en el contenido de huminas. En CHA-B1, se observó un mayor contenido de huminas en M que en M_{CC}. En el resto de las fechas no se observaron diferencias entre tratamientos. A diferencia del COS, el contenido de huminas se mantuvo relativamente constante entre fechas. Los AF y AH no presentaron efecto del tratamiento, pero sí una variabilidad temporal similar a la de la capa de 0-5 cm.

En la capa de 10-20 cm, donde el contenido inicial de huminas (en CHA₀) fue menor en M, también se observó un incremento en CHA-B1 en este tratamiento, y una disminución en M_{CC}. Estas diferencias desaparecieron a partir de la tercera fecha. En esta capa hubo una diferencia inicial en el contenido de AF (M_{CC} > M) desde antes de introducirlos los CC (CHA₀), que se mantuvo en todas las fechas. Además, los AF mostraron una variabilidad temporal, con una fuerte disminución entre CHA₀ y CHA-B1, seguida de un aumento gradual hasta CHA-B2 (con CHA₀ > CHA-B2).

En la capa de 20-40 cm también se observó un incremento en el contenido de huminas en el M entre CHA₀ y CHA-B1, que se mantuvo hasta CHA-CP_f, y volvió a disminuir en CHA-B2. En M_{CC}, el contenido de huminas se mantuvo relativamente constante, con una disminución en CHA-B2 respecto de CHA-CP₀. Además, en CHA-B1 y CHA-CP_f el contenido de huminas fue mayor en M que en M_{CC}. En esta capa, los AF mostraron una disminución en CHA-B1 respecto a CHA₀ que se revirtió hacia la tercera fecha, mientras que el contenido de AH no se vio afectado por la fecha ni el tratamiento.

Las fracciones físicas también mostraron una importante variabilidad temporal (Figura 2.17). En la capa de 0-5 cm, el COP_g mostró distinto comportamiento temporal dependiendo del tratamiento. En CHA₀, antes de iniciado el ensayo de CC, el COP_g fue mayor en M_{CC} que en M. Esta diferencia desapareció en el resto de las fechas. El COP_g fue menor en CHA-CP₀ que en las fechas anteriores en los dos tratamientos, y volvió a aumentar hacia CHA-B2 en M, mientras que se mantuvo constante en M_{CC}. El COP_g siguió el orden CHA-B1 < CHA₀=CHA-CP₀=CHA-CP_f < CHA-B2. EL COP_f, por el contrario, fue menor en CHA-B2 que en CHA₀, CHA-B1 y CHA-CP₀.

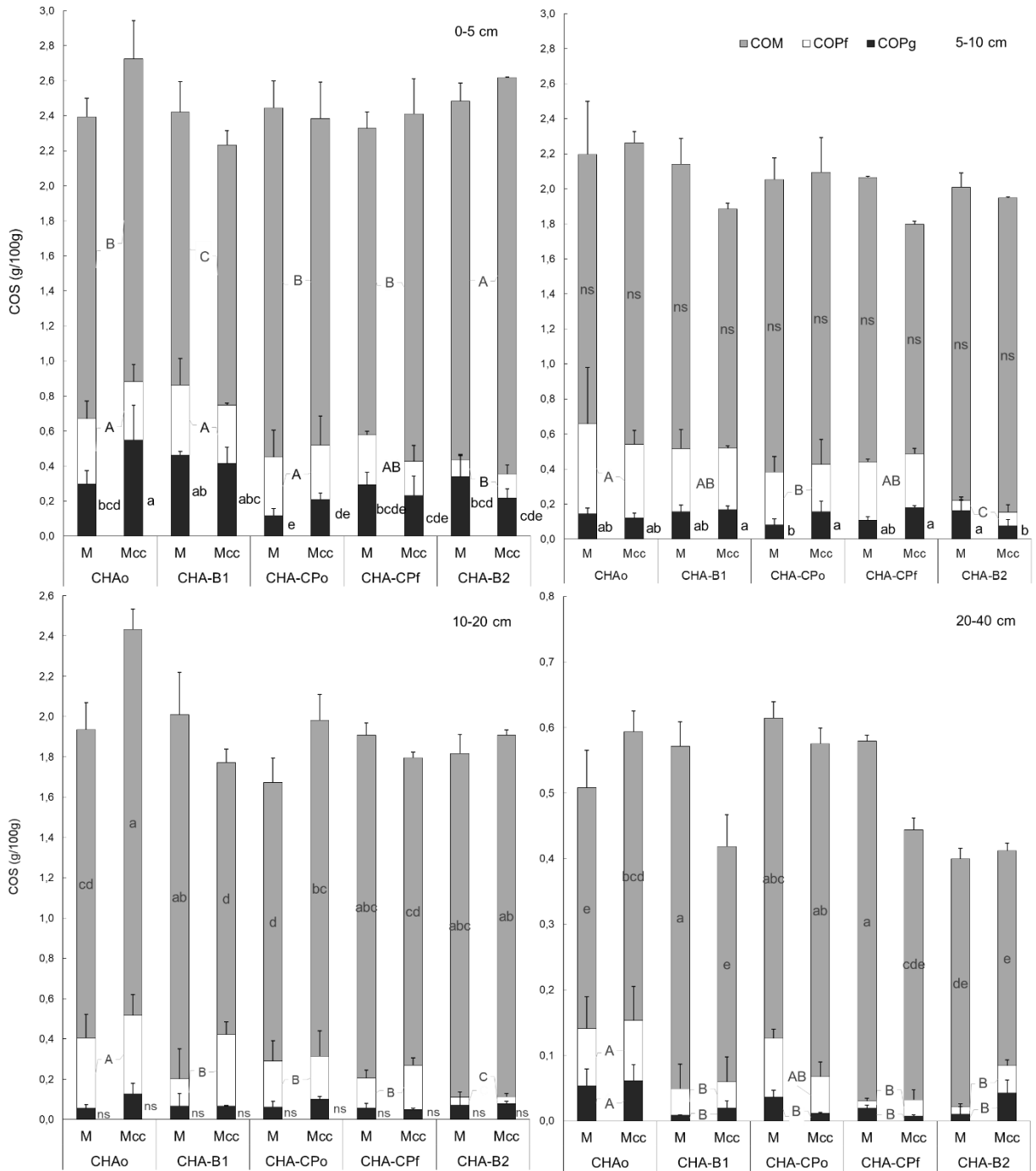


Figura 2.17. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre distintas fracciones del carbono orgánico del suelo (COS) obtenidas por métodos físicos en el sitio Chascomús (CHA) en las cinco fechas. COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para una misma profundidad, letras mayúsculas indican efecto de la fecha y letras minúsculas indican efecto del factor fecha*CC cuando hubo interacción entre estas dos variables (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos.

En la capa de 5-10, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos ni entre fechas en el COM. El COPf, disminuyó en el tiempo siendo $CHA-B2 < CHA-CP_o < CHA_o$, con valores intermedios a los de CHA_o y $CHA-CP_o$ en las otras dos fechas. El COPg mostró interacción entre los factores fecha y tratamiento, siendo mayor en M_{cc} en $CHA-CP_o$ y en M en $CHA-B2$, sin diferencias significativas entre tratamientos en las demás fechas.

En la capa de 10-20 cm, el COPf también disminuyó en el tiempo, siendo $CHA-B2 < CHA-B1=CHA-CP_o=CHA-CP_f < CHA_o$. El COM exhibió comportamientos diferentes en el tiempo en los dos tratamientos. Inicialmente, el COM fue mayor en M_{cc} (CHA_o , antes de iniciado el ensayo). En M_{cc} , el COM disminuyó entre CHA_o y $CHA-B1$, aumentó en $CHA-CP_o$ hasta un valor intermedio entre CHA_o y $CHA-B1$, volvió a disminuir en $CHA-CP_f$ y a aumentar en $CHA-B2$. En M , el COM aumentó entre CHA_o y $CHA-B1$, disminuyó en $CHA-CP_o$ y volvió a aumentar en $CHA-CP_f$ y $CHA-B2$. El COP g no mostró diferencias significativas entre fechas ni entre tratamientos en la capa de 10-20 cm.

En la capa de 20-40 cm el COPg varió en el tiempo ($CHA_o > CHA-B1=CHA-CP_o=CHA-CP_f=CHA-B2$). El COPf también fue mayor en $CHA_o > CHA-B1=CHA-CP_f=CHA-B2$ (con valores intermedios y sin diferencias significativas a las demás fechas en $CHA-CP_o$). En esta capa el COM mostró un comportamiento similar al de la capa de 10-20 cm. El contenido de COM inicial fue mayor en M_{cc} , que mostró una disminución entre CHA_o y $CHA-B1$, volvió a aumentar a los niveles iniciales en $CHA-CP_o$ y a disminuir hacia $CHA-B2$. En M , el COM aumentó entre CHA_o y $CHA-B1$, se mantuvo constante entre $CHA-B1$ y $CHA-CP_f$ y volvió a disminuir a los niveles iniciales en $CHA-B2$. Además, el COM fue mayor en M que en M_{cc} en $CHA-B1$ y $CHA-CP_f$, y no tuvo diferencias entre tratamientos en $CHA-CP_o$ y $CHA-B2$.

2.6. DISCUSIÓN

2.6.1. Efecto a largo plazo de los cultivos de cobertura en dos suelos de diferente textura

Al evaluar el efecto de los CC en dos sitios con suelos de diferente textura (PER, un Argiudol típico franco limoso, y VIL, un Hapludol típico franco arenoso), se observó que los CC pueden generar incrementos en el COS en los primeros 5 a 10 cm de suelo. Varios autores indicaron que los CC pueden incrementar el COS en el mediano a largo plazo, debido a un mayor aporte de biomasa y con efectos de mayor magnitud en los primeros cm de suelo (Blanco-Canqui et al., 2015; Bolinder et al., 2020; Jian et al., 2020; McDaniel et al., 2014; Poeplau y Don, 2015). En el caso del Hapludol estos incrementos se debieron principalmente a cambios en el COM, lo que puede indicar que la mayor actividad biológica pudo favorecer la agregación y la formación de COS protegido físico-químicamente. Algunos autores describieron cómo los procesos de agregación y protección de la MO pueden darse a la par, por acción de las raíces, hifas y exudados (Dijkstra et al., 2020; Sokol et al., 2018). Sin embargo,

además de favorecer la acumulación y protección del COS, la acción de las raíces y la actividad microbiana pueden tener el efecto contrario, provocando la desprotección (por ruptura de agregados) del COS y condiciones de aireación adecuadas para su degradación (Dijkstra et al., 2020). En el Argiudol, por el contrario, los cambios se dieron principalmente en las fracciones de COPg y COPf. Estos aumentos se debieron al mayor aporte de MO por parte del CC (Beltrán et al., 2018; Duval et al., 2016), en comparación con el barbecho desnudo, y en lotes en los que el cultivo principal es soja y deja escasos residuos. Los CC no generaron cambios en la capa de 10-20 cm, pero sí afectaron la capa de 20-40 cm. En el Hapludol, los CC tendieron a disminuir el COS en profundidad, lo que se relacionó con la mayor aireación y actividad descomponedora durante el invierno, mientras que en el Argiudol los CC provocaron un incremento en el COS, lo que posiblemente se debió a que las raíces lograron penetrar capas compactadas, generando un aporte de MO mayor en profundidad. Por otra parte, en PER, donde se evaluaron distintas fechas, se observó que estos cambios no siempre permanecen en el tiempo y pueden depender del año en particular y del momento de muestreo. A continuación, se discute con mayor detalle los resultados obtenidos para cada uno de los sitios.

Villegas

En VIL, los lotes estudiados correspondían a un ensayo iniciado hace 15 años en un Hapludol típico, comparando dos rotaciones de los cultivos principales: soja y rotación soja-maíz, cada una con dos subtratamientos: con y sin centeno como CC. En este sitio se observó que 15 años de CC de centeno generaron un aumento en el contenido de COS en superficie (0-5 cm), tanto al ser incluidos en la rotación como en el cultivo de soja. Este incremento puede atribuirse al mayor aporte de MO que se produce en lotes con CC, donde la biomasa de los CC no es cosechada (Blanco-Canqui et al., 2015; McDaniel et al., 2014; Poeplau y Don, 2015). Además, en sistemas bajo SD puede producirse la acumulación de COS en superficie, principalmente debido al aporte de la biomasa aérea de las plantas, que en ausencia de labranza no es redistribuida en el perfil (Jian et al., 2020). Este efecto resultó mucho mayor en el cultivo de soja, donde el CC produjo un incremento de 0,66 g.100 g⁻¹ en S a 1,4 g.100 g⁻¹ en S_{CC} (incremento del 117 %) que en la rotación soja-maíz, donde el valor de COS aumentó de 1,0 g.100 g⁻¹ en R a 1,1 g.100 g⁻¹ en R_{CC} (16 %). Varios autores alertaron sobre la pérdida de COS producida por el monocultivo de soja (Wilson et al., 2020). Blanco-Canqui et al. (2015) reportaron que los CC pueden producir incrementos en el COS mayores en suelos erosionados con bajo contenido inicial de C. Por otra parte, en un estudio de 8 años de duración en un Argiudol típico, Romaniuk et al. (2018) observaron que incluir trigo como CC en un cultivo de soja incrementó el COS, mientras que incluirlo en una rotación en la que ya había gramíneas no generó cambios significativos. En este sentido cabe destacar como en S_{CC} la presencia de una gramínea como CC, que implica un aporte de residuos con una relación C/N alta y un mejor balance entre gramíneas y leguminosas en la rotación, produjo un incremento significativo en el COS en la capa de 0-5 cm, superando los valores obtenidos en la rotación soja-maíz sin CC. Varios autores coinciden en la necesidad de un balance adecuado entre especies de gramíneas y

leguminosas en la rotación para generar un incremento en el contenido de COS (Beltrán et al., 2018; Duval et al., 2016; Villamil et al., 2006).

En la capa de 0-5 cm el incremento en el COS se debió principalmente a un aumento en la fracción de las huminas, y en el caso de las fracciones físicas a incrementos en el COM. Si bien es de esperar que las fracciones COPg y COPf, que se consideran más dinámicas y que a menudo han sido relacionadas con la MO de más reciente formación, muestren mayor respuesta a las prácticas de manejo, en particular en la superficie (Beltrán et al., 2018; Duval et al., 2016; Six et al., 2002), no se observaron diferencias entre tratamientos en estas fracciones. Lo mismo ocurrió con los AF y AH, que también se asocian a moléculas de más reciente formación (Ding et al., 2006), y que no reflejaron diferencias entre los tratamientos. Esto puede deberse a que estas fracciones muestran mayor variabilidad porcentual, lo que puede enmascarar las diferencias. En particular el COPg incluye a menudo restos vegetales, lo que hace que esta variable presente una mayor variabilidad espacial y entre repeticiones (Luo et al., 2020; Wander, 2004). También es posible que, al tratarse de fracciones más dinámicas, parte del COS formado en estas fracciones sea mineralizado o transformado rápidamente. Por otra parte, los cambios observados en las fracciones de huminas y COM indican que, si bien estas fracciones representan al COS más insoluble (Olk et al., 2019a) y más estrechamente asociado a la fracción mineral (Six et al., 2002), respectivamente, se trata de fracciones susceptibles al efecto de las prácticas de manejo. Otros autores también observaron que los CC, así como otras prácticas de manejo, generaron cambios significativos en el contenido de COM y huminas. Guimarães et al. (2013) y Yang et al. (2004) observaron un incremento en el contenido de huminas en lotes con CC, mientras que no observaron diferencias significativas en las fracciones de AF y AH. Duval et al. (2016) observaron que, tras 3 años de iniciado el ensayo, el CC produjo una disminución en el contenido de COM respecto a un barbecho desnudo, aunque esta diferencia dejó de ser significativa al cuarto año. En general, se describe al COM como una fracción que se encuentra fisicoquímicamente protegida, por encontrarse íntimamente asociada a la fracción mineral y ocluida dentro de micro-agregados estables, y por esto mismo se considera que representa COS de mayor antigüedad y resistencia a la degradación (Lehmann y Kleber, 2015). En el caso de las huminas, se considera que se trata de una fracción químicamente más evolucionada, de estructura más compleja y estable, de mayor antigüedad y más recalcitrante (resistente a la degradación) (Olk et al., 2019a). Sin embargo, algunos autores rechazan este enfoque, considerando que los procesos de transformación de la MO del suelo son muy complejos y no lineales (Dijkstra et al., 2020; Huang et al., 2021; Luo et al., 2020). Según estos autores, MO recientemente formada puede presentar una estructura resistente a la degradación, de la misma manera que moléculas complejas y de mayor antigüedad pueden ser transformadas, en las condiciones adecuadas, en moléculas más simples y de fácil degradación. Del mismo modo, durante el proceso de incorporación de la MO al suelo y formación de agregados por las raíces, hifas y exudados, MO recientemente incorporada puede encontrarse fisicoquímicamente muy protegida dentro de los agregados (Dijkstra et al., 2020; Sokol et al., 2018). A su vez, MO protegida puede ser liberada para la degradación biológica por acción de los exudados de las raíces (Dijkstra et al., 2020; Huang et al., 2021).

A mayor profundidad se observó que los lotes en rotación soja-maíz presentaron mayor contenido de COS que lotes bajo soja (diferencias que resultaron significativas en las capas de 5-10 y 20-40 cm). Esto puede deberse al aporte de MO originado por el decaimiento de las raíces del maíz, que produce grandes cantidades de biomasa y posee un importante desarrollo radical en profundidad. Huang et al. (2021) observaron que la formación de nuevo COS se encuentra correlacionada con la biomasa aérea y longitud de las raíces. Por otra parte, las rotaciones incluyendo gramíneas y leguminosas tienden a favorecer los procesos de formación del COS, gracias a un balance adecuado entre el aporte de residuos ricos en C de las gramíneas y ricos en N de las leguminosas, y a mayor producción de biomasa de las gramíneas cuando cuentan con un aporte adecuado de N (Blanco-Canqui et al., 2015; McDaniel et al., 2014). Sin embargo, el tratamiento S_{CC} que incluyó gramíneas y leguminosas, si bien mostró valores mayores en la capa de 5-10 cm, no presentó diferencias estadísticamente significativas respecto de S. Esto indica que el efecto de la rotación soja-maíz sobre el COS fue más importante que el del CC en profundidad (> 5 cm). Romaniuk et al. (2018) observaron que el efecto sobre el COS fue mayor al incluir maíz y trigo en la rotación que al incluir trigo como CC en un cultivo de soja. De manera similar, en la capa de 20-40 cm el contenido de COS fue mayor en la rotación soja-maíz que en la soja, y fue mayor en ausencia de CC, especialmente en el caso de la rotación soja-maíz. Una explicación posible para esto es que la presencia de las raíces del centeno en lotes con CC pudo haber restringido el desarrollo en profundidad de las raíces del maíz, lo que a su vez explicaría en parte (junto con el aporte de MO por parte del centeno) los mayores contenidos de COS en los primeros 10 cm en R_{CC} que en R. Por otra parte, al analizar el contenido de COS en los primeros 40 cm de suelo, se obtuvieron los siguientes valores promedio: 25 $t\cdot ha^{-1}$ para R_{CC} y 33 $t\cdot ha^{-1}$ para R, lo que sugiere que la presencia del centeno pudo disminuir la producción de biomasa por parte del maíz. Distintos autores reportaron que los CC pueden producir una disminución en la producción del cultivo principal, especialmente en años secos donde el consumo de agua por parte del CC puede resultar limitante (Alfonso et al., 2020; Nielsen et al., 2015). Para S y S_{CC} el contenido de COS en los primeros 40 cm de suelo fue de 20 y 25 $t\cdot ha^{-1}$, respectivamente.

Al analizar las fracciones químicas, en la capa de 5-10 cm el incremento en el COS en la rotación se debió a un incremento en la fracción de las huminas. Al analizar las fracciones físicas del COS, se observa que en la capa de 5-10 cm el COM fue mayor en la rotación que en el cultivo de soja, y mayor en sistemas con CC. Además, en la capa de 5-10 cm, en el tratamiento R_{CC} se produjo un incremento en el COPg. En la capa de 10-20 cm no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en el contenido de COS, pero si se observó un mayor contenido de COPf en la rotación soja-maíz (R y R_{CC}) que en el cultivo de soja (S y S_{CC}). Otros autores también observaron mayores contenidos de estas fracciones en presencia de CC y en rotaciones incluyendo gramíneas en Argiudoles y Hapludoles de la Región Pampeana, relacionados al mayor aporte de residuos orgánicos (Beltrán et al., 2018; 2021; Duval et al., 2016; Romaniuk et al., 2018; Varela et al., 2014). En la capa de 20-40 cm, el incremento en el COS en el tratamiento R con respecto a los demás tratamientos se debió a un incremento en la fracción del COM, posiblemente formado a partir del decaimiento de las raíces del maíz en profundidad. El COM fue mayor en

R que en todos los demás tratamientos, lo que indica que el cultivo de maíz permite acumular COM en profundidad, y que esto de alguna manera se ve restringido por la presencia de CC, ya sea por un menor desarrollo de las raíces de maíz en profundidad, o bien porque el CC genere la mineralización de ese C.

En cuanto a la composición relativa del COS y su distribución entre las distintas fracciones obtenidas por métodos químicos, a pesar de que hubo cambios en el contenido de COS y en particular en la fracción de las huminas, la composición relativa del COS se mantuvo constante, sin presentar diferencias significativas entre tratamientos. Al analizar la distribución entre las fracciones obtenidas por métodos físicos, por el contrario, se observan cambios en la composición del COS. En particular, en la capa de 20-40 cm pudo observarse una mayor proporción de COPf y menor proporción de COM en lotes con CC. Esto parece apoyar la idea de que una disminución en el COS en profundidad se debió a una mayor actividad biológica en lotes con CC, y al efecto disruptivo de las raíces que pueden modificar los agregados, dejando al descubierto MO antes protegida fisicoquímicamente (por ejemplo, el COM) (Dijkstra et al., 2020).

En resumen, la inclusión de centeno como CC generó un incremento en el contenido de COS, tanto en el cultivo de soja como en la rotación soja-maíz. El efecto de la secuencia del cultivo principal sobre el COS fue más importante que el efecto del CC, observándose contenidos mayores de COS en la rotación soja-maíz que en el cultivo de soja en distintas fracciones y profundidades. Tanto las huminas como el COM se vieron afectados por las prácticas de manejo, indicando que estas son fracciones dinámicas.

Pergamino

En PER, se evaluó el efecto de 8 y 9 años de CC de avena y vicia en lotes bajo soja continua en un Argiudol típico, en tres fechas distintas (PER-CP_o, después del secado del CC del año 2018 y al inicio del cultivo de soja; PER-CP_f, a la cosecha del cultivo de soja; y PER-B_r, después del secado del CC del año 2019). En este sitio, el CC generó un incremento en el COS en la capa de 0-5 cm observable en la segunda fecha, entre el cultivo de verano y el CC. Este aumento pudo deberse a la incorporación al COS de los residuos del CC anterior (Bolinder et al., 2020; Poeplau y Don, 2015). En el caso de los consociados entre gramíneas y leguminosas, se suele atribuir el incremento del COS a las gramíneas, que producen mayor cantidad de residuos y de mayor calidad, y que son incorporados al COS gracias al aporte de N de las leguminosas (Villamil et al., 2006). Hacia la tercera fecha, si bien los valores de COS siguieron siendo mayores en el tratamiento con CC, la diferencia dejó de ser significativa. Esto indicaría que el CC puede generar un incremento estacional en el COS en superficie durante el verano, que es mineralizado (o redistribuido) durante el crecimiento del CC siguiente. Esto también explicaría que no se observen diferencias en el COS en superficie en PER-CP_o.

En PER-CP_o, únicamente se observaron diferencias significativas entre tratamientos en la capa de 5-10 cm, donde el lote sin CC presentó mayor contenido

de COS. En PER-CP_o, se observó una marcada estructura laminar en el lote sin CC, a los 5 cm de profundidad y de entre 3 y 5 cm de espesor. Esta estructura laminar restringía visiblemente el desarrollo en profundidad de las raíces del cultivo de soja, que se concentraban en los primeros 10 cm. En el lote con CC, esta estructura laminar también fue observada, pero fue mucho más débil permitiendo el paso de las raíces. Por lo tanto, mayor contenido de COS en S en 5-10 cm pudo deberse a la mayor abundancia de raíces en esta capa. Esta disposición de las raíces en suelos con monocultivo de soja en SD y presencia de estructura laminar ya había sido observada por Sasal et al. (2017). Esta misma diferencia entre lotes pudo observarse en las tres fechas, con mayor cobertura, diversidad y abundancia de fauna y presencia de raíces en profundidad en el lote con CC. Esto explica también el mayor contenido de COS en S_{CC} que en S en la capa de 20-40 cm, observado en PER-B_f.

En cuanto a las fracciones obtenidas por métodos químicos, en la profundidad de 0-5 cm el CC modificó la variación temporal del contenido de huminas. En esta profundidad, las huminas aumentaron durante el ciclo de cultivo en presencia de un CC, mientras que disminuyeron en el lote bajo barbecho desnudo. Sin embargo, el hecho de que no se hayan observado diferencias en el contenido de huminas en PER-CP_o (tratándose de un ensayo de larga duración, donde las fechas PER-CP_o y PER-B_f pueden considerarse como momentos del año equivalentes) indica que este efecto no es permanente en el tiempo o bien que se debió a particularidades de ese ciclo de cultivo. Esta diferencia en el contenido de huminas en PER-B_f se repite en las profundidades de 5-10 y 20-40 cm. En la profundidad de 10-20 cm, se observó una disminución en el contenido de huminas en ambos tratamientos en PER-B_f. Además de una disminución en el contenido total de huminas en PER-B_f, se observó un incremento en los contenidos de AF y AH (significativo en la profundidad de 20-40 cm) y en la contribución relativa de estas fracciones al COS en las capas de 5-10 y 20-40 cm. Esto sugiere que en la tercera fecha pudo suceder la transformación de las huminas a fracciones más solubles, además de su mineralización (Doane et al., 2003).

En relación a las fracciones obtenidas por métodos físicos, el CC generó un incremento en la fracción de COP_f en las tres fechas, y en COP_g en PER-CP_f y PER-B_f. Otros autores observaron que los CC pueden producir incrementos en el COP_g y en el COP_f, y que estos incrementos se observan principalmente en los primeros 5 a 10 cm de suelo (Beltrán et al., 2018; 2021; Duval et al., 2016; 2018; Romaniuk et al., 2018). Este incremento se atribuye al mayor aporte de biomasa por parte del CC. Sin embargo, llama la atención que en un estudio de mediano plazo (8 años desde la implementación del CC) se observe un efecto del CC en el COP_g en PER-B_f y no en PER-CP_o (donde se observaron valores mayores en S_{CC}, pero sin diferencias significativas), cuando ambas fechas representan el final del CC. Las muestras de PER-CP_o fueron tomadas un mes después de secado el CC, con la soja ya sembrada. PER-B_f corresponde a una semana después de secado el CC, en el ciclo de cultivo siguiente. Por lo tanto, puede ser que el incremento en el COP_g producido por el CC, que se debe principalmente a los residuos recientes, sea mineralizado o bien transformado en parte a la fracción COP_f en el transcurso de algunas semanas

(Beltrán et al., 2018). Las diferencias pueden deberse también a particularidades de cada ciclo de cultivo.

Además, en PER-B_f se observó una disminución en el COM en la capa de 10-20 cm en ambos tratamientos. Esta disminución pudo deberse a particularidades climáticas de ese año, ya que también se observaron disminuciones en esta fecha en otras fracciones (en el COP_f en las capas de 0-5 y 5-10 cm). Las precipitaciones registradas previo al muestreo fueron menores en PER-B_f que en PER-CP_o para un período de tiempo equivalente, lo que pudo haber restringido la formación de COP_f y COM. Buschiazzo et al. (1991) indicaron que un mayor contenido de humedad puede favorecer la actividad biológica, ayudando a la acumulación de MO humificada y compuestos órgano-minerales. Por el contrario, Beltrán et al. (2021) observaron que en años más húmedos y cálidos puede haber mayor actividad microbiana, estimulando la mineralización del COS.

En PER-B_f, en la capa de 20-40 cm la presencia del CC atravesando la estructura laminar y permitiendo el desarrollo de raíces en profundidad parece haber permitido la acumulación de COM y de huminas. Este incremento ocurrió solo en la tercera fecha, posiblemente debido a un mayor desarrollo de raíces en profundidad en un año más seco. Este incremento en el COS en la capa de 20-40 cm fue el principal responsable de las diferencias observadas en esta fecha al calcular el contenido de COS en los primeros 40 cm (36 t.ha⁻¹ en S, contra 51 t.ha⁻¹ en S_{CC}). Es importante destacar la importancia de las prácticas de manejo que permiten acumular COS en profundidad, dado que pueden tener un mayor impacto en la captura de C atmosférico (Adetunji et al., 2020; Lal, 2001).

A modo de resumen, la inclusión de avena y vicia como CC generó un incremento en el contenido de COS en un cultivo de soja. Este aumento afectó distintas profundidades en distintas fechas. El efecto de los CC fue de mayor magnitud en la capa de 0-5 cm, donde se observaron aumentos en el COP_g y el COP_f, así como en la fracción de las huminas. Los CC también produjeron un incremento en la capa de 20-40 cm, donde se observó mayor contenido de COM, AF, AH y huminas. Los efectos observados dependieron de la fecha de muestreo, indicando que el efecto de los CC puede ser temporario, dependiendo del año en particular y del momento dentro del ciclo de cultivo.

2.6.2. Efecto a corto plazo de los cultivos de cobertura en dos suelos de diferente textura

Para evaluar el efecto de los CC en el corto plazo, se analizó el contenido y composición del COS tras dos años en un Hapludol éntico franco arenoso (BEL) y durante los dos primeros años en un Argiudol abráptico franco (CHA). En el Hapludol, los CC tuvieron efectos distintos dependiendo de la secuencia de cultivos en la que fueron introducidos, generando ningún efecto o disminuciones en distintas fracciones y a distintas profundidades. En líneas generales, incluir CC en una rotación de maíz-soja disminuyó el COS (principalmente debido a disminuciones en el COM) en todas

las profundidades, mientras que incluir CC en las rotaciones de trigo/soja-maíz y soja-trigo/soja solo produjo disminuciones en algunas capas. En el Argiudol, los CC no generaron cambios significativos tras dos años. Sin embargo, al analizar distintas fechas durante los dos primeros años si se observa un cambio en la variabilidad temporal de las distintas fracciones con efectos mixtos dependiendo de la fecha. De esto se desprende que, durante los dos primeros años, los CC pueden acelerar la dinámica de la MO, incluyendo su formación y descomposición. A continuación, se discute con mayor detalle los resultados obtenidos para cada uno de los sitios.

Bellocq

En BEL, se observaron mayores contenidos de COS en sistemas sin CC. Esto parece indicar que la inclusión de los CC puede generar una disminución inicial en el contenido de COS, producto de una mayor actividad biológica y/o de menores rendimientos en suelos con limitación de nutrientes. Otros autores también observaron que, si bien se espera que los CC generen un incremento en el COS, la adopción de esta práctica puede producir pérdidas en el corto plazo (Álvarez et al., 2017; Jian et al., 2020). Poeplau y Don (2015) reportaron una disminución en el COS tras la introducción de CC en 13 de 139 casos. Estos autores observaron que los lotes donde los CC generaban una disminución en el COS correspondían en todos los casos a estudios de corto plazo (< 6 años), y atribuyeron la disminución a la heterogeneidad espacial del COS en el lote, y al efecto de *priming* debido a un aporte extra de MO. Otros autores también observaron este efecto de *priming* en el corto plazo al aumentar el aporte de residuos orgánicos al suelo (Dijkstra et al., 2020; Huang et al., 2021; Oliveira et al., 2019; Paul, 2016; Sokol et al., 2018). En este sentido, un incremento en el aporte de residuos (y en particular de residuos con una relación C:N baja, como es el caso de las leguminosas) estimula el crecimiento de la comunidad microbiana, lo que a su vez genera un ciclado y descomposición acelerada del C. Además, la exploración de las raíces puede tener un efecto disruptivo sobre los agregados, exponiendo COS anteriormente protegido, a la vez que modifican la porosidad, generando condiciones de humedad y aireación adecuadas para la actividad microbiana (Dijkstra et al., 2020).

En este estudio el aporte extra de MO en suelos con un contenido inicial de C relativamente bajo parece haber propiciado la descomposición del COS. Los tratamientos con mayor contenido de COS (M-S y T/S-M) fueron los que tuvieron sólo un cultivo de leguminosas en los dos años, en comparación con los demás lotes que tuvieron dos cultivos de leguminosas en dos años, lo que indica que la fuente de residuos ricos en N contribuyó a la degradación microbiana del COS. Por el contrario, Villamil et al. (2006), en un estudio de 4 años en un Argiudol ácuico franco limoso, observaron un incremento mayor en el COS en rotaciones incluyendo gramíneas y leguminosas (maíz/centeno-soja/centeno+vicia o maíz/centeno-soja/vicia) que en rotaciones más sencillas con menos frecuencia de leguminosas (maíz-soja y maíz/centeno-soja/centeno), indicando la necesidad de una fuente de N suficiente para la incorporación de los residuos de las gramíneas a la MO del suelo. Estas diferencias pueden indicar que el tiempo para que los CC provoquen incrementos en

el COS debe ser mayor, o bien que los aumentos en el COS se dan más fácilmente en suelos de textura más fina. El contenido de COS en los primeros 40 cm repitió la misma tendencia con contenidos menores en lotes con CC, y especialmente en M-S en comparación con v/M-c/S. Las rotaciones que mostraron los mayores contenidos de COS y de las distintas fracciones fueron T/S-M y M/S, seguidas de T/S-v/M.

El estudio de las fracciones químicas del COS resultó ser menos sensible para detectar el efecto de los CC que el estudio del COS y las fracciones físicas. Sólo se apreciaron diferencias en la capa de 20-40 cm, donde el contenido de huminas fue mayor en lotes sin CC, para una misma rotación de los cultivos principales. Esto indica que el efecto de la degradación del COS por un incremento en la actividad biológica puede afectar en el corto plazo capas más profundas y fracciones más insolubles del COS (Liang et al., 2022). El estudio de las fracciones físicas, por otra parte, permitió ver el efecto de los CC a más profundidades que el estudio del COS por sí solo. Los CC generaron una disminución en el contenido de COM respecto a las mismas rotaciones de cultivos principales sin CC. Este efecto fue significativo en los tres tratamientos en las capas de 0-5, 5-10 y 20-40 cm, y en la rotación M-S (en comparación con v/M-c/S) también en la capa de 10-20 cm. El CC tuvo el mayor efecto en la mineralización del COM en la rotación M-S. Esto puede deberse a que este fue el tratamiento que tuvo la mayor intensificación por inclusión de CC, pasando de dos a cuatro cultivos anuales (M-S vs v/M-c/S), mientras que los demás tratamientos pasaron de tres a cuatro cultivos anuales por la inclusión de CC. También, es el único tratamiento en el cuál se incluyó una gramínea como CC en el invierno anterior al muestreo (centeno). Según Huang et al. (2021) el efecto de *priming* depende de las especies empleadas, siendo mayor para cultivos con raíces más largas, finas y con menor contenido de N como las de las gramíneas. En este tratamiento, la inclusión de CC también produjo un incremento en el contenido de COPg y en la proporción de COPg y COPf en la capa de 20-40 cm, debido al aporte de biomasa por parte de las raíces del CC (Dijkstra et al., 2020). Según Sokol et al. (2018), los exudados de las raíces son la fuente principal para la formación tanto de COP (grueso y fino) como de COM, y ambas fracciones son susceptibles al efecto de *priming*. Sin embargo, el efecto neto de descomposición del C por *priming* microbiano puede ser mayor en la fracción de COM que en COPg y COPf, que son fracciones más dinámicas (Huang et al., 2021). Duval et al. (2016) también observaron una disminución en el COM en lotes con CC en comparación con un barbecho desnudo, en un Argiudol típico franco limoso, al tercer año desde incluido el CC. Esta disminución, sin embargo, dejó de ser significativa a partir del cuarto año del ensayo, sugiriendo que se trata de un efecto temporario y de corto plazo.

Por otra parte, resultan llamativas las diferencias entre tratamientos observadas en la profundidad de 20-40 cm, ya que en el corto plazo se espera observar efectos mayores en los primeros 5 a 10 cm de suelo (Beltrán et al., 2018; Duval et al., 2016; Mazetto Júnior et al., 2019). Sin embargo, en BEL se observaron efectos en la capa de 20-40 cm en el contenido de huminas, COPg, COM y COS tras dos años de ensayo, sugiriendo la importancia de las raíces en el ciclo del COS. Varios autores coinciden en que los residuos de las raíces y principalmente los exudados de las raíces vivas son más importantes en la transformación, estabilización

y desestabilización del COS que los residuos de la biomasa aérea de las plantas (Dijkstra et al., 2020; Liang et al., 2022; McDaniel et al., 2014; Rasse et al., 2005; Sokol et al., 2018). Estos resultados destacan la importancia del estudio del efecto de los CC sobre el COS en profundidad. También, el hecho de que todas las fracciones del COS, incluyendo las huminas y el COM que son consideradas la fracción más insoluble y la fracción fisicoquímicamente más protegida, respectivamente, son susceptibles a transformaciones inducidas por las prácticas de manejo (Huang et al., 2021; Piñeiro et al., 2009; Six et al., 2002). También, se observa un fuerte efecto de las rotaciones sobre el COS y sobre el desempeño de los CC, indicando la importancia del estudio de distintas secuencias de cultivos, grado de intensificación y balance entre familias de especies (McCelland et al., 2020). Por último, es importante notar que si la intensificación mediante la inclusión de CC puede generar una disminución inicial en el contenido de COS, producto de una mayor actividad biológica y mayor contenido de humedad durante el invierno, es posible que sea necesario incluir CC durante varios ciclos de cultivo sucesivos para observar efectos beneficiosos relacionados a un incremento en el contenido de MO (por ejemplo, mayor estabilidad estructural y mejores propiedades hidráulicas).

Chascomús

En CHA se evaluó el efecto tras dos años consecutivos de CC (un consociado de cebada y vicia el primer año, y de avena, vicia y cebada el segundo año) en comparación con un barbecho desnudo, en un cultivo de maíz bajo SD. Tras dos años, el CC no generó cambios en el COS, AF, AH, huminas, COPg ni COM. Varios autores indicaron que los CC a menudo no producen cambios observables en los primeros años desde su implementación (Bolinder et al., 2020; Duval et al., 2016; Fronning et al., 2008; Nascente y Stone, 2018). Esto puede tener varios motivos entre los que se incluyen: i) el porcentaje de cambio producido por los CC en el corto plazo es pequeño en relación a la variabilidad natural de las propiedades estudiadas (Goidts et al., 2009; Poeplau y Don, 2015); ii) el efecto de *priming* puede contrarrestar el aporte extra de MO que se produce en el CC (Poeplau y Don, 2015); iii) la velocidad de incorporación de los residuos orgánicos al COS puede ser demasiado lenta para que se produzcan cambios observables en el período de tiempo estudiado. El CC solo generó cambios significativos en la capa de 20-40 cm, donde incrementó el COPf. Este incremento posiblemente fue debido al mayor aporte de residuos de raíces en comparación con el barbecho desnudo (Huang et al., 2021; Liang et al., 2022) y a la acción disruptiva de las raíces que puede desarmar y armar agregados de mayor tamaño (Dijkstra et al., 2020; Duval et al., 2016), lo que se vio reflejado en una disminución en la proporción de COM en esa capa (que pudo transformarse en parte a la fracción del COPf).

2.6.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la variabilidad temporal del carbono orgánico del suelo y sus fracciones.

Al evaluar el efecto de los CC sobre el COS y sus fracciones tras dos años de ensayo (fecha CHA-B2) no se observaron diferencias en comparación con el barbecho desnudo (a excepción del COPf en la capa de 20-40 cm). Sin embargo, al analizar el efecto de los CC en cinco momentos distintos durante esos dos primeros años (CHA₀, CHA-B1, CHA-CP₀, CHA-CP_f y CHA-B2) sí se observó un efecto de esta práctica en distintas fechas, profundidades y fracciones. Estos resultados indican la necesidad del estudio de la variabilidad temporal del COS y sus fracciones, así como la necesidad de tener en cuenta el momento de muestreo al evaluar el efecto de los CC y al comparar entre sitios, especialmente en estudios de corto plazo (Luo et al., 2020).

La presencia de CC aceleró la dinámica de ciclado del COS (su formación, degradación y transformación entre distintas fracciones). Sokol et al. (2018) también observaron este efecto en sistemas con mayor aporte de MO. En CHA₀, que representa el momento inicial antes de introducir los CC, se observaron diferencias entre los lotes en los que luego se implementarían los tratamientos (CC vs barbecho desnudo) en el contenido de huminas (capa de 10-20 cm) y en el de COM (10-20 y 20-40 cm). Esta diferencia puede deberse a la variabilidad espacial natural del contenido y composición del COS, en un suelo overo donde los horizontes mostraron una marcada variabilidad en su espesor dentro de los lotes. Además, esta diferencia inicial indica nuevamente que en ensayos de corto plazo la variabilidad espacial es importante y puede ser del mismo orden de magnitud que las diferencias entre tratamientos, dificultando el análisis de los resultados (Goidts et al., 2009). Poepalu y Don (2015) advirtieron que la heterogeneidad espacial podía ser un problema al estudiar el contenido de COS en el tiempo, incluso cuando los muestreos se realizaban en un mismo lote, pudiendo llevar a conclusiones erróneas o enmascarar el efecto de los tratamientos.

En ambos tratamientos se observó una disminución en el COS (en la profundidad de 5-40 cm) entre el inicio del ensayo (CHA₀) y la última fecha de muestreo (CHA-B2). Una disminución en el COS producto de la agricultura continua en SD fue reportada anteriormente en numerosas ocasiones en la Región Pampeana (Domínguez et al., 2010; Duval et al., 2016; Novelli et al., 2017; Wyngaard et al., 2022). En el tratamiento con CC, se produjo una disminución en el COS durante el crecimiento del primer CC (CHA-B1) entre los 5 y los 20 cm, que puede atribuirse al efecto de las raíces sobre los agregados y a la mayor actividad biológica en M_{cc}, resultante de condiciones más adecuadas de temperatura y humedad en presencia de las raíces y la cobertura vegetal del CC (Dijkstra et al., 2020; Poeplau y Don, 2015). En esta fecha, M_{cc} presentó menor contenido de COS que M. En la tercera fecha, tres semanas después de finalizado el CC, el COS aumentó con respecto a CHA-B1, aunque no alcanzó el valor de CHA₀. Este incremento pudo ser debido a la incorporación parcial de los residuos del CC al COS (Blanco-Canqui et al., 2015), e hizo que los valores de COS volvieran al nivel del tratamiento sin CC. Sin embargo, hacia el final del cultivo de maíz (CHA-CP_f), el COS volvió a disminuir a valores

similares a los observados en CHA-B1, y por debajo de los valores observados en el tratamiento sin CC. Otra vez, esto pudo deberse a la rápida mineralización de los residuos del CC anterior y del COS, en el tratamiento con CC que presentó mayor aporte de residuos orgánicos. Sin embargo, el COS en el tratamiento con CC volvió a aumentar hacia la quinta fecha (con el CC maduro), posiblemente debido al aporte de los exudados de las raíces del CC en crecimiento (Sokol et al., 2018), revirtiendo nuevamente la diferencia entre los tratamientos. Otros autores también observaron que en el corto plazo el efecto de los CC puede ser transitorio y cambiar en el transcurso de un ciclo de cultivo (Blanco-Canqui et al., 2013a).

Al analizar las fracciones del COS obtenidas por métodos químicos, se observa que todas las fracciones tuvieron una dinámica temporal propia y, en el caso de las huminas, esta dinámica se vio afectada por los CC. Las principales diferencias entre tratamientos se observaron en la fracción de las huminas entre la primera y segunda fecha (durante el primer ciclo del CC) en las capas de 5-40 cm. El contenido de huminas, que presentó diferencias iniciales entre lotes, tendió a aumentar en M y a disminuir o mantenerse constante en M_{CC} (lo que indica que los cambios observados en el COS reflejaron principalmente lo que ocurrió con la fracción de las huminas). El incremento en el contenido de huminas en M se debe posiblemente a la incorporación de los residuos del maíz del cultivo anterior a esta fracción durante el barbecho desnudo. En M_{CC} , por el contrario, este incremento no ocurrió, lo que indica que esos residuos fueron rápidamente mineralizados, o bien incorporados a alguna de las fracciones y luego mineralizados. Sin embargo, esta diferencia en el contenido de huminas entre tratamientos dejó de ser significativa en CHA-CP_o, debida a disminuciones en el tratamiento sin CC y/o incrementos en el tratamiento con CC. Esta fecha de muestreo corresponde a la siembra del cultivo de maíz, pasadas tres semanas de la terminación del CC. Es posible que el incremento en el contenido de huminas en M_{CC} se deba a la incorporación de los residuos del CC, mientras que la disminución en M se deba a la mineralización de esta fracción durante el barbecho. En la capa de 20-40 cm, este mismo comportamiento se repitió entre CHA-CP_f y CHA-B2, durante el segundo período de barbecho. Estos resultados parecen indicar que la disminución en las huminas al introducir CC es temporal y no persiste más que algunos meses. Otros autores observaron que la inclusión de CC en el largo plazo (13 años) produjo un incremento en el contenido de huminas (Yang et al., 2004). Por otra parte, la presencia de CC produjo un incremento en el contenido de AF en todas las fechas en la capa de 10-20 cm.

En el caso de las fracciones del COS obtenidas por métodos físicos, también se observa una variación temporal en las distintas fracciones y en distintas profundidades. En el caso del COM en las capas de 10-20 y 20-40 cm, se observa que esta variabilidad temporal se vio afectada por la presencia de CC, mostrando un comportamiento similar al descrito para la fracción de las huminas. Una vez más, la inclusión del CC parece haber promovido en un principio la mineralización del COM en profundidad y acelerado la dinámica del COS (Sokol et al., 2018). Sin embargo, esta diferencia se invirtió en la tercera fecha, debido principalmente a un incremento en el COM en M_{CC} , atribuible a la incorporación de residuos de las raíces al COM. En la capa de 20-40 cm este comportamiento se repitió entre la cuarta y quinta fechas.

En CHA-B2, no se observaron diferencias entre tratamientos en el contenido de COM. Esto indica que el efecto inicial de descomposición del COM tras la inclusión de CC, debido al mayor aporte de residuos orgánicos y la actividad de las raíces y biota asociada, puede ser temporal y dura sólo algunos meses. Duval et al. (2016) observaron que, al incluir un CC de avena y vicia en un cultivo de soja en un Argiudol típico, se produjo una disminución en el COM, que fue observada 3 años después de iniciado el ensayo, y que sin embargo dejó de ser significativa en los años posteriores. Otros autores observaron que, en el largo plazo (estudios de 8 años de duración), los CC no generan cambios significativos en el COM en Molisoles de la Región Pampeana (Beltrán et al., 2018; 2021; Romaniuk et al., 2018).

En cuanto al COPg, en la capa de 5-10 cm se observó que el tratamiento con CC tuvo un mayor contenido de COPg que el barbecho desnudo en CHA-CP_o, mientras que el contenido fue mayor en el tratamiento sin CC en CHA-B2. Esto pudo deberse a diferencias en el momento de muestreo (siendo CHA-CP_o después del secado del CC y CHA-B2 durante su crecimiento), o a particularidades de cada año. Otros autores indicaron que las fracciones más lábiles de COS pueden presentar una elevada variabilidad temporal (Luo et al., 2020; Wander, 2004). En este estudio, no se observó efecto del tratamiento sobre el COPf en los dos primeros años. Fronning et al. (2008) tampoco observaron cambios en el contenido de COPf durante los primeros 3 años de incluido un CC de centeno en una rotación de maíz-soja en un Haplaquol franco. Duval et al. (2016) tampoco observaron diferencias en el COPf tras 3 años de CC, pero si registraron un incremento en esta fracción a partir del cuarto año.

2.6.4. Corolario

Los CC generaron un incremento en el contenido de COS en comparación con un barbecho desnudo en un Hapludol típico y en un Argiudol típico bajo SD de la Región Pampeana en el mediano a largo plazo (15 y 8 años de iniciado el ensayo, respectivamente). En el Hapludol típico (VIL) la inclusión de centeno como CC generó un incremento en el contenido de COS, tanto en el cultivo de soja como en la rotación soja-maíz. El efecto de la secuencia de cultivo principal sobre el COS fue más importante que el efecto de los CC, observándose contenidos mayores de COS en la rotación soja-maíz que en el cultivo de soja en distintas fracciones y profundidades. Sin embargo, el efecto de los CC fue mayor en el cultivo de soja que en la rotación. El incremento en el COS se debió principalmente a incrementos en las fracciones de huminas y COM, y ocurrió en los primeros 5 o 10 cm de suelo.

En el Argiudol típico (PER) el CC de avena-vicia generó un incremento en el COS en comparación con un barbecho desnudo, afectando distintas fracciones en distintas fechas y profundidades. Hubo efectos significativos en las capas de 0-5, 5-10 y 20-40 cm. Además, el muestreo en fechas consecutivas permitió ver que el efecto de los CC sobre el COS y sus fracciones es en ocasiones temporal. Los CC disminuyeron el contenido de AF y AH en profundidad (20-40 cm) hacia el final del ensayo. Los CC tuvieron efectos diferentes en el contenido de huminas, generando

incrementos, ningún efecto o disminuciones dependiendo de la fecha y la profundidad. Los CC generaron incrementos en COPg, COPf y COM, principalmente en superficie (0-5 cm).

En el corto plazo, los CC pueden disminuir el contenido de COS en comparación con un barbecho desnudo en un Hapludol éntico bajo SD de la Región Pampeana (BEL). Tras dos años de ensayo, los CC disminuyeron el COM en los primeros 40 cm del suelo, y el contenido de huminas en la capa de 20-40 cm. Por el contrario, dos años de CC no produjeron mayores cambios en el COS y sus fracciones en un Argiudol abruptico bajo SD de la Región Pampeana (CHA), generando únicamente un incremento en el COPf en la capa de 20-40 cm. Sin embargo, al evaluar el efecto de los CC en distintos momentos durante esos dos años en el Argiudol abruptico, se observa que los CC pueden modificar la variabilidad temporal del COS y sus fracciones, acelerando su ciclado. Como resultado, pueden registrarse incrementos, disminuciones o ningún cambio en las distintas fracciones en distintos momentos del año, a medida que se forma nuevo COS a partir de los residuos del CC, pero también es mineralizado más rápidamente por la mayor actividad biológica y por el efecto de las raíces, que modifican la estructura incrementando la aireación y rompiendo y formando nuevos agregados. Los cambios en el COS durante los primeros dos años se registraron principalmente en la fracción de las huminas, en el COM y en el COPg. Además, se observó que las fracciones presentan una dinámica temporal propia dentro del ciclo de cultivo que a menudo es de mayor magnitud que el efecto de los CC.

Por otra parte, los resultados obtenidos indican que todas las fracciones del COS estudiadas son susceptibles a las prácticas de manejo, incluyendo las fracciones que a menudo se consideran más estables como son las huminas y el COM. Los CC pueden afectar el contenido de COS y de sus distintas fracciones por lo menos en los primeros 40 cm del suelo, debido principalmente al aporte de biomasa y al efecto de las raíces. Es importante, por lo tanto, estudiar el efecto de los CC a distintas profundidades.

El efecto de los CC puede ser temporario y variar dentro de un ciclo de cultivo (especialmente en los primeros años desde su implementación), por lo que resulta importante tener en cuenta el momento de muestreo a la hora de comparar entre ensayos. Los CC pueden provocar disminuciones en el COS en el corto plazo (primeros dos años). Sin embargo, los CC pueden producir incrementos en el COS en el mediano a largo plazo (8-15 años). Por lo tanto, es posible que sea necesario incluir CC durante varios ciclos de cultivo sucesivos para observar efectos beneficiosos relacionados a un incremento en el contenido de MO.

2.7. CONCLUSIONES

Los CC en sistemas bajo SD generan un aumento en el contenido de MO del suelo en comparación con rotaciones sin CC en el largo plazo. En el corto plazo, los CC disminuyen o no afectan significativamente el contenido de MO.

Las fracciones obtenidas por métodos físicos (y entre ellas el COM) resultan más sensibles a la inclusión de CC que las fracciones obtenidas por métodos químicos y el COS.

El contenido de MO y sus fracciones no es constante durante el ciclo de cultivo. Los CC aceleran la dinámica de formación y degradación de la MO, incrementando la variabilidad temporal del COS y sus fracciones.

CAPÍTULO 3 – Efecto de los cultivos de cobertura sobre la calidad física del suelo

3.1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto fundamental a tener en cuenta a la hora de evaluar el efecto de las distintas prácticas de manejo sobre la fertilidad edáfica es su efecto sobre la calidad física del suelo (CFS). Desde un punto de vista físico, podemos describir al suelo como una matriz dinámica compuesta por tres fases: una fase sólida (o matriz del suelo), una fase gaseosa (el aire del suelo) y una fase líquida (la solución edáfica o “agua del suelo”). La matriz del suelo consiste en un arreglo de partículas minerales de distintos tamaños, que interactúan entre sí y con los componentes orgánicos generando espacios que van a ser ocupados por el aire y el agua del suelo. A este arreglo de partículas se le da el nombre de estructura del suelo, y a la red de espacios “vacíos” derivados de la estructura se la conoce como sistema poroso. La configuración del sistema poroso determina la capacidad del suelo para cumplir importantes funciones, como permitir el crecimiento de las plantas y regular el régimen hídrico. Un suelo bien estructurado tiene la fuerza suficiente para sostener a las plantas, pero a la vez tiene que permitir la germinación de las semillas y el desarrollo y la exploración de las raíces. Además, un sistema poroso adecuado debe tener poros que permitan almacenar agua que pueda ser aprovechada por las plantas, y a la vez ser capaz de transmitir el exceso de agua hacia capas más profundas a una velocidad adecuada para evitar encharcamientos y escorrentía (Reynolds et al., 2009; Topp et al., 1997). De este modo, la CFS repercute a nivel de cultivo permitiendo rindes adecuados, y a la vez a nivel lote y a escala regional en funciones tan importantes como la recarga de las napas, el filtrado y purificación del agua, y la prevención del riesgo de migración de contaminantes (Topp et al., 1997; Wingeyer et al., 2015).

En la Región Pampeana, al igual que en otras regiones del mundo, existe una alerta creciente sobre el impacto del modelo de producción agrícola imperante sobre la CFS, que se evidencia en la pérdida de fertilidad, eventos de compactación, erosión hídrica y eólica y fuertes inundaciones (Duval et al., 2016; Sasal et al., 2006; 2017; Wilson et al., 2020). En las últimas décadas, se ha atribuido la degradación de los suelos a la adopción de la agricultura continua bajo siembra directa (SD) sin otras prácticas de conservación, y a la extrema simplificación de los sistemas productivos, con preponderancia de cultivos de verano (principalmente soja y maíz) y escasas o nulas rotaciones (Fernández et al., 2020). Emplear un único cultivo en el verano implica un largo período de barbecho desnudo durante el invierno, dejando el suelo desprotegido ante los eventos externos como la lluvia y el viento. El virtual abandono de las rotaciones agrícolas-ganaderas y el avance de la frontera agrícola sobre ecosistemas frágiles y tierras tradicionalmente dedicadas a otras actividades, implica la pérdida de años de descanso, en los que el suelo cubierto por pasturas o vegetación natural ganaba estructura y materia orgánica (MO), gracias a la actividad de las raíces y biota (Wilson et al., 2020). Dentro de los cultivos de verano, y desde la adopción de los cultivos transgénicos y la SD en la década de los 90, la soja es el principal cultivo en el país (AAPRESID, 2020), siendo la Región Pampeana la principal

zona de producción. Este cultivo en particular deja escasos residuos de fácil degradación, resultando en baja cobertura durante el barbecho y facilitando los procesos erosivos (Duval et al., 2016; Sasal et al., 2010; Wilson et al., 2020). Por otra parte, en suelos finos con alto contenido de limo se observa que los sistemas agrícolas simplificados en SD favorecen la formación de estructura laminar (Sasal et al., 2017), ocasionando restricciones en el movimiento vertical del agua y en el desarrollo de las raíces (Behrends Kraemer et al., 2017; Lozano et al., 2013; Sasal et al., 2017; Soracco et al., 2010). Esta forma de compactación ocurre con más facilidad en suelos bajo monocultivo o alta frecuencia de soja en la rotación, lo que se ha atribuido a la escasa cobertura del rastrojo, al desarrollo radical relativamente pobre, al largo período de barbecho entre cultivos de soja, y al mayor contenido de humedad al momento de la cosecha (Álvarez et al., 2014; Sasal et al., 2017; Behrends Kraemer et al., 2019; 2021; Wilson et al., 2020). Sumado a esta situación, la pérdida de MO incrementa el riesgo de degradación física, debido al importante rol de la MO y la biota en la generación y mantenimiento de la estructura del suelo (Blanco-Canqui et al., 2013b).

De lo anterior surge la necesidad de transformar las prácticas agrícolas actuales hacia un modelo agrícola más sustentable. La implementación de CC se posiciona como una alternativa interesante a los sistemas simplificados con escasa rotación agrícola y largos barbechos desnudos que predominan en la Región Pampeana (Blanco-Canqui et al., 2015; Duval et al., 2014; 2016). Varios autores han reportado que los CC pueden mejorar la CFS, mejorando rasgos estructurales y la estabilidad estructural y por ende las propiedades hidráulicas. Sin embargo, la bibliografía no siempre coincide o es concluyente respecto al efecto de los CC sobre las propiedades físicas (Irmak et al., 2018). Los CC pueden generar mejoras en la CFS, que se dan por tres mecanismos principales. En primer lugar, los CC mantienen cubierto el suelo durante el período de barbecho, lo que atenúa la acción erosiva del agua y el viento en comparación con un barbecho desnudo, y regula los ciclos de humedecimiento-secado y congelamiento (Mukherjee y Lal, 2015). En segundo lugar, la acción mecánica de las raíces y de la biota asociada a la rizósfera ayuda a generar y mantener la estructura del suelo (Basche y DeLonge, 2019; Blanco-Canqui et al., 2015; Carof et al., 2007; Nascente y Stone, 2018). En tercer lugar, al no ser cosechados los CC generan un aporte extra de MO, que al ser incorporada al suelo puede contribuir al mantenimiento de la estructura (por su función cementante), a la retención de agua y absorción de calor (Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Mukherjee y Lal, 2015). Esto último no necesariamente ocurre si, en lugar de reemplazar el barbecho desnudo con un CC, se intensifica la secuencia agrícola con otros cultivos de renta.

Algunos autores encontraron que los CC pueden generar mejoras en el sistema poroso del suelo, reflejadas en la densidad aparente (Dap), la porosidad total (PT), la distribución de tamaño de poros (DTPo) y demás indicadores estáticos de CFS. Varios autores observaron incrementos en la PT y disminuciones en la Dap en sistemas con CC en comparación con un barbecho desnudo (Basche y DeLonge, 2017; Blanco-Canqui et al., 2015; Carof et al., 2007; Keisling et al., 1994; Nascente y Stone, 2018; Villamil et al., 2006). Sin embargo, Álvarez et al. (2017), basándose en varios estudios sobre el efecto de los CC en la Región Pampeana, concluyeron que

la Dap se ve mínimamente afectada por la inclusión de CC, pudiendo presentar, pequeños incrementos o disminuciones. En varios estudios se reporta que los CC pueden generar un incremento en el volumen de macroporos (Haruna et al., 2018; Calonego et al., 2017; Gabriel et al., 2019; Keisling et al., 1994; Nascente y Stone, 2018; Villamil et al., 2006). Otros autores no observaron cambios en la macroporosidad (Carof et al., 2007; Waggoner y Denton, 1989). El estudio de los macroporos resulta de especial interés porque, si bien tienden a representar un volumen pequeño de la PT, juegan un papel fundamental en el flujo de agua (Cameira et al., 2003; Soracco et al., 2011), y porque es la familia de poros más afectada por las prácticas de manejo (Imhoff et al., 2010). En cuanto a la capacidad del suelo para almacenar agua, relacionada generalmente con el contenido de poros de menor tamaño, Villamil et al. (2006) y Basche et al. (2016) observaron que la presencia de CC en rotaciones de maíz-soja incrementó el agua disponible para la planta (ADP), en ensayos de 4 y 13 años de duración, respectivamente. Keisling et al. (1994) también observaron un incremento en el ADP tras 17 años de CC en un cultivo de algodón. Otros estudios no observaron efecto de los CC sobre el ADP tanto en el corto (Mukherjee y Lal, 2015; Nascente y Stone, 2018) como en el largo plazo (Blanco-Canqui et al., 2011; Chalise et al., 2019). Basche y DeLonge (2017) observaron que en ocasiones los CC pueden producir un incremento en el contenido de agua a capacidad de campo (FC), especialmente en estudios de más de 7 años de duración, en regiones con precipitaciones anuales menores a 900 mm y en suelos de textura gruesa. Villamil et al. (2006) observaron también un incremento en el contenido de agua a FC, tras 4 años de la introducción de un CC en un Argiudol ácuico. García-González et al. (2018), observaron que a partir del décimo año los CC podían producir un incremento o ningún efecto en el contenido de agua a FC, mientras que no observaron ningún efecto en períodos de tiempo menores. Otros estudios reportan que los CC no produjeron cambios en este parámetro (Blanco-Canqui et al., 2011; Chalise et al., 2019; Irmak et al., 2018; Mukherjee y Lal, 2015).

Además del efecto de los CC sobre la CRH y parámetros derivados, resulta de interés conocer qué incidencia tienen los cambios en la configuración del sistema poroso sobre la capacidad del suelo de captar y transmitir agua (indicadores dinámicos de CFS). Esto va a estar determinado por la abundancia relativa de cada familia de poros, pero también por su orientación y conectividad, además de otros parámetros como la hidrofobicidad. Varios autores observaron que los CC pueden incrementar las tasas de infiltración, lo que en general se atribuye a la actividad de las raíces y biota, que incrementan la porosidad conductora de agua y la conectividad de poros, pudiendo romper capas compactadas (Álvarez et al., 2017; Basche y DeLonge, 2019; Blanco-Canqui et al., 2011; 2015; Chalise et al., 2019). Otros autores reportaron incrementos en la conductividad hidráulica saturada (K_0) en sistemas con CC (Blanco-Canqui et al., 2015; Castiglioni et al., 2016; Keisling et al., 1994; Liesch et al., 2011). La mayoría de los estudios que reportan incrementos en las tasas de infiltración o en la conductividad hidráulica (K) son ensayos de larga duración, con más de 10 años de CC. Otros estudios reportan que no hubo efecto de los CC sobre la infiltración y la K durante los primeros años desde su implementación (Álvarez et al., 2017; Blanco-Canqui et al., 2015; Haruna et al., 2018; Villamil et al., 2006; Waggoner y Denton, 1989). Gabriel et al. (2019) observaron incrementos en la K medida en

profundidad (20-40 y 80-120 cm) en años aislados a partir del tercer año de la implementación de un CC (y ningún efecto en otros años). En un estudio sobre el efecto de los CC en las propiedades hidráulicas durante el primer y segundo año desde su implementación, Bodner et al. (2008) encontraron que los CC produjeron incrementos, ningún efecto o disminuciones en la K, dependiendo del momento del año y de las especies empleadas como CC. Resultados similares fueron reportados por Carof et al. (2007), a los 3 y 4 años desde la introducción del CC. Irmak et al. (2018) observaron que la variación en K_0 entre distintos años fue mayor que la diferencia entre tratamientos (CC y barbecho desnudo), que no resultó significativa. Las propiedades físicas e hidráulicas se ven afectadas por diversos factores como ser los cambios de humedad y temperatura, la acción mecánica de las raíces y las gotas de lluvia, y el tránsito de maquinaria agrícola, resultando extremadamente variables tanto en el espacio como en el tiempo (Jirků et al., 2013; Strudley, 2008). Por lo tanto, es de esperar que los CC tengan un efecto sobre la dinámica temporal en comparación con un barbecho desnudo. Sin embargo, la mayoría de los trabajos analizan el efecto de los CC en un único momento del año. De esto último se desprende la necesidad de estudiar la dinámica temporal de estas propiedades.

Otro aspecto que merece ser estudiado es el efecto de los CC en distintos tipos de suelo. La mayoría de los suelos agrícolas en la Región Pampeana son Molisoles, con texturas que varían de arcilloso a arenoso en un gradiente este-oeste (Rimski-Korsakov et al., 2015; Wilson et al., 2020). Estos suelos, con bajo contenido de arcillas expansivas tienen poca capacidad de reestructuración abiótica, con lo cual su estructura depende fuertemente de la actividad biológica y el contenido de MO (Behrends Kraemer et al., 2019). Entre los Molisoles, los suelos más abundantes son los Argiudoles (Wilson et al., 2020), suelos con mayor proporción de limos y arcillas que generalmente tienen un mayor contenido de COS y mejores propiedades físicas que los suelos de textura más gruesa (Taboada y Álvarez, 2008). Sin embargo, Argiudoles con alto contenido de limos son más susceptibles a sufrir degradación física (Chagas et al., 1994; Taboada et al., 1998) y a desarrollar estructura masiva o laminar (Sasal et al., 2006; 2017). Una vez compactados, estos suelos con altos contenidos de limo tienen una baja capacidad para regenerar el sistema poroso en suelos bajo SD (Sasal et al., 2006). Esto se debe a la abundancia de arcilla illita con baja capacidad de expansión/contracción y a la prevalencia de limos finos, así como al clima templado donde los ciclos de congelamiento/descongelamiento son escasos o inexistentes (Sasal et al., 2006; Taboada y Álvarez, 2008). Entre los suelos de textura más gruesa predominan en la Región Pampeana los Hapludoles, suelos de textura superficial franca a franco-arenosa (Díaz-Zorita et al., 2004). Estos suelos tienden a tener estructuras más débiles, pero son también más sensibles al contenido de MO, mostrando mejoras mayores en la CFS cuando se adopta la SD (Basche y DeLonge, 2019; Behrends Kraemer et al., 2019; Díaz-Zorita et al., 2004; Lozano et al., 2013; Taboada et al., 1998) y por lo tanto podrían verse más beneficiados por la inclusión de CC que suelos más finos (Blanco-Canqui et al., 2015).

Los CC pueden resultar útiles para mejorar la CFS en suelos degradados por años de agricultura continua en SD, gracias al efecto de la cobertura, las raíces y la biota asociada, especialmente en suelos con baja capacidad de reestructuración

abiótica. El efecto de los CC en la CFS va a depender de múltiples factores, incluyendo el clima, la textura del suelo y las prácticas de manejo (Blanco-Canqui et al., 2015). El estudio del efecto de los CC sobre la CFS en suelos de diferente textura, en diferentes secuencias de cultivo y en distintas escalas temporales puede arrojar información valiosa para un mejor entendimiento del efecto de esta práctica.

3.2. HIPÓTESIS

1- Los CC en sistemas bajo SD generan una mejora en la CFS, siendo este efecto más evidente en los indicadores dinámicos que en los estáticos, y en suelos de textura fina que en suelos de textura más gruesa.

3.3. OBJETIVOS

Evaluar el efecto de los CC sobre la CFS y su variabilidad temporal, en relación al barbecho desnudo, en suelos característicos de la Región Pampeana bajo SD.

3.4. MARCO TEÓRICO

3.4.1. Fertilidad física del suelo

La CFS se refiere a la capacidad del suelo para transmitir y almacenar fluidos de manera adecuada para el crecimiento de las plantas (Topp et al., 1997). El suelo es un cuerpo poroso compuesto de tres fases, una fase sólida (la matriz del suelo, compuesta a su vez por una fracción mineral y otra orgánica), una líquida (la solución edáfica, a la que comúnmente nos referimos como “agua del suelo”) y una gaseosa (el aire del suelo) (Hillel, 1998). De la interrelación entre estas tres fases surge la capacidad del suelo de sustentar la vida de las plantas. Esto es posible gracias a la existencia de una estructura, donde las partículas sólidas se encuentran distribuidas en arreglos tales que dejan espacios libres o poros (Taboada y Álvarez, 2008). Este sistema poroso le brinda al suelo la capacidad para transportar y almacenar agua y aire, manteniendo un ambiente propicio para la biota del suelo y el crecimiento de las plantas, permite la exploración por parte de las raíces, además de cumplir dos importantes servicios ecosistémicos de los suelos: regular el ciclo hidrológico a escala local y regional y actuar como filtro, purificando el agua que recarga las napas (Hillel, 1998). La fertilidad física y la fertilidad química están íntimamente ligadas, ya que propiedades físicas adecuadas van a permitir el desarrollo vegetal y el aprovechamiento de nutrientes, que a la larga redundan en mayores ingresos de MO, a la vez que la MO juega un papel fundamental en la generación de estructura y estabilidad estructural (Taboada y Álvarez, 2008). El estudio de las propiedades hidráulicas tiene entonces dos componentes principales: el estudio del agua en el

suelo en estado de equilibrio (cuando no existe flujo de agua, y del que deriva el estudio de la DTPO), y el estudio del movimiento del agua en el suelo (que puede darse cuando el suelo se encuentra saturado o no saturado). Tanto el movimiento del agua en el suelo como su retención van a estar determinados por la energía relativa que posea el agua en el suelo en distintas condiciones (Kutilek y Nielsen, 1994).

3.4.2. Energía del agua en el suelo

El movimiento del agua en el suelo y su disponibilidad para las plantas están gobernadas por una serie compleja de interacciones entre la solución edáfica y la matriz del suelo, así como por fuerzas externas que actúan sobre la masa de agua, como la fuerza gravitatoria, la presión de la misma columna de agua y la atmósfera. Así, dependiendo del sitio y de las condiciones en las que se encuentre, el agua del suelo va a exhibir un comportamiento distinto según la fuerza con la que se encuentre retenida en ese estado. Se entiende como potencial hidráulico (ψ_H) al estado energético del agua en el suelo en un punto determinado, producto de las fuerzas a las que está sometida (Hillel, 1998). El ψ_H puede pensarse como la suma de diferentes potenciales, causados por las distintas fuerzas que actúan sobre el agua del suelo, modificando su energía libre (ecuación 3.1). Se puede definir entonces un potencial gravitacional (ψ_G), producto de la fuerza de gravedad y dependiente de la posición relativa, un potencial de presión (ψ_P), producido por el peso del aire y de la columna de agua suprayacente a un determinado elemento de agua, un potencial osmótico (ψ_O), debido a la presencia de solutos, y un potencial mátrico (ψ_M), resultante de las fuerzas de atracción (fuerzas de capilaridad y de adsorción) entre el agua y la matriz del suelo (Hillel, 1998; Koorevaar et al., 1983).

$$\psi_H = \psi_G + \psi_P + \psi_M + \psi_O \quad (3.1)$$

El ψ_H puede expresarse por unidad de masa, de volumen, o de peso de agua. Cuando se expresa por unidad de masa de agua, las unidades de ψ_H son [L^2T^{-2}]; si la energía está expresada por unidad de volumen de agua, la dimensión del potencial coincide con la de presión, y es [$ML^{-1}T^{-2}$]; y si es expresado por unidad de peso, la dimensión del potencial es lineal [L] (Kutilek y Nielsen, 1994).

La división del ψ_H en distintos componentes nos permite visualizar de qué va a depender cada una de las fuerzas que actúan sobre un elemento de agua y obtener expresiones para su estimación. Así, el componente gravitacional depende de la elevación que tenga un determinado elemento de agua respecto de un nivel de referencia arbitrario, el ψ_P de la presión ejercida sobre un punto por la columna de aire y agua que quede por encima de ese punto, y el ψ_O es debido a la presencia de solutos. El ψ_M depende de las fuerzas de interacción entre la matriz y el agua del suelo, que disminuyen la energía libre del agua en el suelo respecto del agua libre en la superficie. La importancia relativa de los diferentes componentes del ψ_H varía con el contenido de humedad. El ψ_M , que tiene un rol principal en estado de no saturación

dónde existe una interfaz suelo-aire-agua, desaparece en estado de saturación. El ψ_0 , por su parte, puede ser despreciado en suelos no salinos (Hillel, 1998).

De lo anterior se desprende que, si uno toma una muestra de suelo y la somete a determinada presión o succión, se generará un flujo de agua hacia dentro o fuera de la muestra, hasta alcanzar un equilibrio. Si partimos de una muestra saturada, y vamos generando distintas tensiones (h), la muestra de suelo tendrá diferentes contenidos de humedad (θ), y la representación gráfica de la relación entre estas dos variables se conoce como curva de retención hídrica (CRH) (Figura 3.1). Sin embargo, el θ a determinada h no va a ser el mismo si la curva se obtiene durante el proceso de secado o de humedecimiento del suelo, fenómeno que se conoce como histéresis. En general se considera que la CRH de un suelo es la que caracteriza el proceso de secado monótono, que es la que comúnmente se determina en laboratorio. Como depende de las fuerzas de interacción entre el agua del suelo y la matriz (fuerzas de adsorción y fuerzas capilares), la CRH va a depender de la composición del suelo y de la configuración del sistema poroso, y va a ser única para cada suelo.

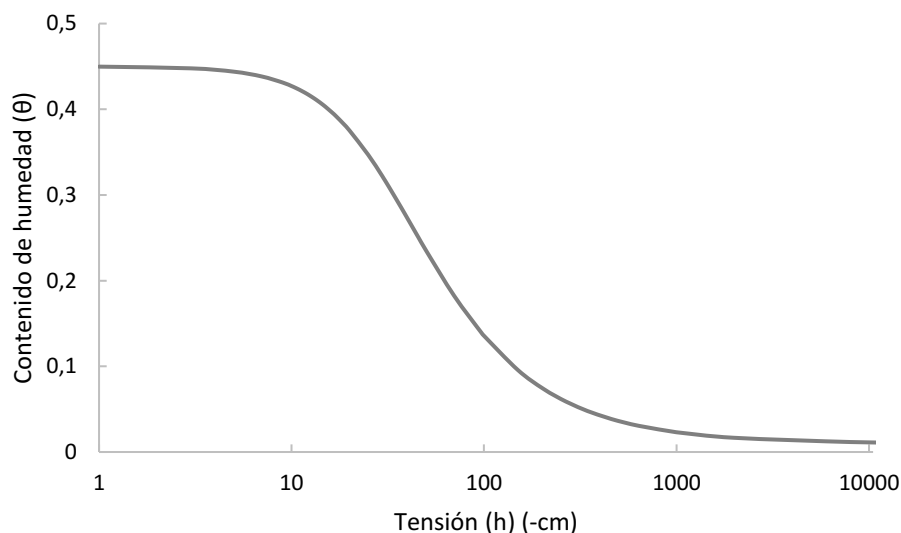


Figura 3.1. Contenido de humedad (θ) en función de la tensión (h).

La CRH puede obtenerse en laboratorio aplicando distintas tensiones o presiones, o bien mediante el uso de tensiómetros, y de algún instrumento para medir humedad a campo o en laboratorio. Diversas ecuaciones empíricas fueron propuestas para ajustar los pares de datos de potencial y humedad obtenidos en la determinación de la CRH. Una ecuación muy utilizada porque permite ajustar los datos en un rango amplio de h es la ecuación de van Genuchten (1980):

$$\theta_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (3.2)$$

donde θ_e es la saturación efectiva, $\theta(h)$ el contenido de humedad a una tensión dada h , θ_s el contenido de humedad a saturación y θ_r el contenido de humedad

residual. α , n y m son parámetros empíricos, y los parámetros θ_s y θ_r se obtienen por ajuste. De la ecuación anterior puede despejarse $\theta(h)$ como:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \theta_e = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (3.3)$$

Con el objetivo de describir y cuantificar el espacio poroso del suelo, puede considerarse que el agua liberada del suelo al aplicar una diferencia de potencial se encontraba retenida producto de las fuerzas de capilaridad ejercidas por los poros de la matriz. A modo de simplificación, se puede considerar a la red de espacios de forma y tamaño variables que constituyen el sistema poroso como un conjunto interconectado de tubos de sección circular homogénea de distinto tamaño. Entonces podemos considerar a los poros que ejercen cierta succión como poros con un radio equivalente al de un tubo capilar que generaría esa misma fuerza capilar (Kutilek y Nielsen, 1994), lo que nos permite caracterizar el sistema poroso según una DTPO equivalente. La succión y el radio de poro equivalente pueden relacionarse entonces mediante la ecuación de ascenso capilar (ecuación 3.4):

$$r = \frac{2\sigma \cos(\alpha)}{\rho g h} \quad (3.4)$$

donde r [L] es el radio de poro máximo que se encuentra lleno de agua para una determinada succión h [L], σ es la tensión superficial del agua [MT^{-2}], α es el ángulo de contacto entre el agua y la pared del poro y se asume igual a cero, ρ es la densidad del agua [ML^{-3}], y g es la aceleración debida a la gravedad [LT^{-2}]. Se asume que, a una tensión h , los poros con radio equivalente menor al calculado con la ecuación 3.4 están llenos de agua, y los poros mayores drenaron y se encuentran vacíos.

A partir de la CRH pueden determinarse distintos parámetros de almacenaje de agua y aire, cómo ser capacidad de aire (AC) como el θ entre 0 y 100 cm de h , el ADP como el θ entre 100 y 15000 cm de h , y FC como el θ a $h = 340$ cm (Reynolds et al., 2009).

3.4.3. Movimiento de agua en el suelo

El estudio de la CRH y la DTPO abordada en la sección anterior se hace a partir de distintos estados de equilibrio, donde toda el agua del volumen de suelo estudiado se encuentra a un mismo potencial. Los sistemas naturales, sin embargo, rara vez permanecen en estado de equilibrio, ya que tanto la humedad como el ψ_H varían en el espacio y en el tiempo a medida que el suelo se humedece o se seca (Hillel, 1998). Cuando existe una diferencia de ψ_H entre distintos puntos se produce un flujo de agua, de lugares de mayor a lugares de menor potencial, hasta que se alcanza (o camino a) un nuevo estado de equilibrio (Hillel, 1998). En la mayoría de los suelos, dada la estrechez de los poros y la velocidad relativamente baja del flujo, se puede decir que prevalece el flujo laminar. El movimiento del agua en el suelo es un fenómeno complejo, por lo que su estudio suele abordarse a nivel macroscópico o fenomenológico, a partir del movimiento de agua que se observa a través de una

determinada sección de suelo. En condiciones de flujo laminar lineal (en una dirección), el caudal de agua (Q) [L³T⁻¹] resulta proporcional al área (A) a través de la que se mueve el agua, y a la caída de potencial (ΔH) en una distancia dada (L):

$$Q \propto \frac{A \Delta H}{L} \quad (3.5)$$

donde la diferencia de potenciales entre dos puntos se define como $\Delta H = H_s - H_e$, siendo H_e el potencial en la cara de entrada de agua y H_s el potencial en la cara de salida de agua, ambos calculados tomando un mismo punto arbitrario como potencial de referencia. Como el flujo ocurre de manera espontánea en dirección de potencial decreciente, $H_s < H_e$ y ΔH resulta negativo. Al cociente entre la diferencia de potencial, y el largo de la columna considerada $\Delta H/L$ se le da el nombre de gradiente hidráulico, y es considerado la fuerza motriz que genera el movimiento del agua en el suelo (Hillel, 1998).

A partir del Q podemos definir el flujo (q) [LT⁻¹] como el volumen de agua que fluye a través de un área A por unidad de tiempo:

$$q = \frac{Q}{A} \propto \frac{\Delta H}{L} \quad (3.6)$$

A la constante de proporcionalidad entre el gradiente hidráulico y el flujo que este genera se le da el nombre de conductividad hidráulica (K). La K refleja la capacidad del sistema poroso de un determinado suelo para transmitir un fluido, y depende de la configuración del sistema poroso (PT, DTPo, tortuosidad) y del fluido en cuestión. Además, la K varía con el contenido de humedad, y por lo tanto con el potencial del suelo, siendo más correcto expresarla como K(h). La ecuación (3.6) se convierte entonces en la siguiente expresión, conocida como Ley de Darcy para flujo en una dirección en estado estacionario (donde el gradiente hidráulico es constante en cada punto y decrece de manera lineal a lo largo de la columna, y el flujo es constante):

$$q = - K(h) \frac{\Delta H}{L} \quad (3.7)$$

Las unidades de K(h) son [LT⁻¹]. El signo menos indica que el flujo ocurre en sentido de potencial hidráulico decreciente.

El flujo de agua en el suelo puede darse en condiciones de saturación, es decir cuando todo el espacio poroso se encuentra lleno de agua, o como flujo no saturado, encontrándose el volumen de poros parcialmente lleno de agua (Villarreal, 2018). Cuando el suelo está saturado, el efecto del ψ_M desaparece y el ψ_H queda expresado en función de ψ_G y ψ_P . En esas condiciones la conductividad hidráulica se denomina conductividad hidráulica saturada (K_0). En condiciones de flujo no saturado, comienza a expresarse el ψ_M que, como se indicó antes, es producto de la afinidad física entre la matriz y el agua del suelo (fuerzas de adsorción y capilares). Por otra parte, la K(h) disminuye con contenidos decrecientes de humedad. En condiciones de saturación, todos los poros se encuentran llenos y conduciendo agua, de modo que la K es máxima. A medida que los poros se vacían, el flujo se ve circunscripto a los poros que aún contienen agua y a una sección reducida de esos poros (por ejemplo,

a la capa de agua que rodea las partículas). Dado que los primeros poros en vaciarse son los de mayor tamaño, el área conductora de agua se reduce drásticamente (Koorevaar et al., 1983). Además, a medida que los poros se vacían y dejan de conducir, la tortuosidad del camino de los poros conductores y la viscosidad del agua aumentan, lo que acentúa la disminución en $K(h)$ (Hillel, 1998). El estudio del flujo en condiciones de no saturación es de especial importancia, dado que la mayor parte del tiempo los procesos que ocurren en el suelo (por ejemplo, infiltración, absorción de agua por las raíces, transporte de nutrientes y solutos) ocurren a contenidos de agua menores a saturación (Hillel, 1998).

Infiltración

Existen distintas aproximaciones para estudiar las propiedades hidráulicas que determinan el flujo de agua en el suelo (Hillel, 1998). Una de ellas es el estudio del proceso de infiltración, que se refiere al proceso de entrada de agua en el suelo desde la superficie. Este proceso está regulado por el tiempo y la tasa de entrega de agua, el contenido de agua inicial en el suelo, condiciones de superficie, características del perfil del suelo (configuración del sistema poroso, profundidad y capas) y la K . En líneas generales, cuando se entrega agua a un suelo con un contenido de humedad inicial (θ_i), el suelo, que se encuentra a un potencial menor que el agua en la superficie, comienza a captar y transmitir esa agua. Si la tasa de entrega de agua es más baja que la capacidad de infiltración en el suelo, el proceso va a estar controlado por el flujo. En cambio, si la tasa de entrega de agua iguala o supera la tasa de infiltración en el suelo, el proceso va a estar controlado por el suelo, permitiendo el estudio de sus propiedades hidráulicas (Hillel, 1998). En un principio, el suelo a un bajo θ_i al que se le aplica una carga de agua va a exhibir una tasa de infiltración relativamente alta, debida a una gran diferencia de potenciales entre el suelo y el agua libre en la superficie. Sin embargo, la K va a ser baja, dado que el área conductora de agua es baja hasta que los poros más grandes se llenan. A medida que el suelo se humedece, la diferencia de potenciales se vuelve cada vez menor, con lo que la tasa de infiltración disminuye hasta alcanzar un estado estacionario en el que se vuelve constante. A esta tasa de infiltración en estado estacionario se le da el nombre de infiltración básica. En esta condición de estado estacionario, el gradiente de ψ_M en la parte superior del suelo puede considerarse despreciable, y el flujo se debe únicamente al gradiente de ψ_G . Como el gradiente de ψ_G es unitario, la expresión de la ecuación de Darcy muestra que en estas condiciones el flujo tiende a ser numéricamente igual a la K :

$$q = -K(h) \frac{dH}{dL} \approx -K(h) \quad (3.8)$$

La infiltración puede estudiarse tanto a campo como en laboratorio, a partir de distintos set-ups que entregan agua al suelo como infiltrómetros de simple y doble anillo, infiltrómetros de disco o infiltrómetros de lluvia. Los infiltrómetros de disco tienen la ventaja de poder entregar agua a una presión sub-atmosférica, lo que permite excluir ciertas familias de poros y estudiar el flujo en condiciones no saturadas cercanas a saturación (Figura 3.2) (Perroux y White, 1988).

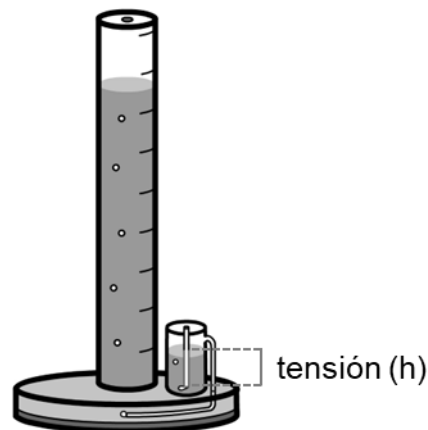


Figura 3.2. Esquema del infiltrómetro de disco a tensión.

Wooding (1968) propuso una expresión algebraica para la infiltración de agua en estado estacionario desde una fuente circular de radio R . Esta ecuación es la base del análisis del flujo estacionario desde un infiltrómetro de disco:

$$Q = \pi R^2 K(h) + 4R\phi(h) \quad (3.9)$$

Donde Q es el volumen infiltrado por unidad de tiempo en el estado estacionario [L^3T^{-1}], R es el radio del disco [L], $K(h)$ es la conductividad hidráulica [LT^{-1}], y $\phi(h)$ es el potencial de flujo mátrico [L^2T^{-1}] para la superficie de infiltración, que es el área debajo de la curva de $K(h)$, definido según la ecuación 3.10 (Gardner, 1958).

$$\Phi(h) = \int_{h_1}^{h_2} K(h) dh \quad (3.10)$$

En la ecuación 3.9 hay dos incógnitas (K y ϕ), y ambas depende de h . Para resolver esta ecuación, Ankeny et al. (1991) propusieron medir la infiltración en un mismo sitio a dos tensiones, obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Q(h_1) = \pi R^2 K(h_1) + 4R\Phi(h_1) \quad (3.11)$$

$$Q(h_2) = \pi R^2 K(h_2) + 4R\Phi(h_2) \quad (3.12)$$

Asumiendo que, si h_1 es cercana a h_2 , $K(h)$ entre esos dos puntos se puede considerar lineal (ver Figura 3.3), entonces la relación entre $K(h)$ y $\phi(h)$ es constante:

$$\frac{K(h)}{\phi(h)} = C \quad (3.13)$$

y

$$K(h_1) = C \phi(h_1) \quad (3.14)$$

$$K(h_2) = C \phi(h_2) \quad (3.15)$$

Por lo tanto, las ecuaciones anteriores pueden escribirse como:

$$Q(h_1) = K(h_1) \left[\pi R^2 + \frac{4R}{c} \right] \quad (3.16)$$

$$Q(h_2) = K(h_2) \left[\pi R^2 + \frac{4R}{c} \right] \quad (3.17)$$

Para resolver estas ecuaciones se propone una aproximación matemática, donde la diferencia entre los ϕ a cada una de las tensiones (las áreas debajo de la curva) se considera igual a la suma del área del rectángulo y el triángulo que se dibujan en la Figura 3.3, siempre considerando que la $K(h)$ es línea entre las dos tensiones consideradas.

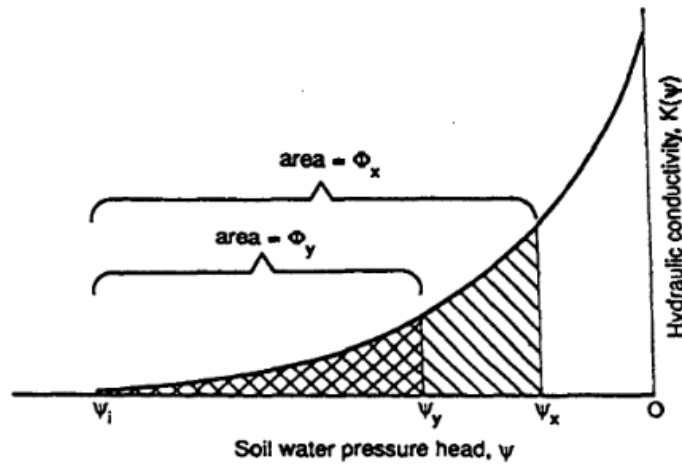


Figura 3.3. Aproximación gráfica al cálculo de las conductividades hidráulicas a dos tensiones.

La diferencia entre los ϕ puede aproximarse entonces según la ecuación 3.18:

$$\phi(h_1) - \phi(h_2) = K(h_2) (h_1 - h_2) + \frac{[K(h_1) - K(h_2)] (h_1 - h_2)}{2} \quad (3.18)$$

sacando $\Delta h = (h_1 - h_2)$ como denominador común se obtiene:

$$\phi(h_1) - \phi(h_2) = \Delta h \frac{K(h_1) + K(h_2)}{2} \quad (3.19)$$

Sustituyendo la ecuación 3.19 con las ecuaciones 3.14 y 3.15:

$$\frac{K(h_1) - K(h_2)}{c} = \Delta h \frac{K(h_1) + K(h_2)}{2} \quad (3.20)$$

De esta manera se obtienen tres ecuaciones (3.16, 3.17 y 3.20) con tres incógnitas ($K(h_1)$, $K(h_2)$ y C), que pueden ser resueltas de manera simultánea mediante pares de medidas de infiltración a distintas h .

Porosidad efectiva

La ecuación de ascenso capilar (ecuación 3.4) permite calcular el máximo radio de poro (r) que se encuentra lleno de agua a una determinada h . Se asume que, a la tensión h , los poros con radio equivalente menor al calculado con la ecuación 3.4

se encuentran llenos de agua y son los únicos responsables de todo el flujo bajo un gradiente de presión. De acuerdo a la ley de Poiseuille, el caudal que pasa a través de un poro está dado por:

$$Q_i(r) = \frac{\pi r^4 \rho g \Delta L}{8\eta \Delta z} \quad (3.21)$$

Donde $Q_i(r)$ es el caudal [L^3T^{-1}] como función del radio de poro r [L], ρ es la densidad del agua [ML^{-3}], g es la aceleración debida a la gravedad [LT^{-2}], y η es la viscosidad del agua [$ML^{-1}T^{-1}$]. En estado estacionario, se asume que el gradiente $\Delta L/\Delta z$ es igual a 1. La tasa de flujo total a través de poros con radio r ($Q_t(r)$) para un área transversal de suelo A [L^2] es

$$Q_t(r) = K(h)A \quad (3.22)$$

y,

$$Q_t(r) = n(r)Q_i(r) \quad (3.23)$$

donde $n(r)$ es el número de poros efectivos de radio equivalente r , responsables de $Q_t(r)$. La sustitución de las ecuaciones 3.21 y 3.22 dentro de la ecuación 3.23 resulta en:

$$K(h)A = n(r) \frac{\pi r^4 \rho g}{8\eta} \quad (3.24)$$

Considerando $N(r)$, el número de poros efectivos por unidad de área transversal [L^2], para un tamaño de poro r dado por

$$N(r) = \frac{n(r)}{A} \quad (3.25)$$

resulta en

$$N(r) = \frac{8\eta K(h)}{\pi r^4 \rho g} \quad (3.26)$$

La porosidad efectiva $\varepsilon(r)$ asociada con cada tamaño de poro es igual al número de poros efectivos por unidad de área multiplicado por el área transversal de un poro de ese tamaño

$$\varepsilon(r) = N(r)\pi r^2 \quad (3.27)$$

El número de poros efectivos por unidad de área, ΔN , entre los radios a y b ($a < b$) (asumiendo radios de poro igual al mínimo radio de poro en el rango), se define como la diferencia del flujo total de agua o conductividad hidráulica $\Delta K(a, b)$ entre dos cargas de presión correspondientes a los radios de poros a y b (Watson y Luxmoore, 1986):

$$\Delta N(a, b) = \frac{8\eta \Delta K(a, b)}{\pi \rho g a^4} \quad (3.28)$$

Entonces, la porosidad efectiva debida a poros en este rango, $\varepsilon(a, b)$, puede ser calculada como:

$$\varepsilon(a, b) = \Delta N(a, b)\pi a^2 = \frac{8\eta \Delta K(a, b)}{\rho g a^2} \quad (3.29)$$

$\varepsilon(a,b)$ es una estimación de la porosidad efectiva máxima. En la ecuación 3.29 se asume implícitamente un gradiente hidráulico unitario, y estado estacionario (Wahl et al., 2004).

3.5. MATERIALES Y MÉTODOS

3.5.1. Sitios de estudio y tratamientos

Para el estudio del efecto de los CC sobre la CFS se tomaron muestras indisturbadas en cilindros de acero inoxidable y se realizaron medidas de infiltración a campo. Para el estudio del efecto de los CC sobre la CFS en el mediano plazo, se tomaron muestras en el sitio Villegas (VIL) en un momento del año y en el sitio Pergamino (PER) en tres fechas a lo largo de un año. Para el estudio del efecto de los CC sobre la CFS en el corto plazo desde su implementación, se tomaron muestras en los sitios Bellocq y Chascomús a los dos años de iniciados los ensayos (BEL y CHA-B2). Para estudiar el efecto de los CC sobre la dinámica temporal de los parámetros de CFS se tomaron muestras en el sitio Chascomús en cinco fechas durante los dos primeros años del ensayo (CHA_o, CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f y CHA-B2). En la Tabla 3.1 se muestran los valores de Dap para cada uno de los sitios a 4 profundidades.

Tabla 3.1. Valores de densidad aparente (Dap)

		0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-40 cm
VIL	S	1,33 ±0,03	1,22 ±0,04	1,26 ±0,04	1,32 ±0,02
	S _{cc}	1,35 ±0,04	1,30 ±0,07	1,30 ±0,09	1,32 ±0,04
	R	1,36 ±0,06	1,45 ±0,07	1,45 ±0,09	1,46 ±0,07
	R _{cc}	1,31 ±0,07	1,37 ±0,01	1,34 ±0,07	1,3 ±0,1
PER	S	1,24 ±0,08	1,29 ±0,04	1,36 ±0,05	1,37 ±0,06
	S _{cc}	1,20 ±0,03	1,25 ±0,06	1,37 ±0,03	1,33 ±0,04
BEL	M-S	1,44 ±0,05	1,26 ±0,06	1,3 ±0,1	1,32 ±0,01
	v/M-c/S	1,56 ±0,07	1,39 ±0,02	1,4 ±0,1	1,3 ±0,1
	T/S-M	1,5 ±0,1	1,35 ±0,04	1,36 ±0,09	1,35 ±0,04
	T/S-v/M	1,4 ±0,1	1,18 ±0,06	1,28 ±0,04	1,32± 0,08
	S-T/S	1,31 ±0,06	1,26 ±0,06	1,3 ±0,1	1,32 ±0,01
	c/S-T/S	1,55 ±0,08	1,33 ±0,09	1,35 ±0,09	1,3 ±0,1
CHA	M	1,16 ±0,07	1,23 ±0,06	1,27 ±0,04	1,44 ±0,08
	M _{cc}	1,1 ±0,1	1,20 ±0,07	1,29 ±0,07	1,4 ±0,1

Todos los valores se encuentran expresados en g.cm⁻³. VIL = Villegas, PER = Pergamino, BEL = Bellocq, CHA = Chascomús. S = soja, S_{cc} = soja con cultivo de cobertura

(CC), R = rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC, T = trigo, c = centeno, v = vicia, M = maíz, M_{CC} = maíz con CC.

3.5.2. Determinación de infiltración a campo

En cada sitio y en cada fecha de muestreo se midió la infiltración a campo empleando infiltrómetros de disco a tensión de 6,25 cm de radio (Perroux y White, 1988). Para cada tratamiento se realizaron cuatro réplicas en sitios seleccionados al azar, evitando huellas visibles. Para asegurar un buen contacto hidráulico entre el infiltrómetro y el suelo, se distribuyó una fina capa de arena seca sobre el sitio. Las medidas fueron realizadas a tres tensiones de entrega de agua (h): 6 cm, 3 cm y 0 cm, aplicadas en un mismo sitio y en ese orden. El monitoreo del flujo se realizó cada 5 minutos hasta alcanzar los 30 minutos, y luego cada 10 minutos hasta alcanzar flujo estacionario (lo que en todos los casos ocurrió dentro de la hora de medición).

A partir de los datos de infiltración a campo, se calcularon los siguientes indicadores dinámicos de CFS:

Cálculo de la conductividad hidráulica

A partir de los datos de infiltración a campo, se calculó la conductividad hidráulica a h = 6, 3 y 0 cm (K₆, K₃, y K₀, respectivamente) usando el método de las cargas múltiples (Ankeny et al., 1991).

Cálculo de la porosidad efectiva

La macro y la mesoporosidades conductoras de agua o efectivas, se calcularon según Watson y Luxmoore (1986) (ecuaciones 3.30 y 3.31):

$$\varepsilon_{ma} = \frac{8\eta(K_0 - K_3)}{\rho g (r_{ma})^2} \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_{me} = \frac{8\eta(K_3 - K_6)}{\rho g (r_{me})^2} \quad (3.31)$$

donde η es la viscosidad del agua [ML⁻¹T⁻¹], ρ es la densidad del agua [ML⁻³], g es la aceleración debida a la gravedad [LT⁻²], y r es el límite inferior del rango de radio de poro equivalente considerado para esa familia de poros. Se definió macroporosidad efectiva (ε_{ma}) como aquella correspondiente a poros que drenan a h entre 0 y 3 cm ($r_{ma} > 0,5$ mm), y mesoporosidad efectiva (ε_{me}) a los que drenan a h entre 3 y 6 cm ($r_{me} = 0,25$ mm) (Lozano, 2014).

Cálculo de los índices de conectividad de poros

A partir de los valores de K a campo se determinaron los índices de conectividad de poros (C_w) según Lozano et al. (2013). Para cada familia de poros con radio entre a y b ($r_b > r_a$), se calcula el C_w según la ecuación 3.32:

$$C_{w[r_a-r_b]} = \frac{K(h_b) - K(h_a)}{\theta(h_b) - \theta(h_a)} \quad (3.32)$$

donde h_b y h_a son las tensiones correspondientes a las cuales los poros con radio equivalente mayor a r_b y r_a , respectivamente, drenan, y $\theta(h_b)$ y $\theta(h_a)$ el contenido de humedad a esa tensión, obtenida de la CRH (sección 3.5.3.). Se determinó el C_w para la porosidad total (C_{wPT}), para la macroporosidad grande ($r > 0,50$ mm, C_{wma}) y para la mesoporosidad ($0,50 < r < 0,25$ mm, C_{wme}).

3.5.3. Determinaciones en laboratorio

Densidad aparente

Se determinó la D_{ap} a partir del peso de muestras de suelo tomadas con cilindros de acero inoxidable de volumen conocido (7,5 cm de diámetro interno y 10 cm de altura) secadas en estufa a 105°C hasta peso constante. Se calculó la densidad aparente según Hillel (1998) y la PT como:

$$PT = 1 - D_{ap}/D_{real} \quad (3.33)$$

donde D_{real} es la densidad de la fase sólida del suelo, medida por picnometría (2,34 g.cm⁻³ para CHA, 2,55 g.cm⁻³ para PER, 2,41 g.cm⁻³ para VIL y 2,55 g.cm⁻³ para BEL).

Curva de retención hídrica y distribución de tamaño de poros

Para determinar la CRH se tomaron muestras no disturbadas de suelo con cilindros de acero inoxidable de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura, de los primeros 5 cm del suelo, cerca de los sitios donde se hicieron las corridas de infiltración y evitando huellas visibles (10 réplicas). Dichas muestras fueron saturadas con agua y sometidas a distintas tensiones (0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m y 1 m en mesa de tensión, y 3 m y 50 m en olla de Richard). Los datos obtenidos se ajustaron con el modelo de van Genuchten (1980) usando el RETC (van Genuchten et al., 1991) para calcular la macroporosidad (θ_{ma} , contenido de poros con radio equivalente $r_{eq} > 30$ μ m), la mesoporosidad (θ_{me} , $r_{eq} = [15-30]$ μ m) y la microporosidad (θ_{mi} , $r_{eq} < 15$ μ m). Además, a partir de los valores de la CRH ajustada se calcularon los siguientes indicadores de almacenaje: capacidad de aire (AC) como el θ entre [0-100 cm] de h , agua disponible para la planta (ADP) como el θ entre [100-15000 cm] de h , y capacidad de campo (FC) como el θ a $h = 340$ cm (Reynolds et al., 2009). Los datos de retención hídrica se ajustaron con el modelo de van Genuchten (1980), según la ecuación 3.3.

3.5.4. Análisis estadístico

En cada sitio se realizaron test de ANAVA para determinar el efecto de los factores y de la interacción entre factores sobre las variables estudiadas (Dap, PT, θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , AC, ADP, FC, K_0 , K_3 , K_6 , ε_{ma} , ε_{me} , CWPT, CW_{ma} y CW_{me}). Las variables K_0 , K_3 , K_6 , ε_{ma} , ε_{me} , CWPT, CW_{ma} y CW_{me} fueron transformadas a sus valores logarítmicos para lograr normalidad. Para VIL, se realizó un ANAVA bifactorial con el cultivo principal (con 2 niveles: soja y rotación) y la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factores. Para PER, se realizó un ANAVA bifactorial con la fecha (con 3 niveles: PER-CP_o, PER-CP_f y PER-B_f) y la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factores. Para BEL, se realizó un ANAVA bifactorial con el cultivo principal (con 3 niveles: maíz-soja, trigo/soja-maíz y soja-trigo/soja) y la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factores. En CHA, para analizar el efecto acumulado de dos años de CC se realizó un ANAVA unifactorial en CHA-B2, con la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factor. Para evaluar la variabilidad temporal en CHA, se realizó un ANAVA bifactorial con la fecha (con 5 niveles: CHA_o, CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f, CHA-B2) y la presencia de CC (con 2 niveles: sin CC y con CC) como factores. Los valores fueron expresados como la media \pm el desvío estándar. Los resultados de los ANAVA se detallan en el Anexo II. En todos los casos, si existió interacción entre los factores se analizaron los datos generando una nueva variable a partir de los dos factores. Las medias fueron comparadas usando el test de Fisher LSD 50, con nivel de significancia de 0,05 (Sokal y Rohlf, 1995), y la presencia de diferencias significativas se indicó usando letras diferentes. Todos los análisis se realizaron usando el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2008).

3.6. RESULTADOS

3.6.1. Efecto a largo plazo de los cultivos de cobertura sobre indicadores de calidad física en dos suelos de diferente textura

Villegas

En el Anexo II – Tabla I se muestran los resultados del ANAVA para los distintos sitios. En VIL, de los indicadores estáticos de CFS, θ_{me} presentó efectos independientes de los factores (presencia de CC y cultivo principal), el ADP presentó interacción entre los factores, y FC presentó efecto de la presencia de CC. El resto de los indicadores estáticos de CFS (Dap, PT, θ_{ma} , θ_{mi} , AC) no presentaron efectos significativos de la interacción ni de ninguno de los factores estudiados. En cuanto a los indicadores dinámicos de CFS, K_6 presentó efectos independientes de los factores presencia de CC y cultivo principal, CW_{me} presentó interacción entre los factores estudiados, y los demás indicadores dinámicos de CFS (K_0 , K_3 , ε_{ma} , ε_{me} , CWPT y CW_{ma}) no presentaron efectos significativos de la interacción ni de ninguno de los factores estudiados.

En la figura 3.4 se muestran los valores de θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} y PT. La única fracción de poros afectada por las prácticas de manejo fue θ_{me} , que resultó mayor en sistemas sin CC, y fue mayor para los sistemas con soja como cultivo principal (S y S_{cc}) que en aquellos bajo rotación soja-maíz (R y R_{cc}).

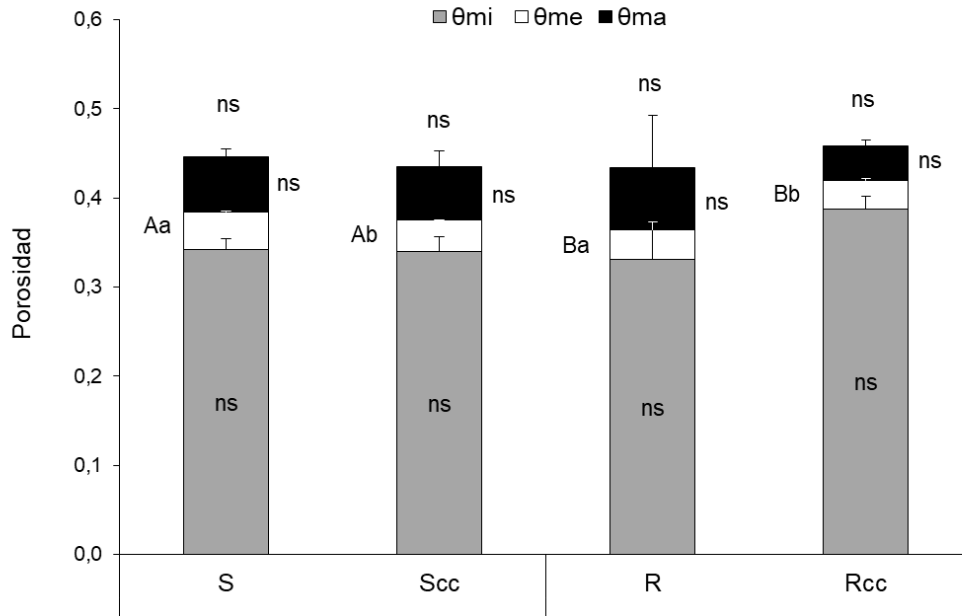


Figura 3.4. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) en el sitio Villegas (VIL). S = soja, S_{cc} = soja con cultivo de cobertura (CC), R = rotación soja-maíz, R_{cc} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma familia de poros, letras mayúsculas indican el efecto del cultivo principal, y letras minúsculas el efecto del CC, cuando hubo efectos independientes de los factores (p -valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos. Las letras encima de las barras corresponden a la PT.

En la tabla 3.2 se muestran los valores de Dap y de los indicadores de almacenaje derivados de la CRH. El ADP siguió el orden S=R_{cc} > R=S_{cc}, mientras que FC fue significativamente mayor en lotes con CC.

Tabla 3.2. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente en Villegas (VIL).

	Dap (g.cm ⁻³)	AC	ADP	FC
S	1,33 ±0,03	0,10 ±0,01	0,26 ±0,02 a	0,25 ±0,01 B
S_{cc}	1,35 ±0,04	0,09 ±0,02	0,22 ±0,02 b	0,27 ±0,01 A
R	1,36 ±0,06	0,10 ±0,07	0,22 ±0,04 b	0,26 ±0,06 B
R_{cc}	1,31 ±0,07	0,07 ±0,01	0,26 ±0,02 a	0,31 ±0,01 A

Dap = densidad aparente, AC = capacidad de aire, ADP = agua disponible para la planta, FC = capacidad de campo. S = soja, S_{cc} = soja con cultivo de cobertura (CC), R =

rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma variable, letras mayúsculas distintas indican el efecto de la presencia de CC, y letras minúsculas el efecto del factor cultivo principal*CC (p -valor < 0,05). La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

En cuanto a los indicadores dinámicos de CFS, la K_0 y K_3 no se vieron afectadas por las prácticas de manejo evaluadas (Figura 3.5). K_6 , por el contrario, fue mayor en sistemas con CC (independientemente de cuál fuera el cultivo principal), y fue mayor en la rotación soja-maíz que en el cultivo de soja (independientemente de la presencia de CC). ϵ_{ma} y ϵ_{me} no presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 3.6). De los índices de conectividad, el único afectado por los tratamientos fue el índice de conectividad de mesoporos, que resultó $S=R_{CC} > R=S_{CC}$ (Tabla 3.3).

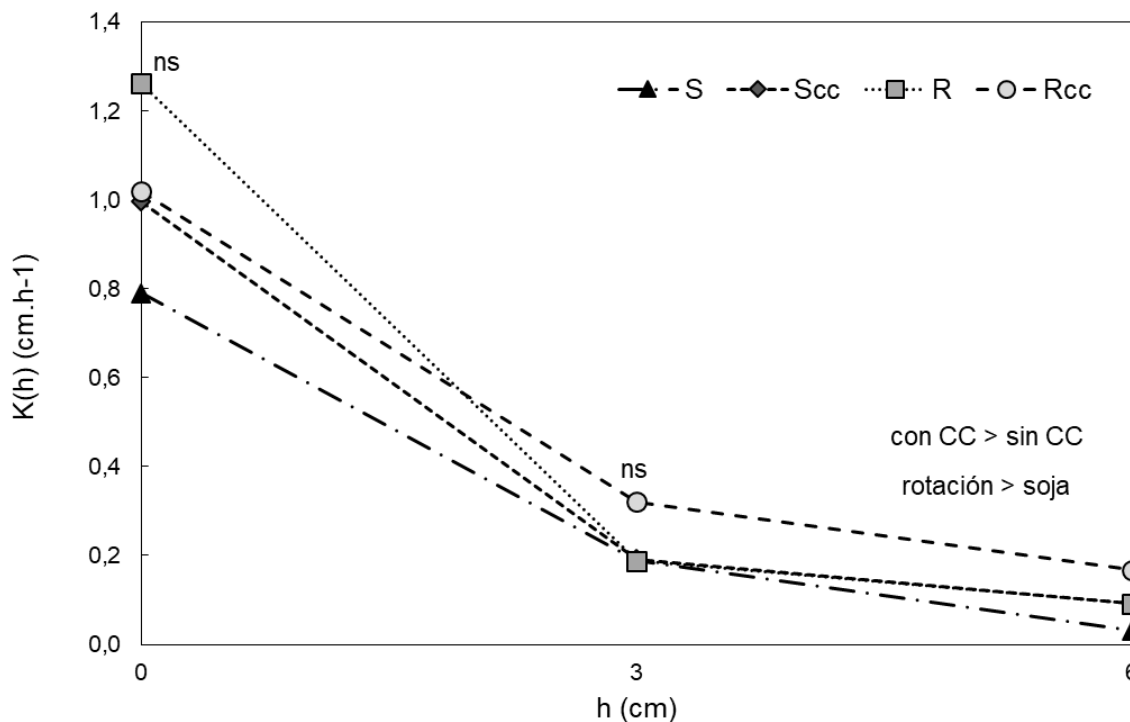


Figura 3.5. Conductividad hidráulica a 0, 3 y 6 cm de tensión (K_0 , K_3 y K_6 , respectivamente) en el sitio Villegas (VIL). S = soja, S_{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC), R = rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma tensión, ns indica que no hubo diferencias significativas (p -valor > 0,05).

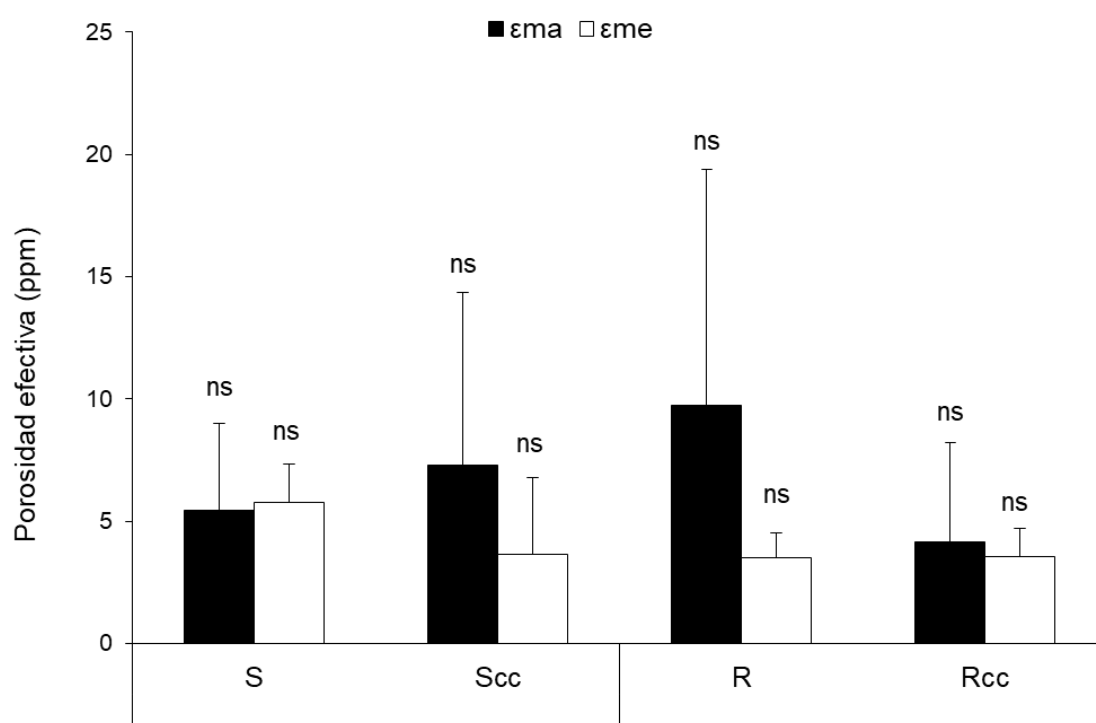


Figura 3.6. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) en Villegas (VIL). S = soja, S_{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC), R = rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma variable ns indica que no hubo diferencias significativas (p-valor > 0,05).

Tabla 3.3. Índices de conectividad para la porosidad total (CW_{PT}), la macroporosidad (CW_{ma}) y la mesoporosidad (CW_{me}) en Villegas (VIL).

	CW_{PT}	CW_{ma}	CW_{me}
S	1,8 ±0,8	320 ±208	46 ±13 a
Scc	2 ±2	306 ±296	23 ±20 b
R	3 ±3	264 ±261	15 ± 4 b
Rcc	2 ±2	615 ±618	75 ± 26 a

S = soja, S_{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC), R = rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma variable, letras distintas indican el efecto del factor cultivo principal*CC (p-valor < 0,05). La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

Pergamino

En PER, de los indicadores estáticos de CFS, la Dap y la PT no se vieron afectadas por la fecha ni por la presencia de CC, mientras que θ_{ma} , θ_{mi} y AC presentaron efecto de la fecha, y θ_{me} , ADP y FC presentaron efectos independientes de los factores estudiados (Anexo II - Tabla I). De los indicadores dinámicos de CFS, K_0 no presentó efecto de la fecha, ni de la presencia de CC, ni de la interacción, el K_3

se vio afectado por la presencia de CC y el K_6 presentó efecto de la interacción. El ϵ_{ma} presentó efecto de la fecha, mientras que el ϵ_{me} no se vio afectado por ninguno de los factores estudiados ni por su interacción. El Cw_{PT} no presentó efecto de los factores estudiados ni de su interacción, el Cw_{ma} presentó efecto de la fecha y el Cw_{me} presentó efectos independientes de la fecha y de la presencia de CC.

En la figura 3.7 se muestran los valores de θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} y PT, en las tres fechas evaluadas: al inicio del cultivo principal (PER-CP_o), el final del cultivo de soja (PER-CP_f) y hacia el final del barbecho (PER-B_f). Las tres familias de poros mostraron tendencias temporales distintas. Los valores de θ_{ma} fueron menores en PER-CP_o, aumentaron en PER-CP_f, y volvieron a disminuir en PER-B_f (hasta valores intermedios entre las otras dos fechas). En las otras dos fracciones mostraron la tendencia opuesta, resultando PER-CP_o = PER-B_f > PER-CP_f para θ_{me} y PER-CP_o > PER-B_f > PER-CP_f para θ_{mi} . θ_{me} , por otra parte, fue la única familia de poros afectada por la presencia de CC, resultando mayor en S que en S_{CC} en todas las fechas evaluadas. La PT (suma de las barras apiladas), así como la Dap, no mostraron diferencias significativas entre fechas ni entre tratamientos.

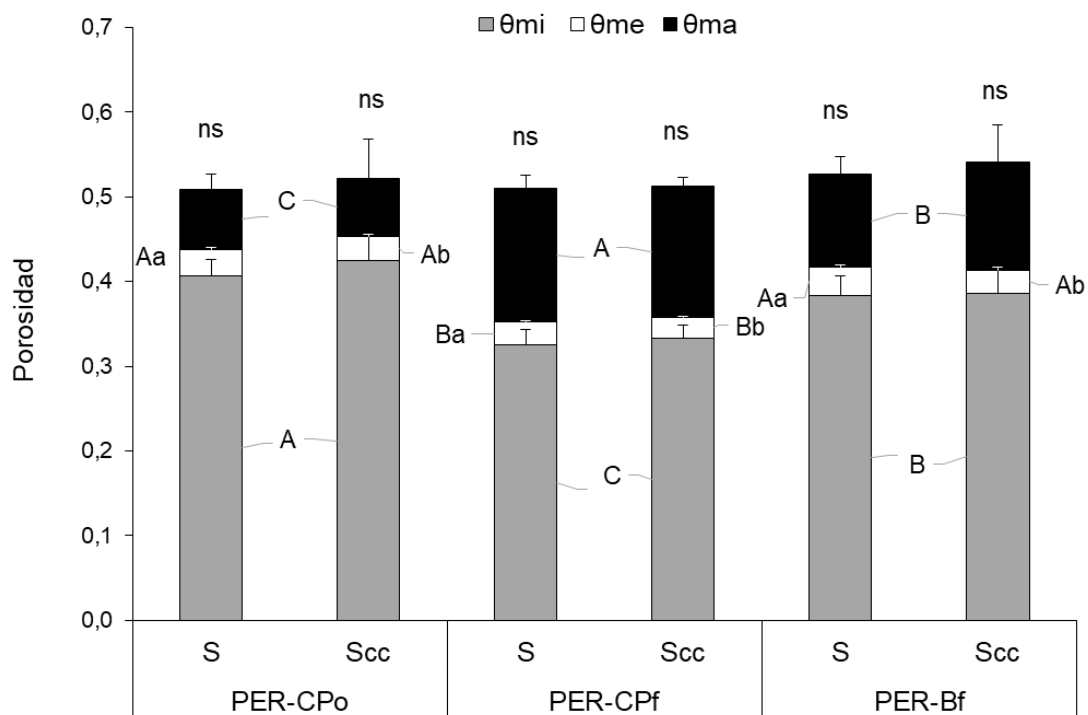


Figura 3.7. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) en el sitio Pergamino (PER). S = soja, S_{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC). Para una misma familia de poros, letras mayúsculas indican el efecto del cultivo principal, y letras minúsculas el efecto del CC (p -valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos. Las letras encima de las barras corresponden a la PT.

En cuanto a los indicadores de almacenaje de agua (Tabla 3.4), todos mostraron diferencias entre fechas, y ADP y FC se vieron afectadas además por las prácticas de manejo. AC fue mínimo en PER-CP_o, aumentó hasta alcanzar un máximo en PER-CP_f y disminuyó en PER-B_f hasta un valor intermedio entre las otras dos fechas. El ADP y FC mostraron el orden inverso a AC (PER-CP_o > PER-B_f > PER-CP_f). Además, el ADP fue mayor en S que en S_{cc}, mientras que FC fue mayor en S_{cc} que en S.

Tabla 3.4. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente en Pergamino (PER).

		Dap (g.cm ⁻³)	AC	ADP	FC
PER-CP_o	S	1,24 ±0,08	0,10 ±0,02	0,20 ±0,02 a	0,35 ±0,01 b
			C	A	A
	S _{cc}	1,20 ±0,03	0,10 ±0,04	0,20 ±0,03 b	0,37 ±0,04 a
PER-CP_f	S	1,26 ±0,03	0,19 ±0,02	0,15 ±0,01 a	0,28 ±0,01 b
			A	C	C
	S _{cc}	1,24 ±0,07	0,18 ±0,02	0,14 ±0,01 b	0,29 ±0,01 a
PER-B_f	S	1,21 ±0,01	0,14 ±0,02	0,19 ±0,02 a	0,33 ±0,02 b
			B	B	B
	S _{cc}	1,17 ±0,05	0,16 ±0,04	0,16 ±0,03 b	0,34 ±0,04 a

Dap = densidad aparente, AC = capacidad de aire, ADP = agua disponible para la planta, FC = capacidad de campo. S = soja, S_{cc} = soja con cultivo de cobertura (CC). Para un mismo parámetro, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre fechas (p-valor < 0,05), y letras minúsculas indican el efecto de la presencia de CC. La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

En la figura 3.8 se observan los valores de K₀, K₃ y K₆ para cada una de las fechas estudiadas. La K₀ no se vio afectada por la fecha ni el tratamiento. K₃ resultó mayor en S que en S_{cc}. K₆ mostró comportamientos distintos para las distintas fechas y tratamientos. En S, K₆ disminuyó gradualmente entre la primera y la tercera fecha, con valores intermedios y sin diferencias significativas en la segunda fecha. En S_{cc}, K₆ disminuyó entre PER-CP_o y PER-CP_f, y volvió a aumentar en PER-B_f hasta valores similares a PER-CP_o. Además, en PER-CP_o y PER-CP_f K₆ fue mayor en S que en S_{cc}, mientras que en PER-B_f no hubo diferencias significativas entre tratamientos.

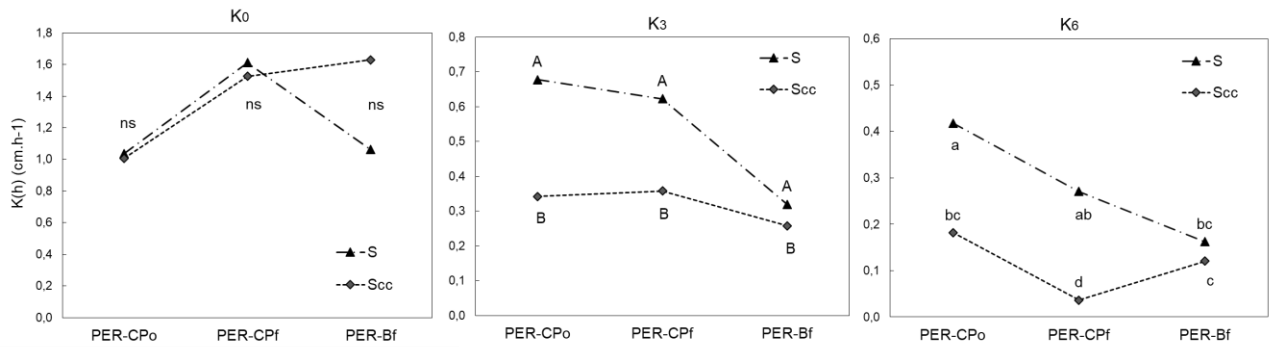


Figura 3.8. Conductividad hidráulica saturada y a 3 y 6 cm de tensión (K_0 , K_3 y K_6 , respectivamente) en el sitio Pergamino (PER). S = soja, S_{CC} = soja con cultivo de cobertura (CC). Para una misma familia de poros, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre fechas y letras minúsculas indican el efecto de la interacción fecha*CC (p -valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.

En cuanto a las porosidades efectivas, ϵ_{ma} fue mayor en PER-CP_f que en PER-CP₀ y mostró valores intermedios (sin diferencias significativas con las otras dos fechas) en PER-B_f (Figura 3.9). ϵ_{me} no presentó diferencias significativas entre fechas ni entre tratamientos. De los índices de conectividad de poros, el CW_{PT} no presentó diferencias significativas entre fechas ni entre tratamientos (Tabla 3.5). El CW_{ma} fue mayor en PER-CP₀ que en PER-CP_f y mostró valores intermedios (sin diferencias significativas con las otras dos fechas) en PER-B_f, y el CW_{me} fue PER-CP₀ > PER-CP_f = PER-B_f. Además, CW_{me} fue mayor en S que en S_{CC}.

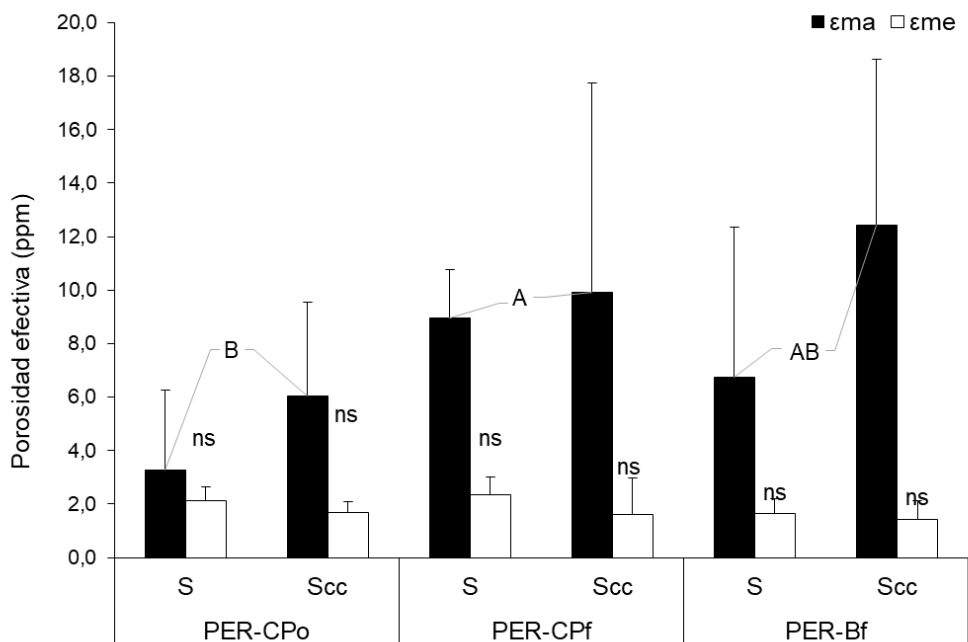


Figura 3.9. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) en Pergamino (PER). S = soja, S_{CC} = soja con cultivo de cobertura

(CC), R = rotación soja-maíz, R_{CC} = rotación soja-maíz con CC. Para una misma variable ns indica que no hubo diferencias significativas (p-valor > 0,05).

Tabla 3.5. Índices de conectividad para la porosidad total (C_{wPT}), la macroporosidad (C_{wma}) y la mesoporosidad (C_{wme}) en Pergamino (PER).

		C _{wPT}	C _{wma}	C _{wme}
PER-CP_o	S	2,0 ±0,8	82 ±76	40 ±21 a
	S _{cc}	1,9 ±0,8	141 ±82	24 ±9 b
PER-CP_f	S	3,3 ±0,7	36 ±7	15 ±11 a
	S _{cc}	3 ±2	40 ±32	13 ±15 b
PER-B_f	S	2 ±2	77 ±65	12 ±6 a
	S _{cc}	3 ±1	77 ±38	7 ±5 b

S = soja, S_{cc} = soja con cultivo de cobertura (CC). Para un mismo parámetro, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre fechas (p-valor < 0,05), y letras minúsculas indican el efecto de la presencia de CC. La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

3.6.2. Efecto a corto plazo de los cultivos de cobertura sobre indicadores de calidad física en dos suelos de diferente textura

Belloco

En BEL se evaluó el efecto de los CC sobre distintas rotaciones de los cultivos principales. La Dap y la PT, θ_{ma} y θ_{me} presentaron efecto de la interacción entre los factores cultivo principal y presencia de CC, y θ_{mi} presentó efectos independientes de los factores estudiados. De los indicadores de almacenaje derivados de la CRH, AC y ADP presentaron efecto de la interacción entre los factores cultivo principal y presencia de CC, mientras que FC presentó efectos independientes de los factores estudiados. De los indicadores dinámicos, K₀, K₆, C_{wPT} y C_{wma} presentaron efecto de la interacción entre los factores cultivo principal y presencia de CC, K₃ presentó efectos independientes de los factores estudiados, C_{wme} y ϵ_{me} no se vieron afectados por ninguno de los factores estudiados ni por su interacción, y ϵ_{ma} presentó efecto del cultivo principal.

En líneas generales se observó que los CC tuvieron efectos diferentes en la PT y la DTPo dependiendo de la rotación del cultivo principal en que se incluyeron, generando incrementos, disminuciones o ningún efecto en las distintas familias de poros. Sin embargo, los CC tendieron a disminuir el contenido de agua a FC en todas las rotaciones, lo que en ocasiones se tradujo en una disminución en el ADP. Los CC

también generaron efectos distintos en la K dependiendo de la secuencia de cultivos en la que se introdujeron, y tendieron a incrementar la CW_{PT} .

La PT siguió el orden $S-T/S > M-S = T/S-v/M > v/M-c/S = c/S-T/S$ y en $T/S-M$ fue menor que en $S-T/S$, sin diferencias significativas con los demás tratamientos (Figura 3.10). θ_{ma} fue menor en $T/S-M$ que en los demás tratamientos. θ_{ma} fue mayor en $S-T/S$ y en $T/S-v/M$ que en $M-S$ y $v/M-c/S$. En $c/S-T/S$ θ_{ma} mostró valores intermedios, sin diferencias significativas con $T/S-v/M$ ni con $M-S$ y $v/M-c/S$. θ_{me} siguió una tendencia similar, siendo mayor en $T/S-v/M$ y $S-T/S$ que en $v/M-c/S$, $T/S-M$ y $c/S-T/S$, y mostró valores intermedios en $M-S$. θ_{mi} fue mayor en la rotación trigo/soja-maíz que en maíz-soja y soja-trigo/soja (independientemente de la presencia de CC). Además, θ_{mi} fue mayor en ausencia de CC.

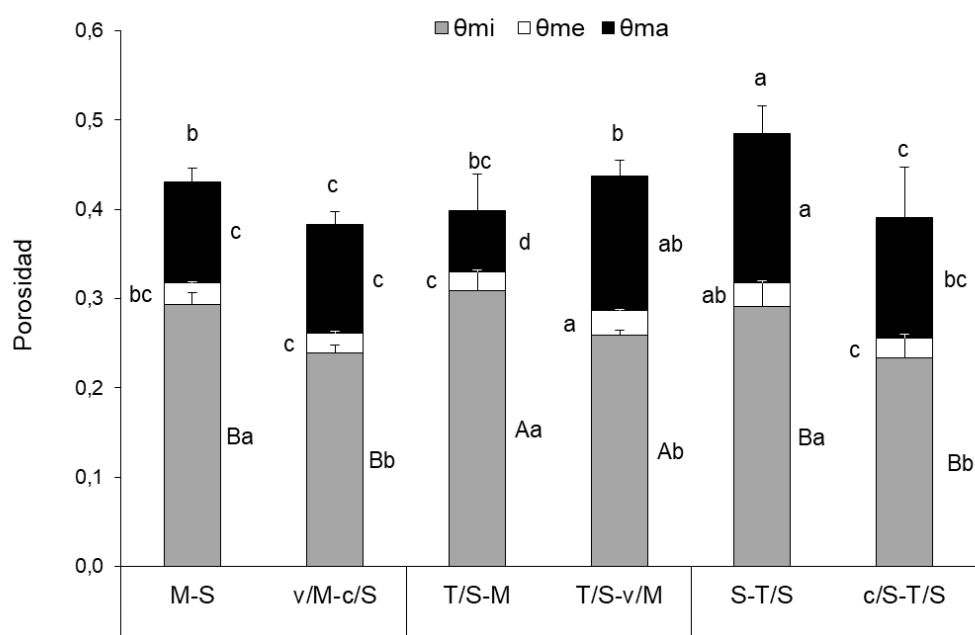


Figura 3.10. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) en el sitio Bellocq (BEL). M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma familia de poros, letras mayúsculas y minúsculas indican los efectos independientes del cultivo principal y de la presencia de cultivo de cobertura (CC), respectivamente, y letras minúsculas indican el efecto del factor cultivo principal*CC (p -valor < 0,05). Las letras encima de las barras corresponden a la PT.

La AC fue $S-T/S > M-S = v/M-c/S > T/S-M$ (Tabla 3.6). En $T/S-v/M$ el ADP fue mayor que en $M-S$, $v/M-c/S$ y $T/S-M$, sin diferencias significativas con $S-T/S$ y $c/S-T/S$, y en $c/S-T/S$ fue menor que en $S-T/S$ y mayor que en $T/S-M$, sin diferencias significativas con los demás tratamientos. El ADP fue mayor en $T/S-v/M$ y menor en $c/S-T/S$, con valores intermedios en los demás tratamientos. El contenido de agua a FC fue mayor en la rotación trigo/soja-maíz que en maíz-soja y soja-trigo/soja (independientemente de la presencia de CC), y fue mayor en los tratamientos sin CC que en aquellos con CC.

Tabla 3.6. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente en Bellocq (BEL).

	Dap (g.cm⁻³)	AC	ADP	FC
M-S	1,44 ±0,05 b	0,14 ±0,01 c	0,133 ±0,008 abc	0,25 ±0,01 a B
v/M-c/S	1,56 ±0,07 a	0,14 ±0,02 c	0,119 ±0,007 bc	0,20 ±0,01 b
T/S-M	1,5 ±0,1 ab	0,09 ±0,04 d	0,13 ±0,02 abc	0,27 ±0,02 a A
T/S-v/M	1,4 ±0,1 b	0,18 ±0,02 ab	0,141 ±0,008 a	0,21 ±0,01 b
S-T/S	1,31 ±0,06 c	0,19 ±0,03 a	0,14 ±0,01 ab	0,25 ±0,01 a B
c/S-T/S	1,55 ±0,08 a	0,16 ±0,06 bc	0,11 ±0,03 c	0,20 ±0,03 b

Dap = densidad aparente, AC = capacidad de aire, ADP = agua disponible para la planta, FC = capacidad de campo. M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para un mismo parámetro, letras mayúsculas y minúsculas indican los efectos independientes del cultivo principal y de la presencia del CC, respectivamente, y letras minúsculas indican el efecto del factor cultivo principal*CC (p-valor < 0,05). La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

La K₀ fue mayor en c/S-T/S y T/S-v/M, seguida por M-S y T/S-M y menor en v/M-c/S (Figura 3.11). En S-T/S la K₀ fue intermedia (y sin diferencias significativas) con M-S, T/S-M y v/M-c/S. La K₃ fue mayor en M-S y c/S-T/S que en S-T/S y T/S-M. En v/M-c/S y T/S-v/M, la K₃ mostró valores intermedios, sin diferencias significativas con los demás tratamientos. La K₆ siguió el orden M-S > c/S-T/S > S-T/S=T/S-M. En v/M-c/S y T/S-v/M, la K₆ fue menor que en M-S, y sin diferencias significativas con los demás tratamientos.

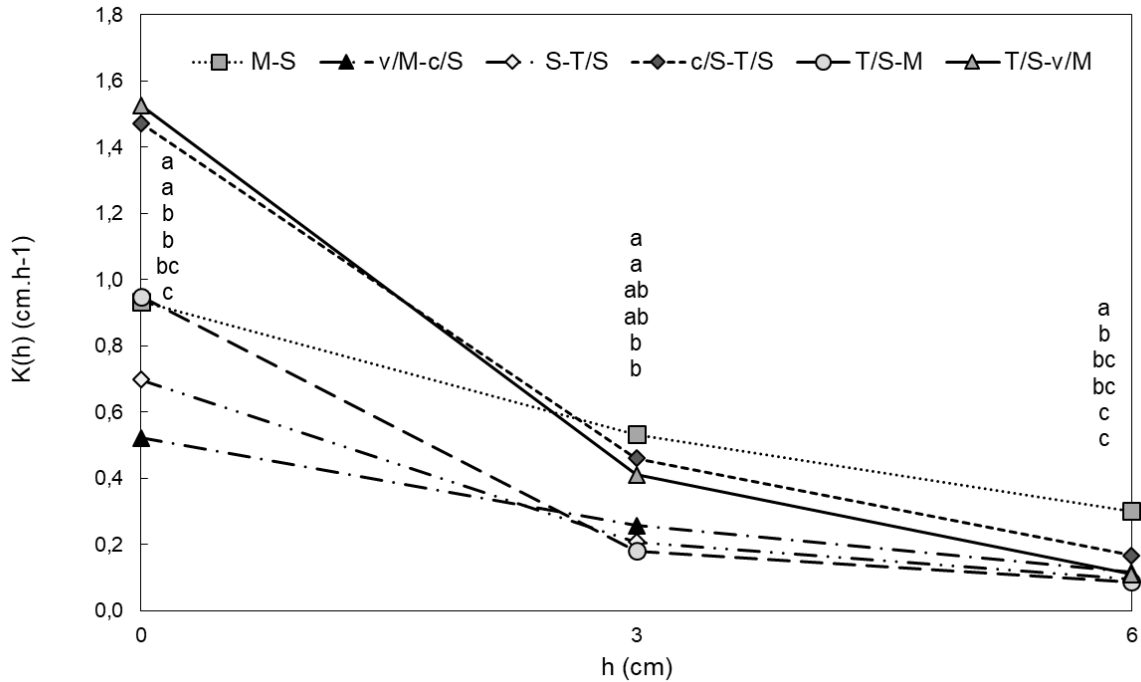


Figura 3.11. Conductividad hidráulica ($K(h)$) a 0, 3 y 6 cm de tensión (h) en el sitio Bellocq (BEL). M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para cada tensión, letras distintas indican diferencias significativas (p -valor < 0,05).

En la figura 3.12 se muestran los valores de las porosidades efectivas. La ϵ_{ma} fue menor para la rotación de maíz-soja como cultivo principal (independientemente de la presencia de CC) y menor para trigo/soja-maíz y soja-trigo/soja, sin diferencias significativas entre estas dos últimas rotaciones. La ϵ_{me} no presentó diferencias significativas entre tratamientos. En cuanto a los índices de conectividad de poros (Tabla 3.7), el CW_{PT} fue mayor para T/S-v/M y c/S-T/S, seguido por T/S-M y M-S, y menor para v/M-c/S y S-T/S (sin diferencias significativas entre estos dos últimos tratamientos y M-S). El CW_{me} no presentó diferencias significativas entre tratamientos.

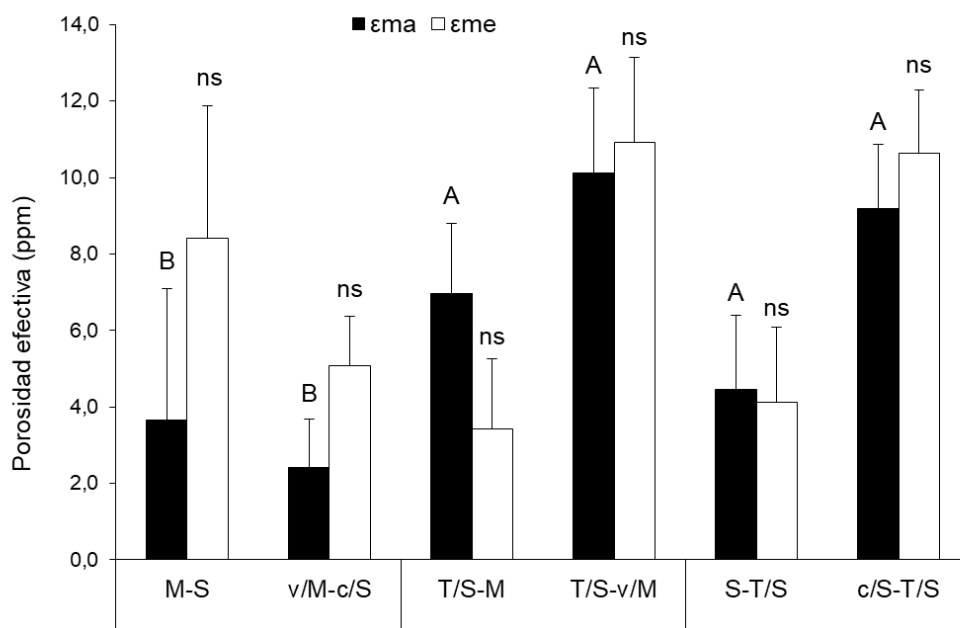


Figura 3.12. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) en Bellocoq (BEL). M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para una misma variable, letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre rotaciones del cultivo principal (p-valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.

Tabla 3.7. Índices de conectividad para la porosidad total (CW_{PT}), la macroporosidad (CW_{ma}) y la mesoporosidad (CW_{me}) en Bellocoq (BEL).

	CW_{PT}	CW_{ma}	CW_{me}
M-S	2 ±1 bc	24 ±23 c	14 ±20
v/M-c/S	1,4 ±0,1 c	14 ±8 c	8 ±5
T/S-M	2,4 ±0,5 b	118 ±31 a	11 ±4
T/S-v/M	4 ±1 a	44 ±10 b	13 ±16
S-T/S	1,5 ±0,4 c	17 ±7 c	4 ±4
c/S-T/S	4 ±1 a	43 ±8 b	14 ±8

M = maíz, S = soja, T = trigo, c = centeno, v = vicia. Para un mismo parámetro, letras minúsculas distintas indican el efecto del factor cultivo principal*CC (p-valor < 0,05). La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

Chascomús

En Chascomús, se evaluó el efecto de los CC tras dos años de iniciada la práctica (fecha CHA-B2). Los resultados del ANAVA se muestran en el Anexo II – Tabla I. Tras dos años de CC, la Dap , PT , θ_{ma} , θ_{mi} , AC , FC , ADP , $\ln(K_0)$, $\ln(CW_{PT})$, $\ln(CW_{ma})$, $\ln(CW_{me})$, $\ln(\epsilon_{ma})$ y $\ln(\epsilon_{me})$ no presentaron diferencias entre tratamientos. De

los indicadores estáticos de CFS, θ_{me} fue el único afectado significativamente por la presencia de CC, resultando $M_{CC} > M$ (Figura 3.13). De los indicadores dinámicos de CFS, $\ln(K_3)$ y $\ln(K_6)$ fueron las únicas variables afectadas por la presencia de los CC, siendo mayores en M_{CC} que en M (Figura 3.14). Los resultados de la D_{ap} y de los demás indicadores estáticos derivados de la CRH se muestran en la tabla 3.7 y los valores de las porosidades efectivas y de los índices de conectividad de poros se muestran en la figura 3.15 y en la tabla 3.8, respectivamente.

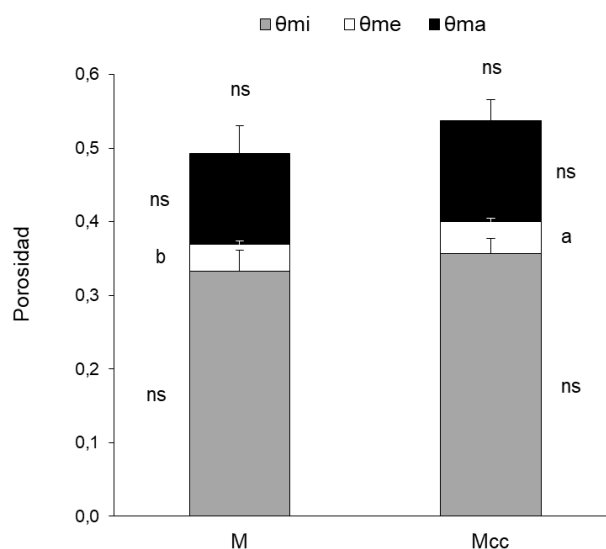


Figura 3.13. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) tras dos años de cultivos de cobertura (CC) en el sitio Chascomús (CHA-B2). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para una misma familia de poros, letras distintas indican diferencias entre tratamientos (p -valor $< 0,05$). ns indica que no hubo diferencias significativas. Las letras encima de las barras corresponden a la PT.

Tabla 3.7. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente tras dos años de CC en el sitio Chascomús (CHA-B2).

		Dap (g.cm ⁻³)	AC	ADP	FC
CHA-B2	M	1,16 ±0,07	0,16 ±0,03	0,13 ±0,02	0,28 ±0,02
	M_{cc}	1,1 ±0,1	0,18 ±0,03	0,14 ±0,01	0,29 ±0,01

Dap = densidad aparente, AC = capacidad de aire, ADP = agua disponible para la planta, FC = capacidad de campo. M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para un mismo parámetro, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (p -valor $< 0,05$), y la ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

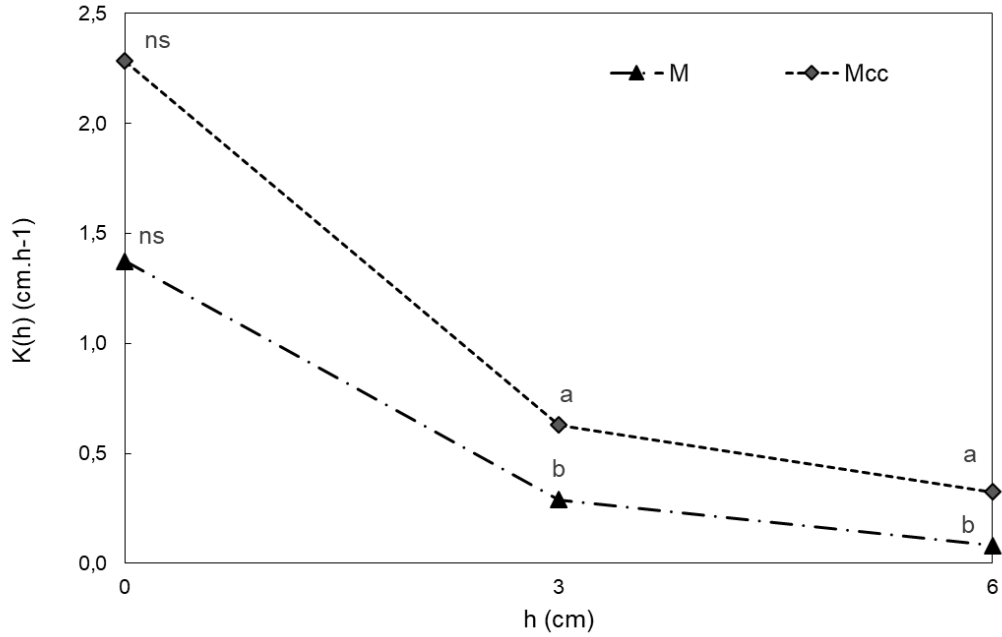


Figura 3.14. Conductividad hidráulica ($K(h)$) a 0, 3 y 6 cm de tensión (h) tras dos años de cultivos de cobertura (CC) en el sitio Chascomús (CHA-B2). M = maíz, Mcc = maíz con cultivo de cobertura. Para cada presión, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (p -valor < 0,05). ns indica que no hubo diferencias significativas.

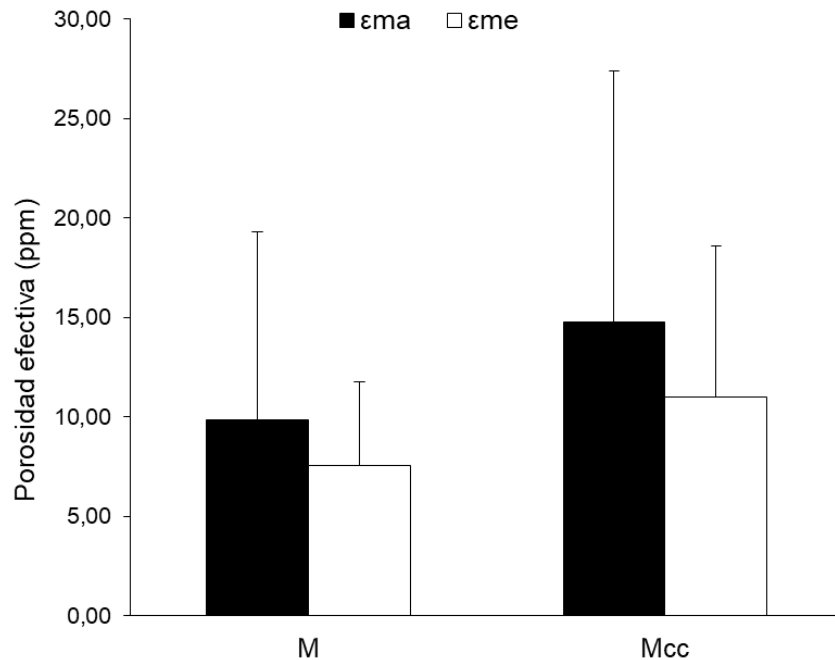


Figura 3.15. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) tras dos años de cultivos de cobertura (CC) en el sitio Chascomús

(CHA-B2). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para las variables estudiadas, no hubo diferencias significativas entre tratamientos (p-valor > 0,05).

Tabla 3.8. Índices de conectividad para la porosidad total (C_{WPT}), la macroporosidad (C_{Wma}) y la mesoporosidad (C_{Wme}) en Chascomús (CHA-B2).

		C _{WPT}	C _{Wma}	C _{Wme}
CHA_o	M	2,2 ±0,7	3479 ±1453	168 ±190
	M _{CC}	1,2 ±0,7	2361 ±1671	226 ±112

M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para las variables estudiadas no hubo diferencias significativas entre tratamientos (p-valor > 0,05).

3.6.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la variabilidad temporal de los indicadores de calidad física de suelos en el corto plazo

En el Anexo II – Tabla I se muestran los resultados del ANAVA bifactorial para el sitio CHA, con la presencia de CC y la fecha como factores, considerando las cinco fechas durante los primeros dos años del ensayo (CHA_o: previo a la siembra del primer CC, CHA-B1: durante el primer período de barbecho incluyendo CC y barbecho desnudo, CHA-CP_o: al inicio del cultivo principal, CHA-CP_f: al final del cultivo principal, y CHA-B2: durante el segundo período de barbecho). La PT y la Dap presentaron efectos independientes de la fecha y la presencia de CC. θ_{ma} , θ_{me} , AC y FC se vieron afectados por la fecha, y θ_{mi} y ADP presentaron efectos independientes de la fecha y la presencia de CC. De los indicadores dinámicos de CFS, K₀, K₃, K₆, C_{WPT}, C_{Wma} y ϵ_{ma} presentaron efecto de la interacción entre los factores estudiados, C_{Wme} presentó efecto de la fecha y ϵ_{me} no presentó interacción ni efecto de ninguno de los factores estudiados.

En CHA, todas las familias de poros presentaron variabilidad temporal durante los dos primeros años del ensayo (Figura 3.16). La PT se mantuvo relativamente constante en las dos primeras fechas, disminuyó en CHA-CP_o con respecto a CHA_o, y siguió en aumento en CHA-CP_f y CHA-B2, alcanzando el mayor valor en esta última fecha. Tanto θ_{ma} como θ_{me} mostraron una tendencia temporal similar a PT. La θ_{ma} siguió el orden CHA_o > CHA-B1=CHA-CP_o > CHA-CP_f > CHA-B2, y θ_{me} fue CHA_o=CHA-B1=CHA-CP_o > CHA-CP_f > CHA-B2. La θ_{mi} , por el contrario, se mantuvo relativamente constante en las primeras tres fechas y disminuyó en CHA-CP_f, manteniendo valores similares en CHA-B2. Además, θ_{mi} fue la única familia de poros que presentó diferencias entre tratamientos, resultando mayor en M_{CC} que en M en todas las fechas.

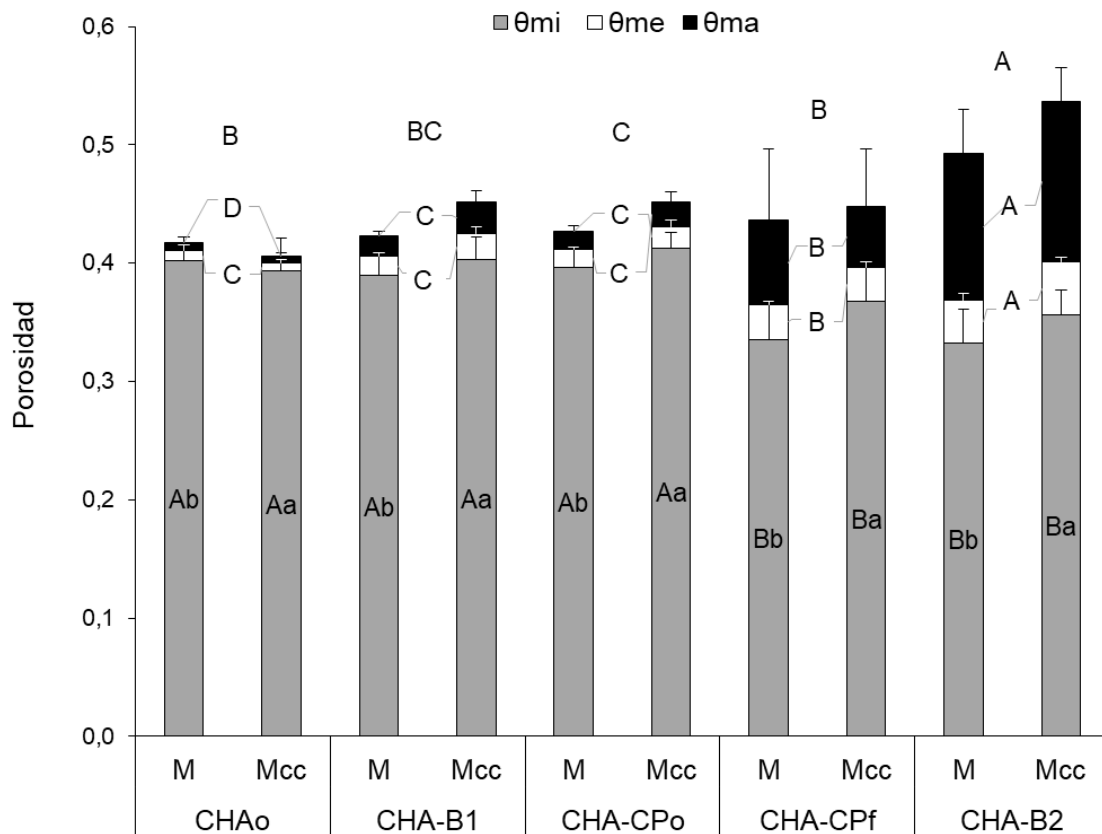


Figura 3.16. Valores de macro, meso y microporosidad (θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , respectivamente), y porosidad total (PT) (suma de las columnas apiladas) en cinco fechas en el sitio Chascomús (CHA). M = maíz, M_{CC} = maíz con cultivo de cobertura (CC). Para una misma familia de poros, letras mayúsculas indican el efecto de la fecha, y letras mayúsculas y minúsculas indican los efectos independientes de la fecha y de la presencia de CC, respectivamente (p -valor < 0,05). ns indica que no hubo efectos significativos. Las letras encima de las barras corresponden a la PT.

Los indicadores de almacenaje de agua no se vieron afectados por la presencia de CC, pero si mostraron variabilidad temporal dentro de los primeros dos años (Tabla 3.9). El ADP y FC fueron mayores en CHA_o, disminuyeron en CHA-B1 y tuvieron valores intermedios a los de las dos primeras fechas en CHA-CP_o. En CHA-CP_f ambos indicadores mostraron una nueva disminución, y el ADP siguió disminuyendo en CHA-B2, mientras que FC se mantuvo constante. AC fue aumentando a lo largo de los dos primeros años, resultando CHA_o < CHA-B1 < CHA-CP_f < CHA-B2, mientras que en CHA-CP_o presentó valores intermedios (sin diferencias significativas) a CHA_o y CHA-B1.

Tabla 3.9. Indicadores estáticos de almacenaje de agua y densidad aparente en Chascomús (CHA).

		Dap (g.cm⁻³)	AC	ADP	FC
CHA_o	M	1,18 ±0,03	0,02 ±0,01	0,20 ±0,03 b	0,37 ±0,03
		BC	D	A	A
	Mcc	1,15 ±0,03	0,012 ±0,005	0,21 ±0,03 a	0,36 ±0,03
CHA-B1	M	1,22 ±0,04	0,034 ±0,007	0,18 ±0,02 b	0,34± 0,02
		AB	C	B	B
	Mcc	1,17 ±0,05	0,05 ±0,02	0,19 ±0,02 a	0,34± 0,02
CHA-CP_o	M	1,25 ±0,03	0,032 ±0,008	0,19 ±0,02 b	0,34 ±0,02
		A	CD	AB	AB
	Mcc	1,19 ±0,07	0,04 ±0,01	0,20 ±0,02 a	0,35 ±0,02
CHA-CP_f	M	1,18 ±0,05	0,10 ±0,06	0,14 ±0,03 b	0,28 ±0,05
		C	B	C	C
	Mcc	1,14 ±0,04	0,08 ±0,05	0,17 ±0,04 a	0,30 ±0,06
CHA-B2	M	1,16 ±0,07	0,16 ±0,03	0,13 ±0,02 b	0,28 ±0,02
		D	A	D	C
	Mcc	1,1 ±0,1	0,18 ±0,03	0,14 ±0,01 a	0,29 ±0,01

Dap = densidad aparente, AC = capacidad de aire, ADP = agua disponible para la planta, FC = capacidad de campo. M = maíz, M_{CC} = maíz con cultivo de cobertura (CC). Para un mismo parámetro, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre fechas (p-valor < 0,05), y letras minúsculas indican el efecto de la presencia de CC. La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

La K(h) mostró una variabilidad temporal similar en ambos tratamientos, con diferencias significativas principalmente en la última fecha (CHA-B2) (Figura 3.17). Tanto K₀ como K₃ y K₆ tendieron a aumentar desde un mínimo en CHA_o hasta un máximo en CHA-CP_f, y luego presentaron una abrupta disminución en CHA-B2, hasta valores similares a los de CHA_o en el caso de M, y hasta valores un poco mayores (y similares a los de CHA-B1) en M_{CC}. Para las tres tensiones, K(h) en CHA-B2 fue significativamente mayor en M_{CC} que en M.

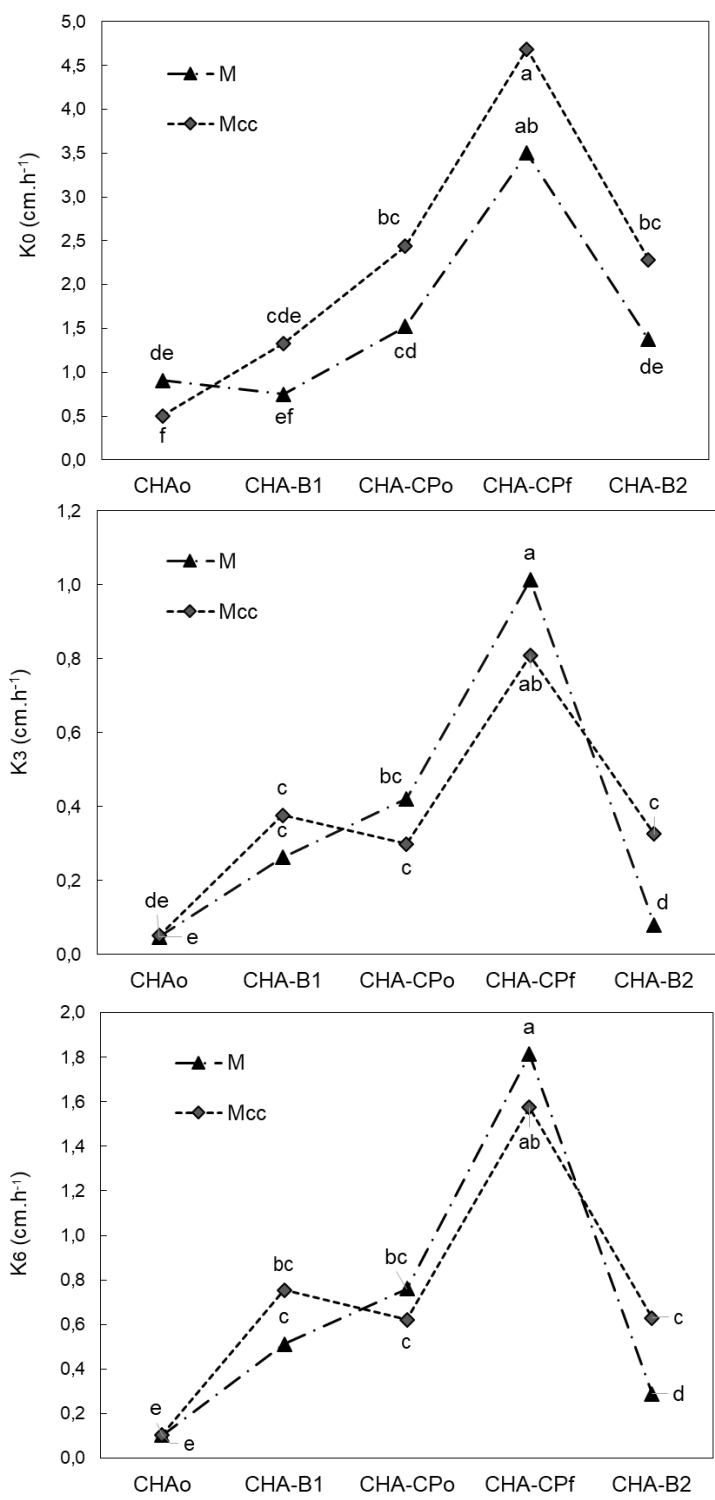


Figura 3.17. Conductividad hidráulica saturada y a 3 y 6 cm de tensión (K_0 , K_3 y K_6 , respectivamente) en cinco fechas en el sitio Chascomús (CHA). M = maíz, M_{cc} = maíz con cultivo de cobertura (CC). Para una misma familia de poros, letras distintas indican diferencias para la interacción fecha*CC (p -valor < 0,05).

En la figura 3.18 se observan los valores de ϵ_{ma} y ϵ_{me} . En M, ϵ_{ma} se mantuvo relativamente constante, a excepción de la fecha CHA-B1, en la que los valores de ϵ_{ma} fueron menores a los de las demás fechas. En M_{CC}, ϵ_{ma} presentó valores menores en CHA_o y CHA-B1 (sin diferencias significativas entre ambos tratamientos), y aumentó en CHA-CP_o, manteniéndose constante hasta el final del ensayo. ϵ_{ma} solo presentó diferencias significativas entre tratamientos en CHA-CP_f, momento en el cual fue mayor en M_{CC} que en M. ϵ_{me} no presentó diferencias significativas entre tratamientos en ninguna de las fechas estudiadas. ϵ_{me} fue mínima en CHA_o, aumentó hacia CHA-B1, se mantuvo constante en CHA-CP_o, volvió a presentar un incremento en CHA-CP_f, y disminuyó en CHA-B2 a valores similares a los de CHA-B1 y CHA-CP_o.

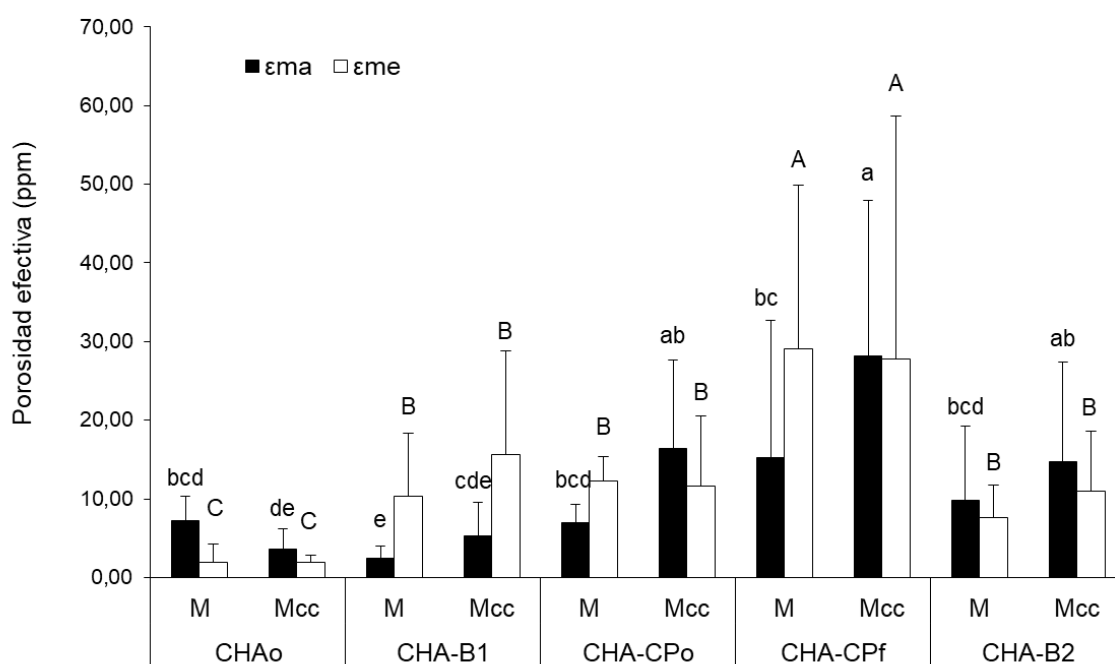


Figura 3.18. Valores de macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me} , respectivamente) en Chascomús (CHA). M = maíz, M_{CC} = maíz con cultivo de cobertura (CC). Para una misma variable, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre fechas (p-valor < 0,05), y letras minúsculas indican el efecto de la interacción fecha*CC. La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

En cuanto a los índices de conectividad de poros, el CW_{PT} tuvo un comportamiento temporal similar en ambos tratamientos (Tabla 3.10). En M_{CC} CW_{PT} aumentó entre CHA_o y CHA-CP_f, y en CHA-B2 disminuyó hasta valores similares a los de CHA-B1. En M, CW_{PT} aumentó en CHA-CP_o respecto de CHA_o y CHA-B1, siguió aumentando en CHA-CP_f, y en CHA-B2 disminuyó hasta valores similares a los de CHA-CP_o. Las diferencias entre tratamientos solo fueron significativas en CHA_o (donde los valores iniciales de CW_{PT} fueron mayores en M que en M_{CC}) y en CHA-B2 (M_{CC} > M). El CW_{ma} no presentó diferencias iniciales entre tratamientos. En CHA-B1,

el Cw_{ma} disminuyó respecto de CHA_o , volviendo a aumentar a los niveles iniciales en $CHA-CP_o$. En $CHA-CP_f$, Cw_{ma} disminuyó en ambos tratamientos, pero más abruptamente en M, resultando $M_{CC} > M$. En $CHA-B2$, Cw_{ma} se mantuvo constante en M y siguió disminuyendo en M_{CC} , resultando $M=M_{CC}$. El Cw_{me} no presentó diferencias entre tratamientos, pero sí variabilidad temporal, siendo $CHA-CP_o > CHA_o=CHA-B1=CHA-CP_f > CHA-B2$.

Tabla 3.10. Índices de conectividad para la porosidad total (Cw_{PT}), la macroporosidad (Cw_{ma}) y la mesoporosidad (Cw_{me}) en Chascomús (CHA) en las distintas fechas de muestreo.

		Cw_{PT}	Cw_{ma}	Cw_{me}
CHA_o	M	2,2 ±0,7 de	3479 ±1453 a	168 ±190 B
	M_{CC}	1,2 ±0,7 f	2361 ±1671 ab	226 ±112
CHA-B1	M	1,8 ±0,6 ef	368 ±273 c	295 ±261 B
	M_{CC}	3 ±1 cde	522 ±437 c	265 ±259
CHA-CP_o	M	4 ±1 cd	1278 ±453 b	436 ±110 A
	M_{CC}	5 ±3 bc	2304 ±1566 ab	312 ±237
CHA-CP_f	M	8 ±4 ab	156 ±177 d	102 ±73 B
	M_{CC}	10 ±5 a	601 ±419 c	152 ±170
CHA-B2	M	3 ±2 de	53 ±51 e	13 ±7 C
	M_{CC}	4 ±2 c	92 ±76 de	19 ±13

M = maíz, M_{CC} = maíz con cultivo de cobertura (CC). Para una misma variable, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre fechas (p -valor < 0,05), y letras minúsculas indican el efecto de la interacción fecha*CC.

3.7. DISCUSIÓN

3.7.1. Efecto a largo plazo de los cultivos de cobertura sobre indicadores de calidad física en dos suelos de diferente textura

Tanto en PER como en VIL, la PT, Dap, θ_{ma} , θ_{mi} , AC, K_0 , ϵ_{ma} , ϵ_{me} , Cw_{PT} y Cw_{ma} no se vieron afectados por la presencia de CC, lo que indica que los CC tienen un efecto menor sobre la CFS. Esto puede deberse en el caso de VIL al suelo de textura franco arenosa, donde la capacidad de generación de estructura se ve limitada por el bajo contenido de arcillas (Fernández et al., 2020). En el caso de PER, se observó un suelo degradado y compactado por décadas de agricultura continua de soja en SD que, sumado a la ausencia de arcillas expansibles, resulta de difícil recuperación (Fernández et al., 2020). A esto se suma que en ambos suelos se observaron contenidos de MO relativamente bajos, factor que pudo limitar la capacidad de estructuración, dado que tanto las arcillas como la MO son

fundamentales en la generación de estructura en Molisoles (Fernández et al., 2020). Otros autores observaron que la PT y la Dap no se ven significativamente modificadas por la presencia de CC o por las rotaciones (Álvarez et al., 2017; Calonego et al., 2017). En cuanto a la K_0 , diversos estudios reportan que la K_0 aumenta con los CC invernales en el largo plazo (Keisling et al., 1994; Alvarez et al., 2017; Chalise et al., 2019). Sin embargo, Blanco-Canqui et al. (2011) no encontraron diferencias en K_0 entre CC y barbecho invernal después de 15 años de ensayo. Esta falta de diferencias fue atribuida a que esta variable presenta grandes coeficientes de variación entre repeticiones y una gran variabilidad temporal, que puede enmascarar las diferencias entre tratamientos si estas existen (Blanco-Canqui et al., 2011; Irmak et al., 2018).

Villegas

En VII, se evaluó el efecto de 15 años de un CC de centeno en un cultivo de soja y en una rotación soja-maíz. Para la mayoría de las propiedades físicas estudiadas, el efecto de los CC fue distinto en el cultivo de soja que en la rotación soja-maíz, lo que muestra que el efecto de los CC puede ser complejo y depende de las rotaciones del cultivo principal. La presencia de CC generó una disminución en θ_{me} , lo que puede deberse al taponamiento temporal de los poros por las raíces de las gramíneas, que son más abundantes y más resistentes a la degradación (Bodner et al., 2008). Esto explicaría también que θ_{me} fue mayor en los lotes con soja como cultivo principal que en la rotación soja-maíz (independientemente de la presencia de CC).

La presencia de CC tuvo efectos distintos en el ADP en el cultivo de soja y en la rotación soja-maíz. Los CC generaron un incremento en el ADP en la rotación soja-maíz, y una disminución en el cultivo de soja. El ADP, que se calcula como el contenido de agua a FC menos el contenido de agua en el punto de marchitez permanente (PMP) representa una fracción del volumen total de microporos (Lozano et al., 2016). En el caso de R_{CC} , mayor ADP se debió principalmente a un mayor contenido de agua a FC, mientras que en el caso de S se debió a un menor PMP (valores de PMP: 0,09 para S, 0,12 para S_{CC} , 0,11 para R y 0,12 para R_{CC}). En varios estudios no se reportan efectos significativos de los CC en el ADP (Blanco-Canqui et al., 2011; Chalise et al., 2019; Mukherjee y Lal, 2015; Nascente y Stone, 2018). Villamil et al. (2006) observaron que introducir CC en una rotación de soja-maíz produjo un incremento en el ADP en un Argiudol ácuico franco limoso. Por el contrario, Álvarez et al. (2017) en un meta-análisis sobre el efecto de los CC en las propiedades físicas del suelo en la Región Pampeana, reportaron que los CC disminuyen significativamente la capacidad de los suelos de almacenar agua, pero que esta disminución no restringiría la disponibilidad de agua para los cultivos, al tratarse de una región con abundantes precipitaciones. En este sentido, nuestros resultados muestran que los CC pueden tener efectos distintos dependiendo de la secuencia de cultivos en la que se incluyen, aunque en todos los tratamientos el ADP se encontró dentro del rango considerado como óptimo según Reynolds et al. (2009) ($ADP > 0,20$). Por otra parte, los CC generaron un incremento en el contenido de agua a FC, que puede deberse tanto a un incremento en el volumen de poros de menor tamaño

(aunque sin diferencias estadísticas), como a un incremento en el contenido de COS en los primeros 5 cm de suelo en lotes con CC. En este sentido, Lal (2020) observó que aumentos en la MO pueden incrementar el contenido de agua retenida a FC, lo que puede estar relacionado con la alta capacidad de absorción de agua, a la presencia de compuestos hidrofílicos y al efecto de la MO sobre la estructura.

En VIL, la presencia de CC y las distintas rotaciones del cultivo principal no generaron cambios en K_0 y K_3 . Como se mencionó antes, si bien numerosos estudios reportan que la K_0 aumenta con los CC invernales en el largo plazo (Álvarez et al., 2017; Chalise et al., 2019; Keisling et al., 1994), algunos autores no encontraron diferencias significativas (Blanco-Canqui et al., 2011; Blanco-Canqui et al., 2015). En VIL, la falta de efecto de los CC pudo deberse a que el suelo es un Hapludol de textura franco arenosa, por lo que es posible que la capacidad de generar estructura sea menor, dado el bajo contenido de arcillas y en particular de arcillas expansivas (Díaz-Zorita et al., 2004; Fernández et al., 2020). Además, se observaron bajos contenidos de carbono orgánico del suelo (entre 0,66 y 0,96 g.100g⁻¹ en lotes sin CC, y entre 1,20 y 1,24 g.100g⁻¹ en lotes con CC). Esto explicaría que ni las rotaciones ni la presencia de CC hayan tenido efectos significativos en θ_{ma} , en AC, en K_0 y en demás indicadores de CFS relacionados con la porosidad estructural. La falta de efectos significativos de los CC en K_0 y K_3 (así como en θ_{ma} y AC) pudo deberse también al taponamiento de los poros causados por las raíces de los CC, ya que el muestreo fue realizado solo un mes después de terminado el CC. En este sentido, Bodner et al. (2014) mencionan la existencia de un taponamiento temporal de los poros debido a que el crecimiento de las raíces se da principalmente en los poros pre-existentes, limitando el volumen de poros activos y el transporte de agua. Por otra parte, Blanco-Canqui et al. (2011) atribuyeron la falta de diferencias significativas en K_0 a una alta variabilidad entre repeticiones de esta variable. En este estudio, los coeficientes de variación de la K_0 en VIL estuvieron entre 48 y 87 % y para la K_3 estuvieron entre 22 y 44 %, mientras que para K_6 (variable que sí presentó diferencias significativas entre tratamientos) estuvieron entre 5 y 38 %.

La K_6 fue mayor en sistemas con CC, y también fue mayor en la rotación soja-maíz que en el cultivo de soja. Esto puede ser atribuido a la presencia del centeno como CC y del maíz en la rotación, ambas gramíneas con un sistema radical en cabellera con abundantes raíces finas (Hudek et al., 2022). Cabe destacar que los valores de K_6 fueron 3 veces mayores en R y en S_{CC} que en S (0,09 vs 0,03), mientras que en R_{CC} los valores de K_6 duplicaron los de R y S_{CC} y fueron casi 6 veces mayores que en S (0,17 en R_{CC} vs 0,03 en S). En R_{CC} también se observaron valores mayores de K_3 (0,3 vs 0,2 en el resto de los tratamientos), si bien sin diferencias significativas, y valores mayores de Cw_{me} . La K_6 corresponde al agua que infiltra por poros con un radio efectivo menor a 0,25 mm, mientras que K_3 representa agua que infiltra por poros con radio efectivo entre 0,25 y 0,50 mm.

Estos resultados sugieren que la inclusión de maíz en la rotación o de un CC de centeno puede ser suficiente para mejorar el movimiento del agua en el suelo en comparación con un monocultivo de soja en suelos de textura gruesa. Imhoff et al. (2010) reportaron que una mayor proporción de gramíneas en la rotación tuvo un efecto positivo en la conectividad del sistema poroso, incrementando la infiltración de

agua. Bronick y Lal (2005) mencionaron que la inclusión de maíz en la secuencia de cultivos mejora la estructura del suelo. Sin embargo, en VIL sólo se observaron cambios en K_6 , que representa una porción mínima del flujo de agua en el suelo en relación a K_0 y a K_3 (Holden, 2009). Otros autores, por el contrario, muestran un efecto significativo en la K_0 , en suelos y secuencias de cultivos similares. Villamil et al. (2006) y Liesch et al. (2011), trabajando en un Argiudol ácuico y en un Hapludol cálcico, respectivamente, encontraron que la inclusión de centeno como CC en una rotación de soja-maíz incrementó K_0 y la CFS en general, en comparación con un barbecho desnudo. Chalise et al. (2019) en dos Hapludoles, también encontraron mayores tasas de infiltración en presencia de CC en rotaciones de soja-maíz en comparación con barbecho desnudo, atribuyendo esto a mejores propiedades estructurales que favorecían la continuidad de los macro y microporos. En VIL, la falta de efectos significativos en K_0 y K_3 pudo deberse al taponamiento de los poros causados por las raíces de los CC (Bodner et al., 2014), así como al efecto limitado de los CC sobre la CFS en un suelo con bajo contenido de arcillas y MO.

Pergamino

En PER, se evaluó el efecto de 8 y 9 años de CC de avena/vicia en comparación con un barbecho desnudo en un cultivo de soja. En este sitio, los parámetros afectados por la presencia de CC (θ_{me} , ADP, K_3 , K_6 y Cw_{me}) fueron mayores en S que en S_{CC} , a excepción de FC que mostró la tendencia inversa. Estos resultados son similares a lo que ocurrió en VIL en S en comparación con S_{CC} , donde también se observó mayor θ_{me} , ADP y Cw_{me} en ausencia de CC. Esto puede explicarse en parte por un posible taponamiento de los poros por las raíces de los CC (Bodner et al., 2014). En acuerdo con esto, en el caso de θ_{me} y ADP, esta diferencia fue mayor en PER- B_f , que representa el final del barbecho con el CC aún en pie. En el caso de los indicadores dinámicos, el Cw_{me} también mostró mayores diferencias en PER- B_f y en PER- CP_o , esta última fecha representando el inicio del cultivo de soja (soja en V2), aproximadamente un mes después de finalizado el CC. En el caso de K_3 y K_6 , por el contrario, la diferencia fue mayor en PER- CP_o y PER- CP_f (después de cosechada la soja), que en PER- B_f .

Una disminución en los indicadores de CFS en presencia de CC podría indicar un deterioro en la CFS por la adopción de esta práctica. Sin embargo, algunos autores sugieren que un aumento en los indicadores relacionados con los poros de menor diámetro sin un incremento en los indicadores relacionados con poros de mayor tamaño (como θ_{ma} , AC y K_0) pueden ser indicadores de compactación, ya que los fenómenos de compactación generan a menudo un desplazamiento en la DTP_o (Fernández et al., 2020), lo que puede implicar una disminución en los rangos de poros mayores y un aumento en el volumen de poros de menor tamaño. En este sentido, y al igual que ocurrió en VIL, la falta de diferencias entre tratamientos en los indicadores más estrechamente relacionados con la porosidad estructural indica que el efecto de los CC en las propiedades físicas e hidráulicas fue menor (Yu et al., 2016). En PER, el ensayo de CC se hizo sobre lotes que se encontraban fuertemente degradados por más de 20 años de monocultivo de soja bajo SD, y en el que se

podían observar claros rasgos de compactación y degradación, como presencia de estructura laminar y valores elevados de Dap en relación a los esperados para ese tipo de suelo (Sasal et al., 2006; Villarreal, 2018). En el lote bajo S, se observó la presencia de estructura laminar dentro de los primeros 10 cm de suelo (que comenzaba entre los 4 y 6 cm de profundidad, y de entre 2 y 3 cm de espesor). En S, la estructura laminar restringía de manera notable el desarrollo de las raíces de soja a los primeros 10 cm. En S_{CC}, esta estructura también se observó, aunque fue más débil, permitiendo la penetración de las raíces. Sin embargo, estas diferencias observadas a campo no se tradujeron en mejoras en los indicadores de CFS, lo que sugiere que la presencia de 8-9 años de CC en un cultivo de soja no es suficiente para generar mejoras en un suelo degradado por décadas de monocultivo de soja. Sasal et al. (2006) indicaron que los Argiudoles tienen baja capacidad para la regeneración de poros, dado su bajo contenido de arcillas expansibles. Otros autores encontraron resultados similares en suelos degradados. Irmak et al. (2018) observó que 13 años de CC no produjeron cambios en la CFS en un suelo franco limoso que había estado bajo agricultura continua con barbecho invernal desnudo durante décadas.

3.7.2. Efecto a corto plazo de los cultivos de cobertura sobre indicadores de calidad física en dos suelos de diferente textura

Belloco

En BEL, se evaluó el efecto de dos años de tres rotaciones distintas del cultivo principal (maíz-soja, trigo/soja-maíz y soja-trigo/soja) en ausencia y en presencia de CC (M-S y v/M-c/S, T/S-M y T/S-v/M, S-T/S y c/S-T/S). Para la mayoría de las propiedades físicas estudiadas, el efecto de los CC fue distinto dependiendo de la secuencia de cultivos, aunque en todos los casos la inclusión de CC produjo una disminución en θ_{mi} y FC y un incremento en CW_{PT} .

La inclusión de CC produjo una disminución de la PT en los tratamientos con maíz-soja y soja-trigo/soja como cultivos principales. Para la mayoría de los tratamientos, la PT fue baja, con valores de Dap llamativamente altos en todos los tratamientos, y en especial en v/M-c/S y c/S-v/M, seguidos por T/S-M, T/S-v/M y M-S. En el caso de v/M-c/S y c/S-v/M, estos tratamientos implican cuatro cultivos en dos años, con la consecuente intensificación en el tránsito agrícola. Además, el muestreo se realizó en el mes de junio, luego de la cosecha de los cultivos de verano y dos semanas después de sembrados los cultivos de invierno (el trigo y la vicia del tercer año de rotación, en los tratamientos en los que correspondía un cultivo de invierno). En los tratamientos M-S y v/M-c/S, se había sembrado trigo correspondiente al tercer año de la rotación. En el tratamiento c/S-T/S se había sembrado vicia como CC. En el tratamiento T/S-v/M aún no se había sembrado el cultivo de cobertura siguiente (centeno). T/S-M y S-T/S fueron los dos únicos tratamientos a los que no les correspondía un cultivo de invierno. Es decir que, de los tratamientos, el M-S y v/M-c/S (su equivalente con CC) habían sido ambos recientemente transitados, y T/S-M y T/S-v/M (equivalente con CC) no habían sido recientemente transitados. Por el

contrario, el tratamiento de S-T/S no había sido transitado, mientras que su equivalente con CC (c/S-T/S) había sido transitado para sembrar el CC de invierno. Por otra parte, los valores de Dap observados en algunos tratamientos fueron mucho más altos que los observados en la profundidad de 5-10 cm (Tabla 3.1). La diferencia fue especialmente alta en T/S-v/M ($1,4 \pm 0,1 \text{ g.cm}^{-3}$ en la capa de 0-5 cm contra $1,18 \pm 0,06 \text{ g.cm}^{-3}$ en 5-10 cm), en T/S-M ($1,5 \pm 0,1 \text{ g.cm}^{-3}$ en 0-5 cm contra $1,35 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$ en 5-10 cm) y en v/M-c/S ($1,56 \pm 0,07 \text{ g.cm}^{-3}$ en 0-5 cm contra $1,39 \pm 0,02 \text{ g.cm}^{-3}$ en 5-10 cm), y en menor medida en c/S-T/S ($1,55 \pm 0,08 \text{ g.cm}^{-3}$ en 0-5 cm contra $1,33 \pm 0,09 \text{ g.cm}^{-3}$ en 5-10 cm) y T/S-M ($1,5 \pm 0,1 \text{ g.cm}^{-3}$ en 0-5 cm contra $1,35 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$ en 5-10 cm). Esto posiblemente indica que haya ocurrido un encostramiento, que es un fenómeno de compactación superficial caracterizado por la formación de una capa fina y densa, con poros pequeños y una capacidad de infiltración reducida (Taboada y Álvarez, 2008). Esto puede deberse al tránsito y el impacto de las gotas de lluvia en un invierno muy húmedo con abundantes precipitaciones en un suelo Hapludol con estructura relativamente débil.

En el caso de M-S, el tratamiento correspondiente con CC fue v/M-c/S, con lo cual la disminución en la PT puede atribuirse a la intensificación del tránsito agrícola al pasar de dos a cuatro cultivos anuales (Behrends Kraemer et al., 2017). En el caso del T/S-M, este tratamiento no presentó diferencias significativas en la PT con el tratamiento correspondiente con CC (T/S-v/M), quizás debido a que la intensificación fue menor (pasando de tres a cuatro cultivos anuales) y al efecto estructurante del cultivo de maíz (Castiglioni y Behrends Kraemer, 2019), que había sido el último cultivo de verano. En el caso de la rotación de soja-trigo/soja la diferencia entre tratamientos (con y sin CC) fue mayor. El tratamiento S-T/S presentó la mayor PT, mientras que c/S-T/S fue uno de los tratamientos con menor PT, posiblemente debido al tránsito reciente para sembrar la vicia como siguiente CC (que no correspondió en el tratamiento S-T/S) sumado al efecto de mayor tránsito en años anteriores.

De manera similar, θ_{ma} fue menor en v/M-c/S y c/S-T/S, los dos tratamientos con mayor intensificación que habían sido recientemente transitados para la siembra del CC siguiente. θ_{ma} fue mayor en S-T/S, uno de los tratamientos sin intensificación por CC que no había sido recientemente transitado. En la rotación de soja/trigo-soja, la inclusión de centeno como CC produjo una disminución en θ_{ma} , producto de la intensificación del tránsito agrícola que puede causar compactación, fenómeno caracterizado por una disminución en los poros de mayor tamaño por pérdida de estructura (Fernández et al., 2020; Strudley et al., 2008). Por el contrario, en la rotación de trigo/soja-maíz, la presencia de la vicia como CC produjo un incremento en θ_{ma} . En este caso los lotes no habían sido transitados para la siembra del CC siguiente, lo que indica que la inclusión del CC puede generar una compactación temporal por el tránsito durante la siembra, seguida de un aumento también temporal en la macroporosidad producto del desarrollo de las raíces, la cobertura y la fauna asociada (Blanco-Canqui et al., 2015).

En esta última rotación (trigo/soja-maíz), el CC incluido fue la vicia. Según algunos autores, si bien las gramíneas ayudan a generar estructura y por lo tanto porosidad estructural, las leguminosas pueden ser más efectivas en incrementar θ_{ma} debido al efecto de sus raíces pivotantes (Calonego et al., 2017). Bodner et al. (2014)

mencionaron que los CC de leguminosas incrementan la estabilidad inter-agregado debido a la acción de sus raíces más gruesas. También llama la atención que θ_{ma} en T/S-M fue menor a la del resto de los tratamientos, lo que pudo deberse en parte al taponamiento de los macroporos existentes (que inicialmente pudieron ser menores a los del tratamiento con CC) por parte de las raíces del maíz, que presenta un sistema radical abundante y de difícil degradación (Blanco-Canqui et al., 2013a; Bodner et al., 2008). Bodner et al. (2014) observaron que las raíces finas usan los poros existentes para penetrar en el suelo, estabilizando la estructura, pero también reduciendo el espacio poroso. En el caso de la rotación maíz-soja, no se observaron diferencias en θ_{ma} entre M-S y v/M-c/S, lo que pudo deberse a que ambos habían sido recientemente transitados, y presentaron θ_{ma} relativamente bajos.

Otros autores también reportaron que los CC pueden producir incrementos o bien no generar efectos significativos en θ_{ma} en el corto plazo, dependiendo de las especies usadas como CC y de la secuencia de cultivos (Nascente y Stone, 2018; Villamil et al., 2006). Por otra parte, Haruna et al. (2018) reportaron que un CC de centeno produjo un incremento en la θ_{ma} que fue observado dos semanas después de su terminación, mientras que no se observaron diferencias significativas una semana antes de su terminación. Esto indica que los efectos en θ_{ma} pueden ser temporarios, dependiendo del momento de muestreo y del tiempo requerido para que el decaimiento de raíces de lugar a nuevos poros.

Los cambios ocasionados por la secuencia de cultivos y el tránsito de maquinarias en la DTPO, generaron en ocasiones cambios en los indicadores de capacidad de almacenaje de agua. En la rotación maíz-soja, la disminución en la PT en el lote con CC (v/M-c/S) se debió principalmente a una disminución en θ_{mi} , y no se observaron diferencias entre estos dos tratamientos en los demás indicadores derivados de la CRH. Cuando la rotación de los cultivos principales fue T/S-M, el lote sin CC presentó menor θ_{ma} y θ_{me} y mayor θ_{mi} que la misma rotación con CC (T/S-v/M). La compactación con reducción en el volumen de poros más grandes y un aumento en los microporos ya ha sido reportada antes (Fernández et al., 2020). Este cambio se tradujo en mayor AC en T/S-v/M. AC es un indicador de los poros de transmisión (θ_{ma} y θ_{me}) fundamentales para un drenaje eficiente del exceso de agua. En el caso de la rotación soja-trigo/soja, la compactación producto del tránsito al incluir CC generó una disminución en todas las familias de poros (θ_{ma} , θ_{me} y θ_{mi}) que se tradujo en menor AC y ADP. Esta fue la rotación del cultivo principal más perjudicada por la inclusión de CC, lo que se atribuye al reciente tránsito de maquinaria en c/S-T/S que no ocurrió en S-T/S.

En cuanto a la K, la introducción de un CC de centeno produjo un incremento en K_0 del 111 % en c/S-T/S en relación a S/T-S, y la introducción de un CC de vicia produjo un incremento de 61 % en T/S-v/M en relación con T/S-M. En la rotación de maíz-soja, por el contrario, la inclusión de CC en los dos períodos invernales produjo una disminución del 45 % en K_0 en v/M-c/S en relación con M-S.

En el caso de c/S-T/S el incremento en K_0 , así como un incremento en K_3 y K_6 , se debió al efecto de las raíces del centeno, aunque en este tratamiento PT y θ_{ma} fueron menores que en S-T/S. Esto indica que las raíces del centeno y la porosidad

producida tras su degradación durante el año siguiente, así como por la biota asociada, generaron poros mejor conectados y más eficientes para el transporte de agua (Blanco-Canqui et al., 2011; Jirků et al., 2013; Landl et al., 2019; Yu et al., 2016), lo que se ve reflejado en mayores CW_{ma} , CW_{PT} y ϵ_{ma} (aunque en este último caso sin diferencias estadísticas).

En v/M-c/S, por el contrario, la presencia del centeno y la vicia como CC no generó un aumento si no una disminución en K_0 y en K_6 . Estos resultados parecen indicar que las raíces del centeno, de más lenta degradación por tratarse de una gramínea, requieren un tiempo mayor para mejorar la conectividad del sistema poroso, mientras que en el corto plazo pueden reducir la conductividad hidráulica como consecuencia del taponamiento de los poros que generan una disminución en la PT (Bodner et al., 2014).

La inclusión de vicia en el invierno inmediatamente anterior, en cambio, sí generó un aumento en K_0 en T/S-v/M en comparación con T/S-M. Las raíces de la vicia son menos abundantes que las del centeno y tienen un menor poder estructurante (Hudek et al., 2022). Sin embargo, al ser de degradación más rápida, pueden haberse degradado en el mismo período de tiempo generando un incremento en θ_{ma} , θ_{me} , CW_{PT} y K_0 .

Otros autores, estudiando el efecto de los CC en el corto plazo en suelos de textura franca a franco arenosa, observaron incrementos, disminuciones o ningún efecto en la $K(h)$, dependiendo de las especies empleadas como CC y del momento del año (Bodner et al., 2008; Carof et al., 2007). Varios autores, por el contrario, observaron que los CC no producen cambios significativos en la infiltración de agua en el corto plazo (Blanco-Canqui et al., 2015; García-González et al., 2018; Haruna et al., 2018; Wagger y Denton, 1989).

Chascomús

En CHA, se evaluó el efecto de dos años de CC (cebada y vicia el primer año, y avena, vicia y cebada el segundo año) en un cultivo de maíz. En líneas generales, pasados dos años de iniciado el ensayo no se observaron mayores cambios en la CFS. La presencia de CC produjo un incremento en θ_{me} , K_3 y en K_6 respecto al barbecho desnudo, que pudo deberse al efecto estructurante de las raíces (Basche y DeLonge, 2019; Blanco-Canqui et al., 2015; Nascente y Stone, 2018) y a la cobertura que protege al suelo contra eventos erosivos externos, manteniendo así la estructura (Mukherjee y Lal, 2015).

Otros autores, también reportan la falta de efectos en los indicadores de CFS en el corto plazo. Mukherjee y Lal (2015) no observaron efectos en la CFS (Dap, ADP y FC) al incluir un CC de nabo y arveja en una rotación de maíz-soja, tras un año de CC en un Argiaquol típico franco arcillo limoso. Wagger y Denton (1989) tampoco observaron cambios en la CFS, al evaluar el efecto de tres años de distintas especies de CC en un cultivo de maíz en un suelo franco arenoso sobre la Dap, la PT y la K_0 . Haruna et al. (2018) evaluaron el efecto de cuatro años de centeno como CC en un cultivo de maíz, en un suelo franco limoso. Estos autores no observaron efecto del

CC sobre K_0 , y observaron aumentos o cambios no significativos en θ_{ma} y θ_{me} , dependiendo del sistema de labranza.

Estos resultados muestran que se puede necesitar un tiempo mayor para obtener efectos observables y de larga duración en la CFS (Blanco-Canqui et al., 2015; Calonogo et al., 2017; García-González et al., 2018; Mukherjee y Lal, 2015). Otros autores reportaron que los parámetros de CFS son a menudo muy variables entre repeticiones y en el tiempo, y que esta variabilidad puede enmascarar el efecto de los tratamientos, si es que lo hay (Blanco-Canqui et al., 2011; Jirků et al., 2013; Strudley, 2008). En el sitio CHA se evaluó también el efecto de los CC sobre la variabilidad temporal de las propiedades físicas durante los dos primeros años de iniciado el ensayo (sección 3.7.3).

3.7.3. Efecto de los cultivos de cobertura sobre la variabilidad temporal de los indicadores de calidad física de suelos en el corto plazo.

En CHA se observó que existe una variabilidad natural en las propiedades físicas, que se vio reflejada tanto en indicadores estáticos como en indicadores dinámicos de CFS. Esta variabilidad responde a que la configuración del sistema poroso se ve constantemente modificado por la actividad de la fauna del suelo y las raíces que generan nuevos poros o los ocluyen, por los ciclos de humedecimiento y secado y el flujo de agua, y por eventos externos como la lluvia o el tránsito de maquinaria (Bormann y Klaassen, 2008; Hu et al., 2009; Jirků et al., 2013; Liesch et al., 2011; Schwen et al., 2011a; Strudley et al., 2008; Villarreal et al., 2017; 2020). Todo esto puede repercutir tanto en la PT como en la DTPO, y en la orientación y conectividad de esos poros, y por lo tanto en la capacidad de ese suelo para captar y transmitir agua (Chandrasekhar et al., 2018; Jirků et al., 2013; Kargas et al., 2016; Lozano et al., 2013; Schwen et al., 2011a).

La inclusión de CC implica una modificación en la cobertura (y por lo tanto en el impacto del viento y las gotas de lluvia, así como sobre los ciclos de humedecimiento y secado), en el régimen de raíces y de la fauna asociada a la rizósfera (y por lo tanto en la formación y destrucción de poros y agregados, y también en el flujo de agua y contenido de humedad), y puede impactar también en el contenido y composición de la MO (con su rol en la formación y mantenimiento de la estructura). Por lo tanto, es posible que la presencia de CC modifique la variabilidad temporal de las propiedades físicas del suelo, en relación con un barbecho desnudo. Sin embargo, en CHA no se observaron mayores cambios en la variabilidad temporal de los indicadores de CFS estudiados durante los dos primeros años.

La presencia de CC no modificó de manera significativa la variabilidad temporal de los indicadores estáticos de CFS. Los únicos cambios observados entre tratamientos (en θ_{me} y ADP), se debieron a diferencias entre lotes observables en CHA₀ (antes de iniciado el ensayo) que se mantuvieron en las siguientes fechas de muestreo. En cuando a los indicadores dinámicos de CFS, la presencia de CC tampoco tuvo mayor efecto en la $K(h)$, que mostró tendencias similares en el tiempo

hasta la última fecha de muestreo (CHA-B2), donde comenzó a percibirse el efecto de los CC. Estos resultados indican que fueron necesarios dos años de CC para generar un incremento en $K(h)$, observable hacia el final del barbecho, con el CC maduro. Lo mismo ocurrió con las porosidades efectivas, donde si bien hubo interacción para ϵ_{ma} entre la fecha y la presencia de CC, ambos tratamientos siguieron la misma tendencia, sin diferencias significativas entre tratamientos hasta CHA-CPf. En esta fecha, que ocurrió hacia el final del cultivo de maíz, ϵ_{ma} fue mayor en M_{CC} que en M. Esta diferencia pudo deberse al decaimiento de las raíces del primer CC (Kreiselmeier et al., 2019), y desapareció en CHA-B2, quizás como resultado de la oclusión de los poros por las raíces del segundo CC (Bodner et al., 2008). De manera similar, los índices de conectividad de poros presentaron una variabilidad temporal similar entre tratamientos. En el caso de CW_{PT} sólo se observaron diferencias significativas en CHA-B2, donde CW_{PT} fue mayor en M_{CC} que en M, y en el caso de CW_{me} , solo se observaron diferencias en CHA-CPf, donde fue mayor en M_{CC} que en M, que luego desaparecieron en CHA-B2. Estos últimos resultados indican que el efecto de los CC sobre las propiedades hidráulicas puede no ser inmediato, y ser temporal y de corto plazo (Blanco-Canqui et al., 2011; Bodner et al., 2008; Carof et al., 2007).

Por otra parte, el hecho de que las diferencias entre tratamientos se observaron principalmente en el segundo CC (CHA-B2), pudo deberse a que el crecimiento y la cobertura en el primer ciclo de CC fue mucho menor. El primer CC se sembró más tarde, a principios de septiembre, por el exceso de lluvias en ese año y tuvo un menor desarrollo. En CHA-B1, la cobertura del CC estimada visualmente fue similar en M_{CC} , que la cobertura generada por las malezas en M. Además, el primer CC se desarrolló durante solo tres meses y medio, y se muestreó a menos de dos meses de sembrado. El segundo ciclo de CC (CHA-B2), por el contrario, se sembró a inicios de mayo, y se desarrolló durante 6 meses antes de su finalización, mientras que el muestreo se realizó a cuatro meses de sembrado el CC, observándose una cobertura de aproximadamente 100 % en M_{CC} , con mayor abundancia de raíces que en M y que en CHA-B1, especialmente en profundidad. En M, la cobertura de las malezas fue mayor (aproximadamente un 70 %), y se observó un suelo con estructura más masiva que en M_{CC} . Por lo tanto, las diferencias observadas entre el primer y el segundo año pudieron deberse a particularidades del CC y al momento en el que se realizó el muestreo, más que a la necesidad de dos años de efectos acumulados para encontrar diferencias entre tratamientos.

De los resultados obtenidos, todas las variables presentaron variabilidad temporal en el corto plazo en el período de tiempo estudiado. Resultados similares fueron reportados por otros autores, que mencionaron que las propiedades físicas del suelo son altamente variables en el tiempo, incluso dentro del ciclo de cultivo (Chandrasekhar et al., 2018). La variabilidad natural de la configuración del sistema poroso y de las propiedades hidráulicas resultantes se evidencia especialmente en el tratamiento M entre CHA₀ y CHA-B1, ya que entre los meses de agosto y octubre en un barbecho desnudo se observaron incrementos significativos en θ_{ma} , AC, K_3 , K_6 y ϵ_{me} , y una disminución en ADP, FC, ϵ_{ma} y CW_{ma} , posiblemente como resultado de los procesos de re-estructuración abiótica (resultado de los cambios de temperatura, los

ciclos de humedecimiento y secado, el impacto de las gotas de lluvia, entre otros factores), así como también por la actividad de la fauna del suelo, las malezas y el decaimiento de raíces de un cultivo previo (Hu et al., 2021; Jirků et al., 2013; Villarreal, 2018; Villarreal et al., 2020). Es de esperar, como se observó en este trabajo, que esta variabilidad sea mayor cuando se introduce el efecto de los cultivos y el tránsito de maquinaria. La PT experimentó una leve disminución entre el inicio del ensayo (CHA_0) y el inicio del verano ($CHA-CP_0$), que se revirtió hacia el comienzo del otoño, cuando el maíz se encontraba maduro ($CHA-CP_f$) y aumentó más aún hacia el final del invierno ($CHA-B2$). Estos cambios se debieron principalmente a un incremento en θ_{ma} y θ_{me} , al tiempo que se produjo una disminución de menor magnitud en θ_{mi} . Esto produjo por lo tanto un aumento en AC y una disminución en ADP y FC. Esto pudo deberse al efecto estructurante de las raíces del maíz, que pueden mejorar la estructura incrementando la porosidad estructural, y generando poros adicionales después de la cosecha tras el decaimiento de sus raíces (Bronick y Lal, 2005).

La $K(h)$ tendió a aumentar entre el inicio del ensayo y $CHA-CP_f$, disminuyendo luego en $CHA-B2$, de manera más abrupta en M que en M_{cc} . Scanlan (2009) mostró que K_0 disminuye cuando el sistema radical es relativamente joven y se incrementa durante el período de senescencia y decaimiento, creando porosidad conductora de agua. La K resultó particularmente baja durante los períodos de invierno (y más aún bajo barbecho desnudo) y aumentó durante el verano. Kargas et al. (2016) reportaron que la variabilidad temporal de la K_0 durante el barbecho en SD resultó mayor en lotes desnudos que en lotes con malezas. Estos autores observaron que, mientras que en los lotes con control químico de malezas la K_0 mostraba fuertes disminuciones después de eventos de lluvia, en los lotes con malezas la K_0 solo varió mínimamente, manteniendo valores superiores. Carof et al. (2007) también observaron una variabilidad a lo largo de un ciclo de cultivo en la K cercana a saturación, que fue atribuida a cambios temporales en la estructura del suelo debidos a la presencia de raíces, cambios en la actividad biológica y el efecto de la lluvia. Por otra parte, entre las fechas $CHA-CP_f$ y $CHA-B2$ se observó un incremento en la PT, θ_{ma} y θ_{me} , mientras que la $K(h)$ sufrió una fuerte disminución entre estas dos fechas. Una vez más esto indica que las propiedades hidráulicas no dependen únicamente del volumen de poros ni de la DTP_0 , sino que son rasgos fundamentales la orientación y conectividad de esos poros.

3.7.4. Corolario

En vistas de la evidente degradación de los suelos de la Región Pampeana, que en un contexto de cambio climático y crisis ambiental conllevan mayores sequías e inundaciones, menor disponibilidad de agua para los cultivos y eventos climáticos más extremos, es urgente que los sistemas agrícolas se adapten para minimizar el impacto sobre la CFS (IPCC, 2013). Los resultados obtenidos en esta tesis no muestran un efecto claro de la presencia de CC en rotaciones tradicionales de agricultura extensiva bajo SD sobre indicadores estáticos y dinámicos de CFS. En el largo plazo, se observó que los CC tienen un efecto negativo sobre indicadores

estáticos de CFS, disminuyendo θ_{me} e incrementando el contenido de agua a FC (lo que en ocasiones puede ser un indicador de compactación) en un Hapludol y en un Argiudol de la Región Pampeana. En cuanto a los indicadores dinámicos o de transmisión de agua, en el largo plazo los CC incrementaron K_6 tanto en el Hapludol como en el Argiudol, pero en el Argiudol generaron una disminución en K_3 .

En el corto plazo, se observó que dos años de CC tuvieron un efecto positivo en indicadores dinámicos de CFS en un Argiudol abruptico, incrementando K_0 , K_3 y K_6 , y un efecto limitado en indicadores estáticos de CFS, incrementando θ_{me} . En el Hapludol éntico se observaron efectos contradictorios sobre la CFS tras dos años de CC, dependiendo fuertemente de la rotación de los cultivos principales y de la intensificación en el tránsito. En la rotación maíz-soja, la inclusión de vicia como CC el primer año y de centeno como CC el segundo año generó una desmejora de la CFS, reflejada tanto en indicadores estáticos como dinámicos. En la rotación de trigo/soja-maíz, la inclusión de vicia como CC el segundo año produjo una mejora en indicadores estáticos y dinámicos de CFS, incrementando θ_{ma} , θ_{me} y AC, y K_0 , K_6 y CW_{PT} , aunque disminuyendo K_3 y CW_{ma} . En la rotación de soja-trigo/soja, la inclusión de centeno como CC el primer año generó una desmejora en indicadores estáticos de CFS, disminuyendo θ_{ma} , θ_{me} , θ_{mi} , AC, ADP y FC, lo que se atribuyó al tránsito reciente en el lote con CC. Sin embargo, en esta rotación los CC mejoraron los indicadores dinámicos de CFS, incrementando K_0 , CW_{PT} y CW_{ma} .

Por otra parte, se observó que existe una variabilidad temporal de las propiedades físicas. En el corto plazo, el efecto observado de los CC dependió del momento de muestreo, mientras que en el largo plazo el efecto de los CC fue consistente en el tiempo. En cuanto al efecto de las rotaciones de CC, este resultó relevante tanto en el corto como en el largo plazo, pero fue más importante en el corto plazo.

3.8. CONCLUSIONES

Los CC en sistemas bajo SD tienen un efecto menor sobre los indicadores estáticos y dinámicos de CFS. Este efecto no es consistente en los distintos tipos de suelo, rotaciones y períodos de tiempo.

CAPÍTULO 4 – Efecto de los cultivos de cobertura sobre las curvas de retención hídrica y conductividad hidráulica

4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se discutió como los cultivos de cobertura (CC) pueden modificar la geometría del espacio poroso del suelo, que a su vez controla las propiedades físicas e hidráulicas (Chandrasekhar et al., 2018). La configuración del sistema poroso presenta una variabilidad temporal natural, ya que es resultado de la estructura del suelo que es dinámica y se ve modificada por el impacto de las gotas de lluvia y el viento, los ciclos de humedecimiento y secado y los cambios de temperatura, la actividad de las raíces y de la fauna del suelo, y las tareas agrícolas como el tránsito y las labranzas, entre otros factores (Chandrasekhar et al., 2018; Jirků et al., 2013; Schwen et al., 2011a; Villarreal et al., 2020). Ha sido reportado que las raíces mejoran la estructura del suelo mientras que la actividad de las lombrices puede homogeneizar los agregados (Haas y Horn, 2018). Villarreal et al. (2020) mencionaron que la labranza puede generar un incremento temporal en la macroporosidad, mientras que la actividad biológica incrementa la conectividad de los poros. Bodner et al. (2008) observaron que las raíces vivas pueden ocluir los poros, ocasionando disminuciones temporales en la conductividad hidráulica (K). Los CC, por su parte, modifican los factores que determinan la estructura, pudiendo generar cambios tanto en las propiedades físicas e hidráulicas como en su variabilidad temporal. Al generar cobertura, los CC minimizan el impacto de la lluvia y el viento (Mukherjee y Lal, 2015). Tanto la cobertura como la presencia de un cultivo vivo generan cambios en el contenido de humedad, disminuyendo la evaporación en comparación con un barbecho desnudo, pero aumentando el flujo de agua hacia las raíces y la transpiración (Mukherjee y Lal, 2015). La presencia de raíces en crecimiento y de la biota asociada a la rizósfera produce la ruptura y la formación de nuevos agregados, y generalmente contribuye a la estabilización de la estructura (Basche y DeLonge, 2019; Blanco-Canqui et al., 2015). Asimismo, el aporte de residuos producido por los CC puede contribuir a incrementar el contenido de la materia orgánica (MO) del suelo, que tiene un efecto cementante fundamental en los procesos de generación y estabilización de la estructura (Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Mukherjee y Lal, 2015). Además, la presencia de MO puede incrementar la hidrofobicidad del suelo, lo que puede retrasar la infiltración o favorecer el flujo preferencial por los macroporos, modificando por lo tanto las propiedades hidráulicas de distintas maneras (González-Peñaloza et al., 2012). Como se mencionó en el capítulo 3, los diversos mecanismos involucrados y la elevada variabilidad temporal de las propiedades físicas e hidráulicas pueden dificultar el análisis del efecto de los CC sobre la calidad física del suelo (CFS), especialmente en los primeros años desde su implementación.

En el corto plazo (< 4 años), han sido reportados efectos contradictorios de la presencia de CC sobre la CFS. Efectos positivos de los CC en la dinámica hídrica (Castiglioni et al., 2016; Haruna et al., 2018; Villamil et al., 2006) e incrementos en la macroporosidad (Nascente y Stone, 2018) en suelos franco limosos fueron reportados para los primeros 10 cm de suelo. Otros autores no observaron cambios en la CFS tras la inclusión de CC en suelos franco arcillo limosos para la misma capa de suelo (Acuña y Villamil, 2014; Mukherjee y Lal, 2015). Carof et al. (2007) y Bodner et al. (2008) estudiaron el efecto de distintos CC en la K a distintas tensiones (h) cercanas

a saturación, observando efectos mixtos y una gran variabilidad temporal durante los primeros años de la inclusión de CC. Carof et al. (2007) estudiaron el efecto de distintos CC sobre la K a valores de h de 6, 2 y 0,5 cm, reportando que los CC modificaron mínimamente la $K(h)$, generando efectos distintos dependiendo de las especies de CC, la h y el momento del año. Bodner et al. (2008) midieron la K a 2, 8 y 15 cm de h , y observaron que en el primer año de su inclusión algunos CC generaron un incremento en $K(h)$ en relación al barbecho desnudo, mientras que otros generaron una disminución, en un suelo franco a franco arenoso. En el segundo año de estudio, por el contrario, el barbecho desnudo presentó los mayores valores de $K(h)$, y los CC valores menores y con diferencias significativas entre especies. Estos resultados reflejan el hecho de que el sistema poroso del suelo y su funcionamiento es complejo y depende de múltiples variables, incluyendo el tipo de suelo, el cultivo y condiciones climáticas (Jirků et al., 2013). Además, el sistema poroso es dinámico y va cambiando producto de la actividad biológica, los ciclos de humedecimiento y secado, el impacto de la lluvia y las tareas agrícolas, entre otros factores (Jirků et al., 2013). Por lo tanto, la estructura del suelo y la configuración del sistema poroso presentan una dinámica temporal dentro del ciclo de cultivo, que puede verse afectada por la presencia de CC.

El estudio de la CFS y de las propiedades hidráulicas incluye habitualmente el cálculo de la conductividad hidráulica (K) en condiciones de saturación o cercanas a saturación (Reynolds et al., 2017; Villarreal, 2018), tal como se hizo en el capítulo 3. Sin embargo, en el suelo se da un amplio rango de contenidos de humedad que pueden ir desde condiciones de sequía extrema hasta condiciones de anegamiento. Los suelos agrícolas suelen encontrarse la mayor parte del tiempo en condiciones intermedias, y por lo tanto muchos procesos de interés agronómico (por ejemplo, infiltración, absorción de agua por las raíces, transporte de nutrientes y solutos) se dan frecuentemente en condiciones no-saturadas (Hillel, 1998), en las que el flujo de agua en el suelo está controlado por la K no saturada y los gradientes de potencial hidráulico (Vereecken et al., 2016).

Con el objetivo de cuantificar estos cambios en la configuración del espacio poroso y en las propiedades hidráulicas derivadas, una determinación precisa de la curva de retención hídrica (CRH) y de la $K(h)$ en un rango amplio de h resulta necesaria. En general, estas dos curvas se describen empleando ajustes con funciones unimodales. Un modelo ampliamente utilizado es el modelo de Mualem–van Genuchten (van Genuchten, 1980). Esta ecuación permite el ajuste de las CRH y de $K(h)$ mediante una función sigmoidea, con un único punto de inflexión, lo que generalmente representa un sistema poroso con un dominio de poros principal (distribución de tamaño de poros, DTPo, unimodal). Sin embargo, en suelos rígidos o moderadamente expansibles, el sistema poroso a menudo se organiza con una distribución bimodal, donde pueden distinguirse no uno si no dos dominios de poros principales (Durner, 1994; Reynolds, 2017). Generalmente, el dominio de poros de mayor tamaño se adjudica a la estructura del suelo (por ejemplo, poros inter-agregados, canales ocasionados por las raíces o la fauna del suelo, y grietas), mientras que los poros de menor tamaño son considerados poros de la matriz (espacios entre partículas primarias y materia orgánica) (Durner, 1994; Reynolds, 2017). En estos casos en los que existen dos dominios de poros diferenciados, el uso de ajustes unimodales puede llevar a predicciones poco precisas (Priesack y Durner, 2006). En cambio, realizar ajustes bimodales de la CRH y de $K(h)$ cuando el suelo exhibe estas características permite identificar y cuantificar un sistema poroso secundario relacionado con la estructura del suelo, y que va a ser afectado en mayor

grado por las prácticas agrícolas (Durner, 1994). La correcta caracterización hidráulica de suelos estructurados resulta de extrema importancia debido a que los poros inter-agregados juegan un rol preponderante en la dinámica y retención del agua en el suelo y a su vez en el transporte de nutrientes y contaminantes (Durner, 1994).

Utilizando este enfoque, algunos trabajos describen los cambios en la configuración del sistema poroso y en las propiedades hidráulicas relacionadas después de las operaciones de labranza bajo distintos sistemas de manejo (Kreiselmeier et al., 2019; Peña-Sancho et al., 2017; Sandin et al., 2018; Villarreal et al., 2020). Kreiselmeier et al. (2019) compararon la evolución de la DTPO bajo diferentes sistemas de labranza. Estos autores observaron un cambio de poros de mayor a menor tamaño bajo labranza convencional durante el invierno, y una disminución en la bimodalidad, mientras que bajo siembra directa (SD) prácticamente no se observaron cambios en el sistema poroso. Sin embargo, bajo labranza convencional el dominio estructural se vio restaurado tras la cosecha, como consecuencia del decaimiento de las raíces y residuos orgánicos. Kreiselmeier et al. (2020) estudiaron la variabilidad temporal de $K(h)$ durante el ciclo de cultivo bajo diferentes sistemas de labranza incluyendo SD. Estos autores mencionaron que la variabilidad de K fue menor a valores de h altos (correspondientes a poros de la matriz), y que la variabilidad temporal de $K(h)$ fue menor bajo SD. Por otra parte, se ha reportado que distintos cultivos pueden tener un impacto diferente en el sistema poroso, pero que estos efectos no son permanentes, pudiendo ser apreciados en el año de crecimiento del cultivo (Głab et al., 2013). Identificar, cuantificar y comprender la geometría, conectividad, formación y dinámica de los poros estructurales bajo diferentes prácticas agrícolas es todavía un desafío en física de suelos. Adicionalmente, existen pocos estudios que describan los efectos inmediatos de la inclusión de CC y su efecto sobre la evolución temporal de la estructura del suelo y propiedades hidráulicas relacionadas (Bacq-Labreuil et al., 2019).

La descripción de la evolución del sistema poroso en el corto plazo después de la introducción de un CC puede contribuir a la comprensión sobre la dinámica de la estructura del suelo, y cómo estos cambios inciden en las propiedades hidráulicas (Herbrich y Gerke, 2017). Más aún, esta información puede resultar útil para el desarrollo de marcos teóricos para el modelado de la dinámica de la estructura del suelo (Meurer et al., 2020), y para evaluar el uso de CC como descompactadores biológicos, práctica que ha ganado atención en los últimos años para el mejoramiento de suelos compactados (Zhang y Peng, 2021). Sin embargo, el estudio del efecto de los CC sobre la configuración del sistema poroso y las propiedades hidráulicas derivadas presenta varias dificultades. Entre los aspectos que deben ser considerados se encuentra la variabilidad temporal de las propiedades físicas, dado que el sistema poroso es dinámico y va cambiando producto de la actividad biológica, los ciclos de humedecimiento y secado, el impacto de la lluvia y las tareas agrícolas, entre otros factores (Jirků et al., 2013). Por otra parte, una determinación más precisa de la CRH y $K(h)$ en un amplio rango de h puede ser necesaria para una descripción más certera de la configuración del sistema poroso, considerando si es más adecuado un ajuste uni o bimodal. Uno de los métodos más difundidos en los últimos años para determinar la $K(h)$ en un amplio rango de h en laboratorio es el método de evaporación simplificado (MES) (Peters y Durner, 2008; Schindler et al., 2010). Esta metodología permite obtener la función de $K(h)$ desde puntos cercanos a saturación, así como valores precisos de la CRH (Durner, 1994). Este tipo de estudio provee información

crucial para identificar posibles efectos positivos o negativos de la inclusión de CC en el corto plazo, de interés para los productores a la hora de evaluar la adopción de esta práctica.

4.2. HIPÓTESIS

1- La introducción de CC en un suelo bajo SD con maíz como cultivo de verano produce un cambio en la DTPO, con una disminución en los poros de la matriz y un incremento en los poros estructurales, en comparación con un barbecho desnudo.

2- La introducción de CC en un suelo bajo SD con maíz como cultivo de verano mejora la conectividad de los poros estructurales, incrementando $K(h)$ durante el primer año desde su inclusión, en comparación con un barbecho desnudo.

3- La porosidad estructural puede resultar un indicador de CFS útil para determinar el efecto en el corto plazo de los CC.

4.3. OBJETIVOS

Evaluar la variabilidad temporal a lo largo del ciclo de cultivo de la curva de $K(h)$ y de la configuración del sistema poroso en un suelo de la región pampeana bajo SD con y sin CC en el primer año de su inclusión.

4.4. MARCO TEÓRICO

4.4.1. Método de evaporación simplificado

El MES permite obtener valores precisos de la curva de $K(h)$ en muestras no disturbadas en el laboratorio, en un amplio rango de h y en un tiempo relativamente corto en comparación con otros métodos de laboratorio (Peters y Durner, 2008; Schindler y Müller, 2006). Además, esta metodología permite derivar la CRH en ese rango de h (Durner, 1994). A partir de las medidas de $K(h)$ y de la DTPO obtenidas, es posible también calcular la conectividad de las distintas familias de poros (Lozano et al., 2013).

Los métodos de evaporación se basan en realizar medidas de h (empleando tensiómetros) en una muestra de suelo que se seca desde la superficie, y realizando un registro simultáneo del contenido de humedad (θ) en la muestra, que se determina a partir de la pérdida de masa registrada en una balanza. En el método propuesto por Schindler en 1980, se colocan dos tensiómetros a dos profundidades distintas equidistantes del centro y de las paredes del cilindro (Schindler et al., 2010) (Figura 4.1).

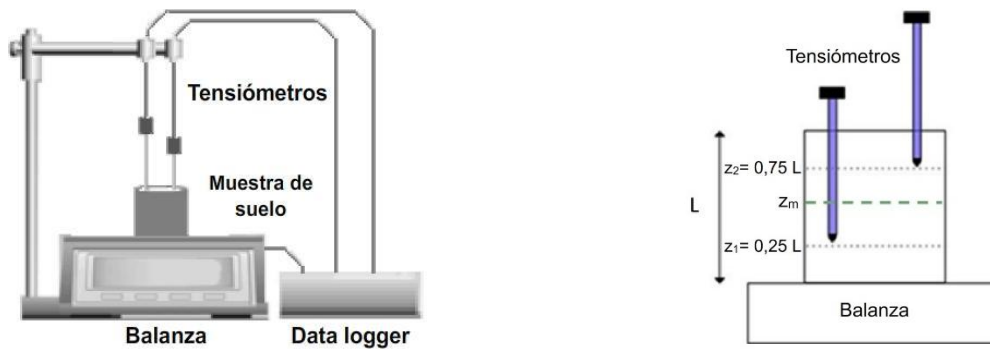


Figura 4.1. Configuración experimental del dispositivo para el método de evaporación simplificado.

En los experimentos de evaporación, se produce un flujo en estado no estacionario, y los gradientes de h y de θ a lo largo de la muestra y en el tiempo no necesariamente son lineales. Sin embargo, y a fin de simplificar la evaluación del sistema, se puede emplear una serie de supuestos de linealidad (Peters y Durner, 2008). Considerando que los intervalos de tiempo entre medidas son lo suficientemente pequeños, el flujo puede suponerse estacionario entre esos momentos. Por lo tanto, en condiciones de flujo quasi-estacionario entre dos tiempos consecutivos t_{i-1} y t_i se puede asumir que la pérdida de masa (y por lo tanto la disminución de θ) es lineal, y que la h en cada uno de los puntos varía de manera lineal con el tiempo. Además, este método asume que tanto θ como h varían de manera lineal en el espacio en la distancia entre los dos tensiómetros. De esta manera la h en un punto medio de la muestra se puede calcular como la media aritmética entre los valores en los dos tensiómetros (Peters y Durner, 2008).

Determinación de la curva de conductividad hidráulica

Teniendo en cuenta estas suposiciones, para la determinación de la curva de $K(h)$ se aplica la ley de Darcy para el flujo no saturado a través del área transversal al flujo que cruza la muestra en el punto medio ($z_m=L/2$) (Peters y Durner, 2008). El flujo de agua entre dos tiempos cercanos t_{i-1} y t_i es igual a:

$$q_i = z_m \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t_i} \quad (4.1)$$

con

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (4.2)$$

y

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1} \quad (4.3)$$

Aplicando la ley de Darcy y considerando que el componente gravitacional del potencial es unitario, se obtiene la siguiente expresión:

$$q_i = -K_i(h_i^*) \frac{\Delta H_i}{\Delta z} = -K_i(h_i^*) \left[\frac{\Delta h_i}{\Delta z} + \frac{\Delta z_i}{\Delta z} \right] = -K_i(h_i^*) \left[\frac{\Delta h_i}{\Delta z} + 1 \right] \quad (4.4)$$

donde Δz es la distancia entre los dos tensiómetros, ΔH_i es la diferencia en el potencial agua para el instante i , y Δh_i es la diferencia en el potencial mátrico. De la ecuación 4.4 se puede despejar $K(h)$ como:

$$K_i(h_i^*) = - \frac{q_i}{1 + \Delta h_i / \Delta z} \quad (4.5)$$

Δh_i se calcula como la media entre las diferencias de h entre los dos tensiómetros (h_1 para el tensiómetro inferior y h_2 para el tensiómetro superior) a los dos tiempos considerados (ecuación 4.6)

$$\Delta h_i = \frac{[(h_2 - h_1)_{(t=i-1)} + (h_2 - h_1)_{(t=i)}]}{2} \quad (4.6)$$

y el h_i^* es el h al que corresponde a dicho valor de K_i , y se calcula como el valor medio entre las cuatro h (en las dos posiciones y los dos tiempos considerados):

$$h_i^* = \frac{(h_1)_{(t=i-1)} + (h_2)_{(t=i-1)} + (h_1)_{(t=i)} + (h_2)_{(t=i)}}{4} \quad (4.7)$$

Determinación de la curva de retención hídrica

La determinación de los puntos individuales de la CRH se realiza calculando el θ a un determinado tiempo t_i ($\theta(t_i)$) a partir del θ_s y de la pérdida de masa de agua registrada en la balanza a ese intervalo de tiempo, y considerando que representa la h en el punto medio de la muestra a t_i que, asumiendo la linealidad en el espacio, se puede calcular como:

$$h_m(t_i) = \frac{h_1(t_i) + h_2(t_i)}{2} \quad (4.8)$$

donde $h_m(t_i)$ es la h en el punto medio al tiempo i , y h_1 y h_2 las tensiones en los tensiómetros inferior y superior, respectivamente, en ese momento.

Determinación de la distribución de tamaño de poros

La DTPo puede determinarse a partir de la derivada primera de la CRH (Reynolds, 2017):

$$\frac{d\theta}{d(\log_{10}h)} = \ln(10) \frac{\theta_s(-m)(n)(ah)^n}{[1+(ah)^n]^{m+1}} \quad (4.9)$$

considerando para cada tensión h [L] un diámetro de poro equivalente d_e [L], según la ecuación de ascenso capilar:

$$d_e = \frac{4 \sigma \cos \alpha}{\rho g h_i} \quad (4.10)$$

donde σ es la tensión superficial del agua [MT^{-2}], α es el ángulo de contacto entre el agua y la pared del poro y se asume igual a cero, ρ es la densidad del agua [ML^{-3}], y g es la aceleración debida a la gravedad [LT^{-2}].

4.4.2. Ajuste bimodal de la curva de retención hídrica

La DTPo bimodal produce CRH y curvas de $K(h)$ con una forma sigmoidea con dos puntos de inflexión, uno más cercano a saturación correspondiente al dominio estructural y otro a mayores valores de potencial correspondiente al dominio de poros de la matriz (Dexter et al., 2008; Durner, 1994; Smettem y Kirkby, 1990). Por lo tanto, es necesario usar funciones que ajusten curvas con dos puntos de inflexión para poder caracterizarlas adecuadamente (Reynolds, 2017). Existen dos abordajes para el ajuste bimodal de las CRH y de $K(h)$ (Reynolds, 2017). Uno consiste en encontrar una única función bimodal que describa correctamente toda la serie de datos (Dexter et al., 2008; Priesack y Durner, 2006). El otro consiste en preseleccionar las series de datos que se considera que corresponden a cada uno de los dominios de poros, y ajustar cada uno con una función unimodal (Reynolds, 2017). Se han propuesto diferentes aproximaciones para representar la CRH y la curva $K(h)$ a través del ajuste de funciones unimodales por separado a cada uno de los dominios seleccionados previamente. Uno de los modelos más ampliamente utilizados para el abordaje de suelos bimodales es el propuesto por Durner (1994), el cual consiste en una función continua construida a partir de una superposición lineal de sub-curvas según el modelo de van Genuchten (1980) (ecuación 3.2, capítulo 3). Para la descripción de un sistema con un número k de dominios de poros, la ecuación de van Genuchten que describe cada sub-sistema i puede expresarse de la siguiente manera:

$$\theta e_i = \frac{1}{(1+|\alpha_i h|^{n_i})^{m_i}} \quad (4.11)$$

donde θe_i es la saturación efectiva para ese dominio, y α_i [L^{-1}], n_i , y m_i ($m_i = 1 - 1/n_i$) son parámetros empíricos de ajuste para el sub-sistema i . La suma de las k funciones de van Genuchten que describen cada sub-sistema queda dada por:

$$\theta_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \sum_{i=1}^k w_i \theta e_i \quad (4.12)$$

donde $\theta(h)$ es el contenido de humedad a una h dada, θ_s el contenido de humedad a saturación y θ_r el contenido de humedad residual; k es el número de sub-sistemas que forman el sistema poroso del suelo, y w_i es un factor de ponderación para cada sub-curva ($0 < w_i < 1$ y $\sum w_i = 1$).

Como ya se vio en el capítulo anterior la CRH es resultado de la configuración del sistema poroso y puede asociarse de manera teórica a una DTPo basándose en las leyes de capilaridad y asumiendo poros equivalentes cilíndricos e interconectados (Kutilek y Nielsen, 1994). Este modelo de ajuste bimodal permite caracterizar suelos con un sistema de poros heterogéneo, permitiendo así identificar precisamente un sistema secundario de poros en el rango húmedo de la CRH, el cual es afectado por las prácticas de manejo e influye en el transporte y retención de agua y contaminantes en el suelo (Durner, 1994).

4.5. MATERIALES Y MÉTODOS

4.5.1. Sitios de estudio y muestreo

Para el estudio del efecto de los CC sobre la variabilidad temporal de la CRH y la $K(h)$, se tomaron muestras en el sitio Chascomús (CHA) en tres fechas durante el primer año del ensayo (fechas CHA-B1: en octubre de 2018, durante el período de barbecho, CHA-CP_o: en enero de 2019, con el maíz en emergencia, y CHA-CP_r: en abril de 2019, hacia el final del cultivo de maíz). En cada fecha y tratamiento (M y M_{CC}) se tomaron seis muestras indisturbadas empleando cilindros de acero inoxidable (5 cm de altura, 5 cm de diámetro, 98 cm³ de volumen), de los primeros 5 cm de suelo. En cada tratamiento, las muestras se tomaron en lotes adyacentes y en posiciones del terreno equivalentes, evitando huellas visibles y otras irregularidades del terreno. Las muestras fueron secadas al aire a temperatura ambiente.

Las precipitaciones entre agosto de 2018 y abril de 2019 fueron de 900,5 mm, superando el promedio en el largo plazo para ese período (751 mm). Durante el crecimiento del CC no se observaron períodos de déficit de agua (448 mm de precipitaciones; promedio en el largo plazo para el mismo período: 357 mm). Durante el crecimiento del maíz se registraron precipitaciones menores a la media para ese período (230 mm entre enero y agosto de 2019, vs 424 mm esperados para ese período). En cada fecha, se registraron contenidos de humedad semejantes entre tratamientos (0,18±0,05, 0,35±0,01 y 0,27±0,04 m³m⁻³ para CHA-B1, CHA-CP_o y CHA-CP_r en el tratamiento M y 0,22±0,02, 0,33±0,02 y 0,24±0,01 m³m⁻³ en el tratamiento M_{CC}, para las mismas fechas).

4.5.2. Determinación de las curvas de retención hídrica y de conductividad hidráulica

Conductividad hidráulica cercana a saturación

La función de $K(h)$ fue determinada mediante el MES. Sin embargo, dado que este método conduce a un error muy grande en la parte de la curva cercana a saturación (donde el gradiente hidráulico es cercano a cero) (Peters y Durner, 2008), previo al inicio del MES se determinó la K saturada y cercana a saturación ($h = 6, 3$ y 0 cm) en cada una de las muestras mediante mini-infiltración (Soracco et al., 2019). Para esto, las muestras indisturbadas en cilindros fueron secadas al aire (después de ser traídas del campo y previo a saturarlas para el MES). El mini-infiltrómetro empleado consiste en un tubo con un disco de 1 cm de radio en un extremo, cubierto con una membrana del mismo material que la de los infiltrómetros de disco comerciales (Perroux y White, 1988). En el otro extremo, el tubo se encuentra sumergido en un reservorio de agua abierto a la atmósfera y colocado sobre una balanza analítica ($\pm 0,001$ g), conectada a un data-logger (Figura 4.2). Para generar las distintas tensiones, el extremo del mini-infiltrómetro se ubicó por encima de la superficie de agua del reservorio, o al mismo nivel para medir la conductividad hidráulica saturada (K_0). Cada muestra de suelo se colocó sobre una plataforma móvil, y se puso en contacto con el mini-infiltrómetro subiendo la muestra. Las corridas de infiltración se realizaron en cada muestra a 6, 3 y 0 cm de h , en ese orden. Cada corrida de infiltración llevó aproximadamente 5 minutos, para alcanzar el estado estacionario y la masa de agua que infiltró por el área del disco del mini-infiltrómetro

se calculó a partir de la pérdida de masa en el reservorio de agua registrada por la balanza analítica cada segundo (Soracco et al., 2019). La infiltración acumulada se determinó como la relación entre el volumen infiltrado y el área del disco. La K a cada una de las tensiones (K_{6-MI} , K_{3-MI} y K_{0-MI}) se determinó a partir de la infiltración acumulada usando el método de cargas múltiples (Ankeny et al., 1991).

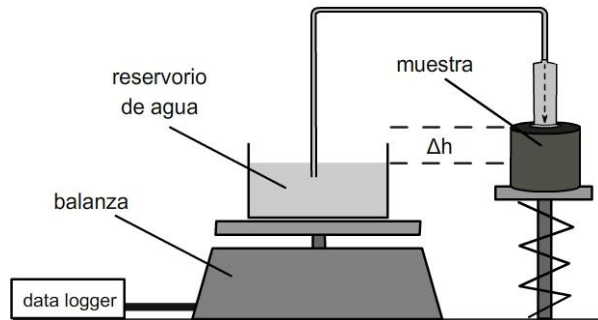


Figura 4.2. Configuración experimental del mini-infiltrómetro.

Conductividad hidráulica no saturada por el método de evaporación simplificado

Una vez determinadas K_{6-MI} , K_{3-MI} y K_{0-MI} , las muestras fueron saturadas desde la base con agua por 48 h, aumentando el nivel de agua de manera gradual para evitar la formación de burbujas de aire dentro de los poros. Luego, las muestras saturadas fueron selladas por el extremo inferior y ubicadas sobre una balanza analítica para determinar $K(h)$ usando el MES (Schindler y Müller, 2006). En cada muestra se insertaron dos mini-tensiómetros (T5 Tensiometer, METER Group, Inc. USA) de forma vertical a 1,25 y 3,75 cm medidos desde la base del cilindro. La masa de la muestra (m) y la h a las dos profundidades (h_2 para el tensiómetro a 3,75 cm y h_1 para el tensiómetro a 1,25 cm) se registraron de manera continua, a medida que se permitió la evaporación libre del agua de la muestra desde la superficie en condiciones de laboratorio (temperatura entre 20 y 24 °C, y una corriente de aire obtenida usando un ventilador).

A partir del mismo conjunto de datos que se tomó para determinar la CRH, se determinó la curva de $K(h)$ según Peter y Durner (2008). La pérdida de volumen de agua (ΔV) se estimó a partir de la pérdida de masa registrada por la balanza entre dos momentos t_1 y t_2 , considerando la densidad del agua igual a 1 g.cm^{-3} . Los valores de h de los dos tensiómetros en un mismo momento ($h_2(t)$ y $h_1(t)$) se usaron para calcular un gradiente hidráulico medio ($i_m(t)$) [-] para cada intervalo de tiempo $\Delta t = t_2 - t_1$, a lo largo de la distancia vertical entre los dos tensiómetros ($\Delta z = 2,5 \text{ cm}$), según la siguiente ecuación:

$$i_m = \frac{1}{2} \left(\frac{h_2(t_1) - h_1(t_1)}{\Delta z} + \frac{h_2(t_2) - h_1(t_2)}{\Delta z} \right) - 1 \quad (4.13)$$

La $K(h)$ se calculó según la ley de Darcy-Buckingham:

$$K(h^*) = \frac{\Delta V}{2A\Delta t i_m} \quad (4.14)$$

donde h^* es la h media entre los tensiómetros para ese intervalo de tiempo (calculada según la ecuación 4.7), $\Delta t = 10$ min y A es el área de la sección transversal del cilindro de suelo ($19,6 \text{ cm}^2$).

Determinación de la curva de retención hídrica

A partir del mismo conjunto de datos que se tomó para determinar la curva de $K(h)$, se determinó la CRH según Peter y Durner (2008).

Ajuste de las curvas de retención hídrica y de conductividad hidráulica

Los pares de datos de θ y h de la CRH fueron ajustados usando el modelo bimodal de van Genuchten (Durner, 1994):

$$\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \sum_{i=1}^k w_i \left[\frac{1}{(1 + |\alpha_i h|^{n_i})^{m_i}} \right] \quad (4.15)$$

donde θ_r y θ_s son el contenido de humedad residual y en saturación, respectivamente. α_i , n_i , and m_i ($m_i = 1 - 1/n_i$) son parámetros empíricos para cada uno de los dominios de poros i , y w_i es un factor de ponderación del peso relativo de cada dominio de poros (considerando w_1 para los poros de la matriz y w_2 para los poros estructurales, y $w_1 + w_2 = 1$). La $K(h)$ fue ajustada empleando el modelo de Mualem (1976) y van Genuchten para funciones bimodales (Priesack y Durner, 2006):

$$K(h) = K_0 \left\{ \sum_{i=1}^k w_i [1 + (\alpha_i h)^{n_i}]^{-m_i} \right\}^2 \left(\frac{\sum_{i=1}^k w_i \alpha_i \{1 - (\alpha_i h)^{n_i} [1 + (\alpha_i h)^{n_i}]^{-m_i}\}}{\sum_{i=1}^k w_i \alpha_i} \right) \quad (4.16)$$

donde k indica la modalidad del modelo ($k=2$ para sistemas bimodales).

En primer lugar, se ajustaron los datos de retención hídrica, y a partir de estos ajustes se tomaron los parámetros α_i , n_i , m_i , y K_0 para ajustar los datos de la curva de $K(h)$ (Beck-Broichsitter et al., 2020). El parámetro de tortuosidad se fijó en 0,5 para reducir el número de variables desconocidas (Romano et al., 2011). El ajuste de los datos se hizo empleando el código RETC versión 6.02 (van Genuchten et al., 1991), usando una optimización no lineal de cuadrados mínimos para estimar los parámetros desconocidos del modelo. Los parámetros de ajuste se muestran en el Anexo III – Tabla I. De la curva de conductividad hidráulica se tomaron los valores a $h=0$ (K_0) y a $h=316$ cm ($pF = 2,5$) para comparar entre tratamientos, según Kreiselmeyer et al. (2020).

Determinación de la distribución de tamaño de poros

La DTPo se determinó según Reynolds (2017) a partir de la derivada primera de la CRH en función del diámetro de poros equivalente calculado como:

$$d_e = \frac{4 \sigma \cos \alpha}{\rho g h_i} \approx \frac{2977,4}{h_i} \quad (4.17)$$

considerando $\sigma = 72,8 \text{ g.s}^{-2}$, $\alpha = 0$, $\rho = 1 \text{ g.cm}^{-3}$ y $g = 980 \text{ cm.s}^{-2}$.

Conectividad de la porosidad estructural

Se calculó el índice de conectividad para la porosidad estructural (C_{WPE}) basado en el flujo de agua (Lozano et al., 2013). La h de división entre los dos dominios de poros (h_{INT}) corresponde al límite superior del dominio de poros de la matriz y al límite inferior del dominio de poros estructural, pudiendo estimarse a partir de la siguiente relación, según Reynolds (2017):

$$\frac{m_2 n_2 P_E (\alpha_2 h_{INT})^{n_2} [1 + (\alpha_1 h_{INT})^{n_1}]^{m_1 + 1}}{m_1 n_1 P_M (\alpha_1 h_{INT})^{n_1} [1 + (\alpha_2 h_{INT})^{n_2}]^{m_2 + 1}} = 1 \quad (4.18)$$

donde α_1 , n_1 y m_1 son los parámetros de van Genuchten correspondientes al dominio de poros de la matriz y α_2 , n_2 y m_2 son los parámetros de van Genuchten correspondientes al dominio estructural. P_M y P_E son la porosidad de la matriz y la porosidad estructural, respectivamente, calculadas a partir de la porosidad total (PT), según:

$$P_M = w_1 PT \quad (4.19)$$

$$P_E = w_2 PT \quad (4.20)$$

El C_{WPE} se calculó según la siguiente ecuación:

$$C_{WPE} = \frac{K_0 - K(h_{INT})}{P_E} \quad (4.21)$$

donde $K_{h_{INT}}$ es el valor de la K a la h de intersección entre los dominios de poros (que representa el límite inferior de la porosidad estructural). $K_{h_{INT}}$ se determinó a partir de los valores ajustados de $K(h)$ obtenidos mediante el MES, mientras que para K_0 se usó el valor de K_{0-MI} obtenido por el método de mini-infiltración. El índice C_w permite comparar distintos manejos de suelo en relación a la conectividad de distintas familias de poros (Lozano et al., 2013), y resulta un indicador de CFS útil que integra datos de indicadores dinámicos de CFS (K) y estáticos (volumen de poros) en un único valor (Soracco et al., 2018a).

4.5.3. Análisis estadístico

Para determinar si hubo interacción o efecto de los factores, se realizaron tests de ANAVA con dos factores: la presencia de CC (con dos niveles, con y sin CC) y la fecha de muestreo (con tres niveles, CHA-B1, CHA-CPo y CHA-CPf) para cada una de las variables analizadas ($K(h)$, P_E , P_M y C_{WPE}). Como la distribución de las variables $K(h)$ y C_{WPE} no fue normal, se emplearon los logaritmos. En caso de observarse interacción, se creó una nueva variable producto de los dos factores (fecha*CC). Para comparar las medias cuando existieron efectos significativos se realizó el test LSD de Fisher (Sokal y Rohlf, 1995). Para todos los análisis el valor de significancia se fijó en $p = 0,05$. Todos los análisis se realizaron usando el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2008).

Para encontrar la solución numérica de la ecuación 4.18 y así obtener h_{INT} , se utilizó el complemento Solver® (Frontline Systems, Incline Village, NV) en Excel® (Microsoft Corporation, Redmond, WA). Para evaluar la bondad de los ajustes, se calculó el error mínimo cuadrado (Beck-Broichsitter et al., 2020):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (x_i - O_i)^2} \quad (4.22)$$

donde x_i y O_i son los pares de valores ajustados y observados de θ y $K(h)$.

4.6. RESULTADOS

4.6.1. Conductividad hidráulica cercana a saturación

En el Anexo III – Tabla II se muestran los resultados del ANAVA bifactorial para el sitio CHA, con la presencia de CC y la fecha como factores. Las variables K_{0-MI} , K_{3-MI} y K_{6-MI} no presentaron interacción entre los factores ni efecto significativo del tratamiento, pero sí efecto de la fecha. La K_0 ajustada a partir de los datos de los experimentos de evaporación no presentó interacción ni efecto de ninguno de los factores, mientras que K ($h=316$ cm) no presentó interacción, pero sí efectos independientes de los factores. Las variables P_E y P_M presentaron interacción entre los factores fecha y presencia de CC. Por último, CW_{PE} no presentó interacción ni se vio afectado por la presencia de CC, pero sí presentó efecto de la fecha de muestreo.

Los valores de K_{0-MI} , K_{3-MI} y K_{6-MI} para las distintas fechas de muestreo y tratamientos medidos en los cilindros indisturbados de suelo (capa de 0-5 cm) se muestran en la figura 4.3. Los valores de K_{0-MI} , K_{3-MI} y K_{6-MI} estuvieron entre 3,2 y 0,02 cm h^{-1} . En CHA-B1 (durante el período de barbecho) los valores observados para estas variables fueron relativamente bajos en comparación con las demás fechas y con reportes previos para la misma región (Villarreal et al., 2020). Entre las fechas CHA-B1 y CHA-CP_o (inicio del cultivo de maíz), K_{0-MI} , K_{3-MI} y K_{6-MI} presentaron un incremento significativo, alcanzando valores que permanecieron constantes en CHA-CP_f (previo a la cosecha del maíz). Sin embargo, en el tratamiento M_{CC} se observó un incremento continuo entre la primera y última fecha, mientras que en M se observó un incremento entre la primera y segunda fecha y una tendencia a disminuir (sin diferencias estadísticamente significativas) hacia la tercera fecha.

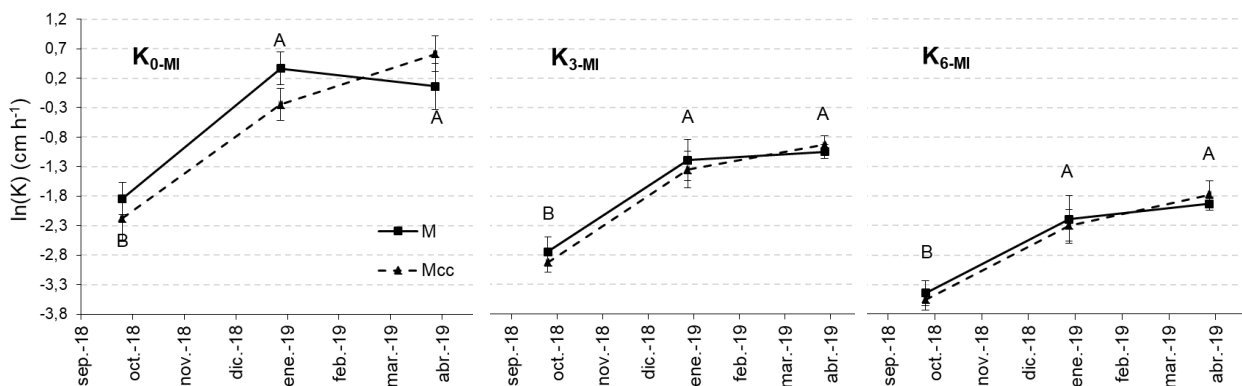


Figura 4.3. Valores medios de K_{0-MI} , K_{3-MI} y K_{6-MI} durante el período de estudio para los distintos sistemas de manejo: M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Para una misma

tensión, letras diferentes indican diferencias significativas entre fechas (p -valor < 0,05). Las barras de error indican el desvío estándar.

4.6.2. Conductividad hidráulica no saturada y distribución de tamaño de poros

En la figura 4.4 se muestra las CRH (izquierda) y las DTPO derivadas (derecha). En la figura 4.5 se muestran las funciones de $K(h)$ para las distintas fechas y tratamientos. El ajuste de los modelos bimodales fue adecuado tanto para las CRH como para la función de $K(h)$, con valores de RMSE entre 0,002 y 0,004 $m^3 m^{-3}$ para la CRH y entre 0,001 y 0,01 $cm h^{-1}$ para $K(h)$. En ambos tratamientos predominaron los poros de la matriz, con valores medios de w_1 entre 0,59 y 0,76. La presencia de un segundo sistema de poros estructurales en la CRH fue diferente según el tratamiento y la fecha de muestreo. En M, se observó una disminución del dominio estructural de poros a lo largo del período estudiado, mientras que en M_{CC} la forma bimodal fue menos marcada pero se mantuvo o se incrementó en el tiempo. En la figura 4.6 se observan los valores de P_E y P_M derivados de la DTPO. En las dos primeras fechas (CHA-B1 y CHA-CP₀), se observaron valores similares de P_E y P_M entre tratamientos, mientras que en CHA-CP_f la P_E fue mayor en M_{CC} que en M y la P_M fue mayor en M que en M_{CC}. Además, en M los valores de P_E y P_M se mantuvieron constantes durante el período estudiado, mientras que bajo M_{CC} se mantuvieron constantes entre CHA-B1 y CHA-CP₀, pero aumentaron entre CHA-CP₀ y CHA-CP_f. En M_{CC}, el incremento en P_E ocurrió a expensas de la P_M , generando un desplazamiento de h_{INT} hacia valores de poros mayores.

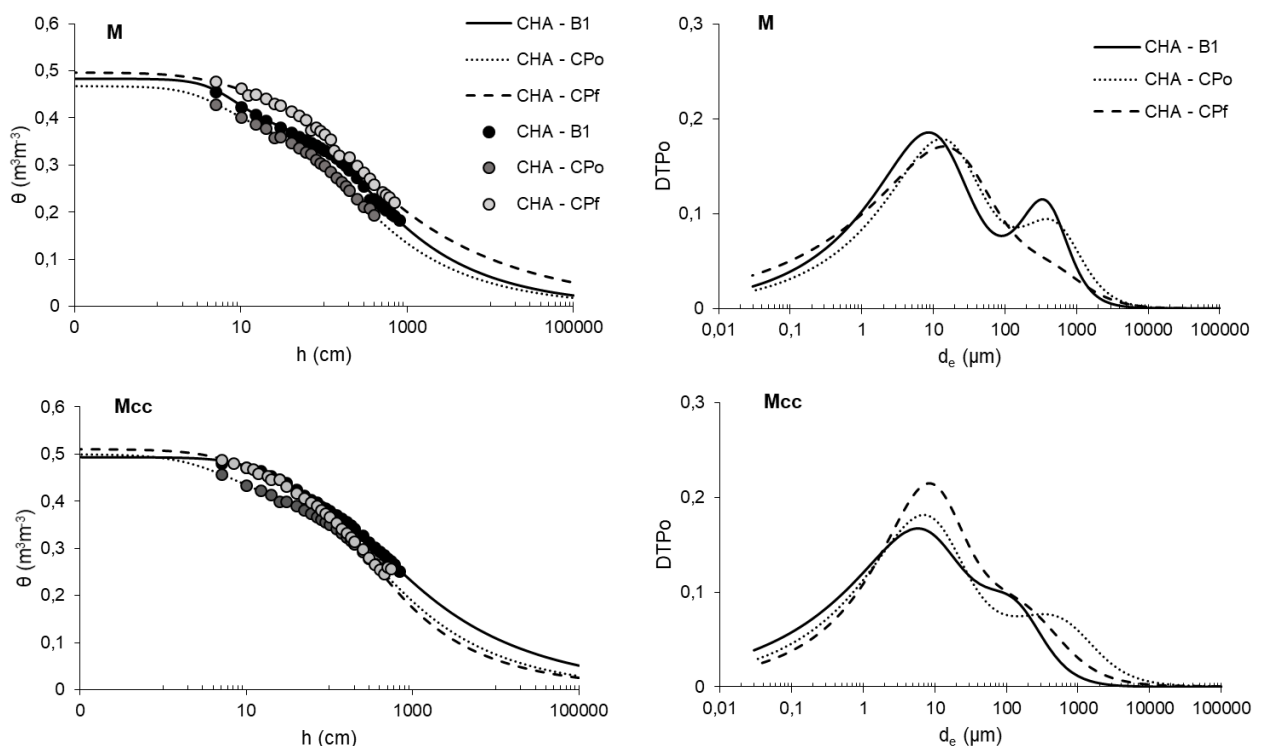


Figura 4.4. Evolución temporal de las curvas de retención hídrica (izquierda) y su respectiva distribución de tamaño de poros (DTPO) (derecha), para los distintos

tratamientos y en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f). Los puntos indican los valores medidos y las líneas los valores modelados mediante un ajuste bimodal. M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. θ = contenido de humedad, h = tensión, d_e = diámetro de poro equivalente.

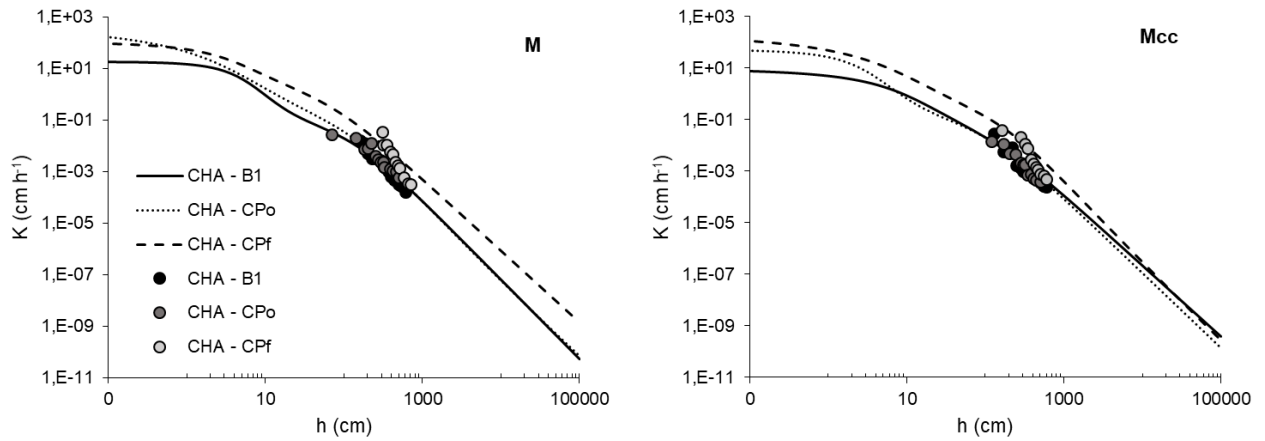


Figura 4.5. Valores de conductividad hidráulica (K) observados (puntos) y ajustados (curvas) a distintas tensiones de carga de agua (h) para los distintos tratamientos y en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC.

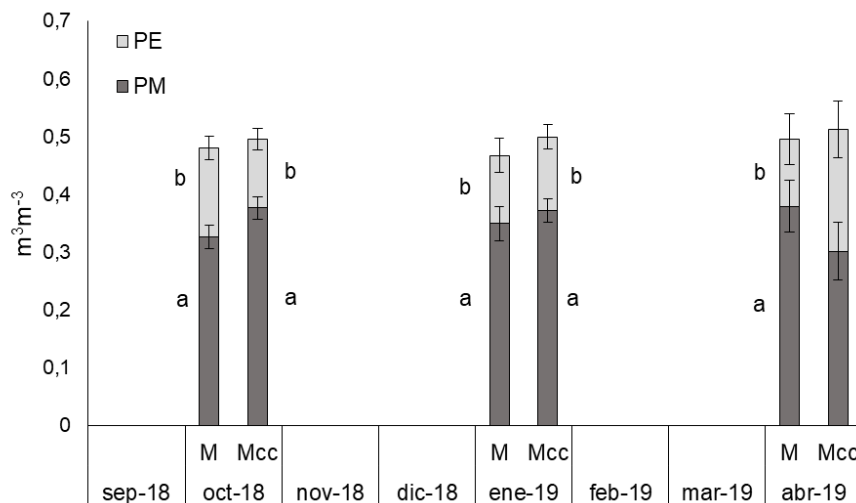


Figura 4.6. Porosidad estructural (P_E) y porosidad de la matriz (P_M) para los distintos tratamientos y en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Letras distintas indican diferencias significativas del factor fecha*presencia de CC (p -valor < 0,05). Las barras de error indican el desvío estándar para cada familia de poros.

Los valores de K_0 obtenidos a partir de los ajustes de las curvas de $K(h)$ fueron entre uno y dos órdenes de magnitud mayores que los valores de K_{0-MI} (Tabla 4.1). Por lo tanto, los valores de K_{0-MI} , K_{3-MI} y K_{6-MI} no fueron incluidos entre los datos

utilizados para el ajuste de las curvas de $K(h)$ como se había planteado originalmente. Sin embargo, K_0 y K_{0-MI} siguieron la misma tendencia temporal. En M, K_0 presentó un fuerte incremento entre CHA-B1 y CHA-CP_o, manteniéndose relativamente constante hasta CHA-CP_f. En M_{CC} el incremento de K_0 fue más gradual durante el período de estudio. En cuanto a las funciones de $K(h)$ (Figura 4.5), en ambos tratamientos se observaron valores relativamente constantes entre CHA-B1 y CHA-CP_o, y un incremento en CHA-CP_f, que fue más pronunciado en M que en M_{CC}. Los valores ajustados de K a $h = 0$ cm y a $h = 316$ cm se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores medios de la conductividad hidráulica saturada (K_0) y a 316 cm de tensión (h) obtenidos del ajuste de van Genuchten-Mualem a partir del método de evaporación simplificado en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f).

	Tratamiento	K_0 (cm h ⁻¹)	K (h=316 cm) (cm h ⁻¹)
CHA-B1	M	18 ±18	0,003 ±0,002
	M_{CC}	9 ±13	0,002 ±0,001
CHA-CP_o	M	469 ±703	0,002 ±0,003
	M_{CC}	53 ±56	0,002 ±0,001
CHA-CP_f	M	107 ±118	0,014 ±0,009
	M_{CC}	222 ±219	0,006 ±0,005

M = maíz, M_{CC} = maíz con CC.

4.6.3. Conectividad de la porosidad estructural

Los valores de CW_{PE} fueron similares para los distintos sistemas de manejo, y variaron en las distintas fechas de muestreo (Figura 4.7). En la primera fecha (CHA-B1), los valores de CW_{PE} fueron menores a los de las demás fechas, aumentaron en CHA-CP_o y se mantuvieron constantes en CHA-CP_f. Al igual que se observó para K_{0-MI} , si bien no hubo diferencias significativas entre sistemas de manejo, ambos tratamientos mostraron tendencias diferentes. En M_{CC} se produjo un incremento más gradual y continuo entre las tres fechas, mientras que en M se observaron valores menores en la tercera que en la segunda fecha (sin diferencias estadísticamente significativas).

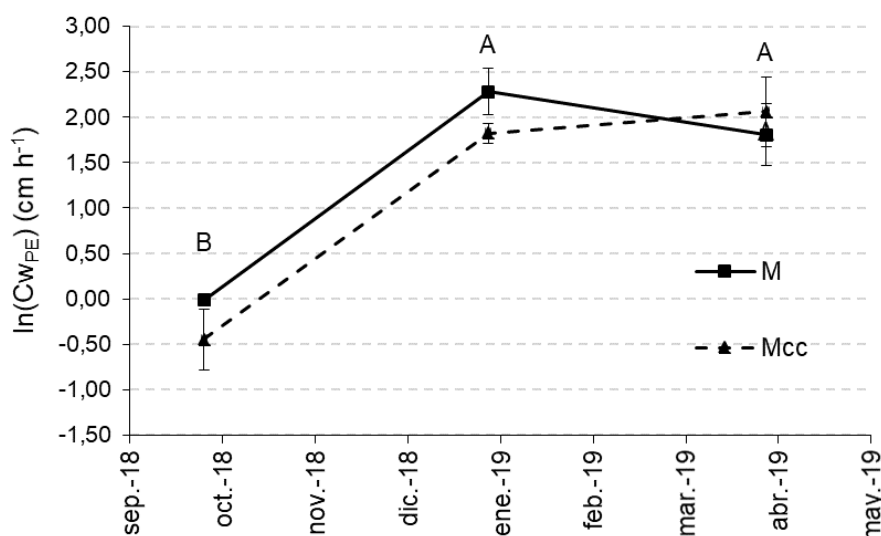


Figura 4.7. Valores medios de conectividad de la porosidad estructural (CW_{PE}) para los distintos tratamientos y en las distintas fechas de muestreo (CHA-B1, CHA-CP_o, CHA-CP_f). M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. Letras distintas indican diferencias significativas entre fechas (p -valor < 0,05). Las barras de error indican el desvío estándar para cada CW_{PE} .

En líneas generales, de los datos obtenidos se observaron cambios en la configuración y el funcionamiento del sistema poroso en el corto plazo después del primer ciclo de CC, mostrando una dependencia con el tiempo de las propiedades hidráulicas. Estos cambios se percibieron principalmente durante el crecimiento del cultivo de maíz. El abordaje empleado permitió identificar un incremento en el dominio estructural de poros después de la introducción de los CC, que a su vez se tradujo en un incremento en los valores de $K(h)$.

4.7. DISCUSIÓN

A los fines de caracterizar los efectos en el corto plazo de los CC sobre la configuración y funcionamiento del sistema poroso y su variabilidad temporal, se evaluó el efecto de un CC de cebada y vicia en un cultivo de maíz sobre la curva de $K(h)$, la bimodalidad del sistema poroso y la conectividad de los poros del dominio estructural, durante el primer año desde su implementación, incluyendo tres fechas: CHA-B1, durante el período de barbecho; CHA-CP_o: al inicio del cultivo de maíz sucesor; y CHA-CP_f: hacia el final del cultivo de maíz. Todas las variables estudiadas presentaron variabilidad temporal durante el período de estudio. Resultados similares fueron previamente reportados por otros autores, que mencionaron que las propiedades hidráulicas del suelo son muy variables en el tiempo, incluso dentro del ciclo de cultivo (Chandrasekhar et al., 2018). Los cambios en el funcionamiento del sistema poroso a escala estacional se relacionan principalmente con cambios en la actividad biológica del sistema radical (Gabriel et al., 2019).

En M, se observaron valores constantes de P_E (Figura 4.6) junto con una menor bimodalidad (Fig. 4.4). Resultados similares fueron reportados por

Kreiselmeier et al. (2019), que observaron que bajo SD, en comparación con otros sistemas de labranza, el suelo mostró cambios menores en la configuración y funcionamiento del sistema poroso, mientras que se observó una disminución en la bimodalidad durante el invierno. Sin embargo, estos autores mencionaron que poco después de la cosecha, se observó un restablecimiento del dominio de poros estructural como consecuencia del decaimiento de las raíces. En M_{CC} , tanto la P_E como la bimodalidad se mantuvieron relativamente constantes durante el barbecho (entre CHA-B1 y CHA-CP_o) y aumentaron hacia el final del cultivo de maíz (CHA-CP_f). Esto puede atribuirse al decaimiento de las raíces del CC, que puede llevar varios meses después de su terminación. Bodner et al. (2014) sugirieron que los CC compuestos de leguminosas tienden a incrementar la porosidad inter-agregados debido a que predominan las raíces gruesas en su sistema radical. En el mismo sentido, Bodner et al. (2008) mencionaron un incremento en el radio de poro ponderado por flujo en sistemas de manejo incluyendo CC, que atribuyeron a la estabilización de los poros pre-existentes y a la formación de nuevos poros tras el decaimiento de las raíces. Kreiselmeier et al. (2019) mencionaron que el decaimiento de las raíces al final del ciclo de cultivo tiene el potencial de contribuir a rasgos estructurales más heterogéneos y estables. Nuestros resultados concuerdan con varios autores que reportaron que los CC mejoran la estructura del suelo (Behrends Kraemer et al., 2017; Celette et al., 2008; Sastre et al., 2018; Villamil et al., 2006) y la macroporosidad (Bodner et al., 2014; Gabriel et al., 2019; Yu et al., 2016) debido a la actividad de sus raíces (Calonego et al., 2017). Otra posible explicación para esta diferencia en el comportamiento temporal de la P_E y la bimodalidad entre tratamientos es que la presencia de CC haya modificado los procesos de consolidación de la estructura al cambiar el contenido de humedad, los procesos de humedecimiento y secado, el flujo de agua y por lo tanto los procesos de expansión y contracción. A partir de datos medidos a campo el día de muestreo, el tratamiento M_{CC} presentó un mayor contenido de humedad en la capa de 0-10 cm de suelo en comparación con M. Adicionalmente, este suelo y los suelos de la región están compuestos mayoritariamente por arcillas illíticas que no son expansivas, por lo que los procesos de expansión y contracción, si existen, son menores (Taboada et al., 1998).

De los análisis estadísticos, no se observó efecto significativo de la presencia de CC sobre la K cercana a saturación (Figura 4.3). Sin embargo, los valores de K cercana a saturación mostraron un rápido incremento en M durante el período de barbecho (K_{0-MI} presentó un incremento de 8,7 veces entre CHA-B1 y CHA-CP_o), seguido de una disminución entre CHA-CP_o y CHA-CP_f (disminución de 0,53 veces). En M_{CC} , en cambio, el incremento fue continuo y de mayor magnitud (K_{0-MI} aumentó en un factor de 8,5 entre CHA-B1 y CHA-CP_o y de 1,8 entre CHA-CP_o y CHA-CP_f). Este comportamiento puede deberse a los ciclos de decaimiento de las raíces. En M, el decaimiento de las raíces del maíz del ciclo de cultivo anterior al inicio del ensayo pudo ocurrir durante el período de barbecho, incrementando la porosidad conductora de agua y por lo tanto K_{0-MI} , K_{3-MI} , K_{6-MI} entre CHA-B1 y CHA-CP_o (Figura 4.3). Por otra parte, en M_{CC} el aumento en la porosidad conductora de agua por el decaimiento de las raíces del maíz del ciclo anterior pudo verse disminuido por el taponamiento de los poros por las raíces del CC, resultando en un incremento menos pronunciado en K_{0-MI} entre CHA-B1 y CHA-CP_o (Bodner et al., 2008). Sanclan (2009) observó que la K_0 tiende a disminuir cuando el sistema radical es joven y aumenta tras el decaimiento de las raíces, generando porosidad conductora de agua. Además, hace falta tener en cuenta que estos resultados corresponden al primer año de manejo con CC. Por lo

tanto, la falta de diferencias estadísticamente significativas puede responder a la corta duración del experimento, junto con la variabilidad natural de $K(h)$.

La K no saturada obtenida en los experimentos de evaporación mostró una tendencia similar (Figura 4.5). Diferencias entre fechas y sistemas de manejo fueron observadas en la zona cercana a saturación (datos de mini-infiltración) y en el rango de h de los experimentos de evaporación. Esto se encuentra parcialmente en desacuerdo con varios trabajos que mencionan que el impacto del manejo en el flujo de agua se da principalmente en la zona cercana a saturación (Imhoff et al., 2010; Kreiselmeier et al., 2020; Lozano et al., 2013; Schwen et al., 2011a). Tanto M como M_{cc} presentaron mayores valores de $K(h)$ en la zona más seca de la curva en la fecha $CHA-CP_f$ que en fechas anteriores (Figura 4.5). Por otra parte, a pesar de que los valores de K_0 ajustados a partir de los datos de $K(h)$ obtenidos por el MES mostraron la misma tendencia que los datos de K_{0-MI} , los valores ajustados fueron entre uno y dos órdenes de magnitud mayores. Peters y Durner (2008) mencionaron que los valores y la forma de la curva de $K(h)$ obtenida por el MES en el rango más húmedo debe ser cuidadosamente interpretada. Adicionalmente, las diferencias entre K_0 y K_{0-MI} pueden ser parcialmente explicadas por los procesos de histéresis entre las dos metodologías, dado que en el método de evaporación se dan procesos de desorción de agua, mientras que en el método de mini-infiltración se determina la K durante el proceso de mojado. Durner (1994) mencionó que para suelos estructurados con un dominio de poros secundario, la determinación de la K cercana a saturación se ve dificultada por la presencia de macroporos, el aire entrampado y el efecto de la histéresis. A pesar de las dificultades para juntar ambos sets de datos, añadir medidas de K que representen el dominio estructural de poros y el flujo cercano a saturación resulta crucial para una descripción adecuada de la función de $K(h)$ (Weninger et al., 2018). En este sentido, la inclusión de datos de K cercana a saturación obtenidos en ensayos de mini-infiltración en los mismos cilindros de suelo puede ser un método útil, rápido y poco costoso para complementar los datos obtenidos mediante ensayos de evaporación (Soracco et al., 2019) y estudios futuros deberían enfocarse en alcanzar un acuerdo entre los datos medidos por distintos métodos y los valores estimados.

De los datos de los experimentos de evaporación se observó que en los dos sistemas de manejo ocurrió un incremento en $K(h)$ hacia el final del cultivo de maíz ($CHA-CP_f$). Estos resultados están en desacuerdo con lo reportado por Kreiselmeier et al. (2020) que no observaron diferencias en la K medida a 100, 316 y 1000 cm de h durante el ciclo de cultivo bajo SD. Los resultados obtenidos muestran también que la $K(h)$ puede verse limitada como resultado de la oclusión de los poros por parte de las raíces, resultando menor en sistemas de manejo con CC, dado que M_{cc} presentó menores valores de K a $h=316$ cm que M hacia el final del cultivo de verano (Tabla 4.1). Bodner et al. (2014) observaron que las raíces finas utilizan los poros pre-existentes para penetrar en el suelo, estabilizando la estructura pero disminuyendo a la vez el espacio poroso. Los valores de C_{wPE} mostraron una tendencia similar a K_{0-MI} (Figura 4.7). Una vez más, el rol del crecimiento y decaimiento de las raíces es crucial para la conectividad de poros, mostrando que la actividad biológica es un factor determinante en la formación de poros (Jirků et al., 2013; Villarreal et al., 2020). Imhoff et al. (2010) mencionaron la importancia de incluir una alta proporción de gramíneas con raíces abundantes en la rotación de cultivos, con el fin de mejorar la conectividad y continuidad de los poros. La variación temporal en C_{wPE} muestra que la dinámica del funcionamiento del sistema poroso dentro del ciclo del cultivo puede ser compleja

y depende del cultivo en crecimiento y de las condiciones climáticas (Jirků et al., 2013), por lo que los resultados no pueden ser fácilmente extrapolados. A pesar de la falta de diferencias significativas durante el período estudiado, hace falta mencionar que C_{WPE} , al igual que ocurrió con K_{0-MI} , presentó un incremento más continuo en M_{CC} (C_{WPE} aumentó 9,2 veces entre CHA-BF y CHA-CP_o y 1,5 veces entre CHA-CP_o y CHA-CP_f). En M, por otra parte, C_{WPE} aumentó más rápidamente entre CHA-BF y CHA-CP_o (en un factor de 11,6 veces), y luego tendió a disminuir entre CHA-CP_o y CHA-CP_f. Este comportamiento puede estar relacionado con una mayor estabilidad de la estructura porosa al incluir CC. Se ha reportado previamente que los mucilagos y exudados de las raíces de los CC estabilizan la estructura en períodos cortos de tiempo (Baumert et al., 2018; Naveed et al., 2017).

En líneas generales, estos resultados muestran que la inclusión de CC en la secuencia de cultivos en el suelo estudiado promueve la consolidación de un sistema de poros secundario, que se hace más evidente hacia el final del siguiente cultivo de verano. Este comportamiento sugiere un taponamiento parcial por parte de las raíces del CC durante el invierno que perdura algunos meses hasta el decaimiento de las raíces del CC (Bodner et al., 2008), momento en el que se produce un incremento en la P_E . En este sentido, los CC pueden mejorar el desempeño de la SD, mejorando la estructura y la estabilidad estructural en la capa de 0-5 cm de suelo durante el primer año. Estos resultados están en desacuerdo con otros trabajos en los que se observó un impacto negativo en la estructura del suelo y en las propiedades físicas e hidráulicas en el corto plazo tras la inclusión de CC (Jensen et al., 2020). Los CC pueden ser empleados como medida preventiva para evitar la compactación de los suelos (Bodner et al., 2014), que es uno de los principales impactos negativos de la SD en la Región Pampeana. Por otra parte, estos resultados resaltan la importancia de incluir el estudio de la variabilidad temporal de las propiedades hidráulicas y de la configuración del sistema poroso a la hora de evaluar el efecto de prácticas de manejo como la inclusión de CC, especialmente en el corto plazo. Además, para la caracterización de suelos agrícolas bajo condiciones meteorológicas estándar, en las que las condiciones de saturación solo cumplen un rol menor, el estudio de la K no saturada resulta esencial (De Pue et al., 2019; Kreiselmeier et al., 2020). Este tipo de estudios resulta útil para mejorar el uso y desarrollo de modelos para predecir la evolución del funcionamiento del sistema poroso (Kreiselmeier et al., 2019).

4.8. CONCLUSIONES

La introducción de CC en un cultivo de maíz bajo SD produce un desplazamiento en la DTPo, desde la matriz hacia poros estructurales, en comparación con un barbecho desnudo.

La introducción de CC en un cultivo de maíz bajo SD no modifica significativamente la conectividad de los poros estructurales en comparación con un barbecho desnudo, pero incrementa la K no saturada durante el primer año desde su inclusión.

La porosidad estructural es un indicador de CFS útil para determinar el efecto en el corto plazo de los CC, dado que refleja un sub-sistema de poros más sensible a las prácticas de manejo.

CAPÍTULO 5 – Efecto de los cultivos de cobertura sobre el contenido de agua en el suelo

5.1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua de calidad para el crecimiento de los cultivos es un problema que nace con la agricultura, y que genera una preocupación creciente con el aumento de la población mundial y la expansión e intensificación de la agricultura (Lascano, 1991; Ventrella et al., 2019). En el actual contexto de cambio climático, donde son cada vez más frecuentes los eventos climáticos extremos incluyendo tanto períodos de sequía como de inundaciones, el uso eficiente del recurso agua se ha tornado uno de los desafíos principales de la agricultura moderna (Alfonso et al., 2020; IPCC, 2022; Ventrella et al., 2019). Por otra parte, una de las principales limitaciones a la adopción de los CC reside en la preocupación de los productores sobre el impacto de esta práctica en la disponibilidad de agua para el cultivo siguiente (Adetunji et al., 2020; Basche et al., 2016; Chakraborty et al., 2022; Pinto et al., 2017). Además, se plantea el interrogante de si el empleo generalizado de CC en el largo plazo puede llegar a afectar la recarga de las napas amenazando la disponibilidad de agua dulce e incrementando el riesgo de contaminación de aguas y suelo (Tribouillois et al., 2022; Ward et al., 2012). En general, en los sistemas productivos de la Región Pampeana se mantienen largos períodos de barbecho desnudo durante el invierno, con el objetivo de capturar agua en el suelo para el siguiente cultivo de verano. Sin embargo, en la bibliografía no existe consenso sobre el efecto de los CC en el contenido de agua para el siguiente cultivo de renta y existen pocos trabajos que se centren en el efecto de los CC en la dinámica hídrica en climas templados (Meyer et al., 2020; Novara et al., 2022).

En la tabla 5.1 se resumen los principales resultados de distintos trabajos que evalúan el efecto de los CC sobre el balance y contenido hídrico en el suelo. Delgado et al. (2020) reportaron que los CC pueden generar un déficit de agua para el siguiente cultivo de renta que puede ocasionar mermas en el rendimiento, especialmente en climas áridos o semi-áridos, debido principalmente al consumo de agua almacenada. Meyer et al. (2020) reportaron que la inclusión de trébol (*Trifolium incarnatum* L.) y mostaza (*Brassica carinata* L.) como CC de invierno puede reducir el contenido de agua para el cultivo siguiente en un suelo limoso en clima templado, pero que este efecto puede reducirse adelantando la fecha de terminación del CC. De manera similar, Restovich et al. (2012) estudiaron el efecto de distintas especies de CC en un Argiudol típico franco limoso de la Región Pampeana, y observaron que los CC generaron una disminución en el contenido hídrico en los primeros 30 cm durante su crecimiento, en 4 de los 5 años estudiados (a excepción de un año excepcionalmente seco, en el que no se observaron diferencias entre tratamientos). La magnitud de esta disminución dependió de la especie, la fecha de terminación y la producción de biomasa. Sin embargo, estos autores reportaron que esta disminución se vio revertida por las lluvias antes de la siembra del cultivo principal (CP) en años normales o húmedos. Resultados similares fueron reportados por Basche et al. (2016) para un CC de centeno (*Secale cereale* L.) y por Alfonso et al. (2020) para un CC de avena

(*Avena sativa* L.) en suelos francos, quienes reportaron que la disminución en el contenido de agua debida al consumo de agua por parte del CC desapareció para la fecha de siembra del siguiente cultivo de renta en 5 de los 7 años estudiados (incluyendo años con primaveras secas y húmedas), gracias a las lluvias que ocurren entre la terminación del CC y la siembra del CP. Rimski-Korsakov et al. (2015) recopilaron los resultados de más de veinte estudios realizados en la Región Pampeana, concluyendo que los CC producen una disminución en el contenido de agua a la siembra del CP, de mayor magnitud en regiones húmedas que en regiones semi-áridas. Sin embargo, en casos en los que el tiempo transcurrido entre la terminación del CC y la siembra del siguiente cultivo de renta fue mayor a dos meses, estos autores no observaron diferencias significativas en el contenido de agua a la siembra del CP. Asimismo, Ward et al. (2012) no observaron cambios en el contenido hídrico por la presencia de CC en un clima mediterráneo. Daigh et al. (2014a) reportaron que la presencia de CC en rotaciones de soja-maíz no tuvo impacto negativo en el contenido de agua durante un período de sequía, mientras que en años más húmedos en los que la biomasa del CC fue mayor, el contenido de humedad y el almacenaje de agua aumentó durante el crecimiento del cultivo de renta. En este sentido, diferentes autores indicaron que los CC pueden, al aumentar la cobertura, la agregación o el contenido de materia orgánica, incrementar la capacidad del suelo para captar y almacenar agua (Basche et al., 2016; Daigh et al., 2014a). En un suelo arcilloso, Mubvumba et al. (2021) observaron que un CC de verano en un cultivo de trigo disminuyó el agua almacenada en el suelo durante su crecimiento, y que esta disminución fue mayor en años húmedos, debido a un mayor crecimiento del CC y por lo tanto mayor consumo de agua. Además, estos autores observaron que la disponibilidad de agua para el cultivo de renta varió según las precipitaciones recibidas y el tiempo transcurrido entre la terminación del CC y la siembra del CP. Chalise et al. (2019) reportaron un mayor contenido de agua en los primeros 15 cm durante el crecimiento del CP en presencia de un CC de centeno y vicia (*Vicia villosa* Roth) que bajo un barbecho desnudo, en un Hapludol limoso. Esta diferencia fue atribuida a mejores rasgos estructurales en lotes con CC, que mejoraron la capacidad de captar, transmitir y almacenar agua. Asimismo, Williams y Weil (2004) observaron que el material vegetal aportado por un CC de centeno disminuyó la evaporación de agua desde la superficie, lo que resultó en un mayor contenido de agua en los primeros 20 cm de suelo durante la primera mitad del crecimiento del CP, en un año particularmente seco en Ultisoles franco limosos.

Tabla 5.1. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el contenido y la dinámica hídrica en comparación con un barbecho desnudo en la literatura revisada.

Artículo	Clima	PMA (mm)	Tipo de suelo	Textura	Labranza	CC	Duración del CC (meses)	t _{CC-CP}	Otros factores evaluados	Principales resultados y conclusiones
Tribouillois et al. (2022)	*	757	*	*	LC	V	> 2	*	- duración del CC	<ul style="list-style-type: none"> - Los CC tienen un efecto menor en el balance hídrico a nivel de cuenca. - Los CC generan una disminución en el drenaje acompañada de un aumento en la evapotranspiración durante el barbecho, de mayor magnitud en CC de larga duración. - Los CC de corta duración no modifican significativamente el balance hídrico anual. - Diversificar las rotaciones incluyendo cultivos con menor requerimiento de agua compensaría el efecto de incluir CC de larga duración.
Chakraborty et al. (2022)	Semi-árido	620	Haplustol	franco arcillo limoso	SD	centeno	6	3 días	- años con distintas precipitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Los CC generaron una disminución de entre 7 y 17 % en el contenido de agua a la siembra del CP. - Las lluvias recargaron el perfil durante el crecimiento del CP, resultando en mayor contenido de agua en CC en 2 de los 3 años, lo que se atribuyó a un mayor contenido de materia orgánica y a mejores rasgos estructurales. - Los CC disminuyeron los valores de tensión en el suelo, indicando una mayor disponibilidad de agua para los cultivos.

Mubvumba et al. (2021)	*	711	Pachic Paleustol	franco arcilloso	SD	multi-especie (gramíneas y leguminosas)	2-3	1-2 meses	- años con distintas precipitaciones - pastoreo	- La presencia de CC de verano en un cultivo de trigo disminuyó el agua almacenada en el suelo a partir de los 40-50 días de su siembra. - En años con mayores precipitaciones se produjo un mayor crecimiento del CC, lo que resultó en un mayor consumo y un menor contenido de agua durante su crecimiento. - Los CC produjeron una disminución en el contenido de agua de por lo menos 26 % a la terminación del CC. - La disponibilidad de agua para el cultivo de renta varió según las precipitaciones recibidas y el tiempo transcurrido entre la terminación del CC y la siembra del CP, pudiendo resultar en menores o mayores contenidos de agua al momento de la siembra del CP.
Alfonso et al. (2020)	Templado húmedo	917	Argiudol + Paleudol (mezcla)	franco	SD	avena	4-5	12-15 días	- fecha de terminación	- Los CC redujeron el agua disponible a la fecha de terminación del CC (siendo este efecto mayor para CC de mayor duración y en un año más seco). - Este efecto se vio revertido por las lluvias después de terminado el CC, y los CC tuvieron un efecto menor en la disponibilidad de agua para el cultivo siguiente. - Los residuos de los CC redujeron la evapotranspiración durante el cultivo siguiente.
Meyer et al. (2020)	Templado	655	*	arcillolimoso/limoso	SD/ LC	mostaza + trébol	3-8	0-5 meses	- fecha de terminación - incorporación al suelo	- Los CC reducen el drenaje. - Los CC pueden reducir el contenido de agua para el CP. - Este efecto es menor si se adelanta la fecha de terminación.

Chalise et al. (2019)	*	*	Hapludoles	limoso/ franco limoso	SD	centeno + vicia	*	*	- manejo de los residuos del CP.	- Los CC incrementaron el contenido de agua en comparación con un barbecho desnudo, observándose diferencias en las capas de 0-5 y 5-15 cm, dependiendo de la fecha analizada. - Las diferencias observadas se atribuyeron principalmente a una mayor infiltración y capacidad de almacenaje de agua en los lotes con CC. - Los CC no tuvieron efecto sobre el contenido de agua en la capa de 15-30 cm.
Krstić et al. (2018)	Continental / semi-árido	610	V	V	LC	viaja, triticales y mezcla	7	1-5 días	- años con distintas precipitaciones - distintos CC	- Los CC disminuyeron el agua acumulada durante su crecimiento. - En años secos, este efecto fue más pronunciado y tuvo un impacto negativo en el rendimiento del CP. - En años húmedos, las diferencias tendieron a desaparecer durante el crecimiento del CP.
Pinto et al. (2017)	Templado	600-1200	V	V	*	V	V	V	- duración del CC	- El uso de CC de entre 3 y 5 meses de duración tuvo un impacto menor sobre el contenido de agua a la siembra del CP. - La duración óptima del CC incrementó con las precipitaciones promedio en el período de barbecho.
Basche et al. (2016)	Templado	954	Endoaquel típico y Hapludol ácuico	limoso	SD	centeno	5-8	1-26 días	- años con distintas precipitaciones	- Los CC pueden provocar una disminución en el contenido de agua en superficie hacia su terminación, que sin embargo la mayoría de los años se vio compensada antes de la fecha de siembra del CP. - Los CC incrementan el contenido de agua en profundidad, al incrementar la capacidad de almacenaje de agua (ADP, FC).

Rimski-Korsakov et al. (2015)	Templado húmedo/ sub-húmedo/ semi-árido	500-1200	Molisoles	V	*	V	*	*	- diferentes estudios - región húmeda y semi-árida	- Los CC disminuyeron el contenido de agua hacia la siembra del siguiente cultivo de renta; esta disminución fue mayor en la región húmeda que en la región semi-árida pampeana. - Esta disminución en el contenido de agua dejó de ser significativa si el CC se terminó dos o más meses antes de la siembra del CP.
Daigh et al. (2014a)	*	847-1186	Molisoles-Alfisoles	franco arcillosos / franco limosos	*	centeno	6	1-2 meses	- distintos sitios / suelos	- Durante un período de sequía, la presencia de CC en rotaciones de soja-maíz no tuvo impacto negativo en la conservación de agua. - En casos en los que la biomasa del CC fue mayor, los CC incrementaron el contenido de humedad y el almacenaje de agua tanto durante el crecimiento del CC, como tras su terminación y durante el crecimiento del CP.
Daigh et al. (2014b)	*	*	Endoaquol y Hapludol	franco arcillosos / franco arcillosos arenosos	SD	centeno	6-7	días	- años con distintas precipitaciones	- La presencia de CC disminuyó la intensidad de los eventos de drenaje y el agua drenada acumulada en comparación con el barbecho desnudo en cultivos de maíz, debido principalmente a un mayor consumo de agua por las raíces. - La presencia de CC incrementó el tiempo hasta el inicio del drenaje, debido a un incremento en la Dap y una disminución en K ₀ que se atribuyó a la compactación por el tránsito adicional. - Las diferencias se observaron tanto en años secos como húmedos.

Ward et al. (2012)	Mediterráneo	360	*	V	*	V	*	*	- distintos manejos	- Los CC tuvieron efectos mixtos en la evapotranspiración y el drenaje profundo, tanto tras su finalización como durante el CP. - El efecto de los CC fue estacional, de corto plazo, y de mayor magnitud en los días siguientes a lluvias abundantes, donde generalmente redujeron la evapotranspiración.
Restovich et al. (2012)	Templado	971	Argiudol típico	franco limoso	SD	V	4-7	6-60 días	- años con distintas precipitaciones - distintos CC	- Los CC generaron una disminución en el contenido hídrico en los primeros 30 cm, cuya magnitud dependió de la especie cultivada, la fecha de terminación y la producción de biomasa. - Generalmente, esta disminución se vio revertida por las lluvias antes de la siembra del CP. - El consumo de agua de capas más profundas por parte del CC fue mínimo.

PMA = Precipitación media anual; t_{CC-CP} = Tiempo transcurrido entre el CC y el cultivo principal (CP); V = Varios; * = No se especifica; CP = Cultivo principal; Dap = Densidad aparente; K_0 = Conductividad hidráulica saturada; ADP = Agua disponible para la planta; FC = Contenido de agua a capacidad de campo. SD = siembra directa; LC = labranza convencional.

De lo anterior se desprende que el efecto de los CC sobre el contenido hídrico puede ser variable y se ve sujeto a la interacción entre distintos factores como ser el manejo del CC, las especies empleadas, el tipo de suelo y el clima (Pinto et al., 2017). Esto es esperable considerando que los CC pueden tener efectos variables sobre los distintos procesos que regulan el balance hídrico (evapotranspiración, drenaje, escorrentía), así como sobre las propiedades físicas que regulan el movimiento y el almacenaje de agua, como se ha evidenciado en los capítulos anteriores. En líneas generales se espera que los CC disminuyan la evaporación y la escorrentía, dado que tanto la presencia de vegetación viva como los residuos sobre el suelo reducen la velocidad del viento y del agua en la superficie del suelo y disminuyen la radiación solar absorbida, a la vez que se incrementa la transpiración durante el barbecho (Alfonso et al., 2020; Daigh et al., 2014a; Gabriel et al., 2019). Novara et al. (2021) reportaron que en ecosistemas mediterráneos los CC pueden reducir la escorrentía e incrementar la evapotranspiración durante el barbecho, generando un mejor desempeño en las zonas más lluviosas, donde la escorrentía es más relevante. Alfonso et al. (2020) observaron que la presencia de rastrojos del CC redujo la evapotranspiración durante el CP, en comparación con el tratamiento que venía de un barbecho desnudo. Ward et al. (2012) observaron que los CC en un clima mediterráneo pueden tener efectos variables sobre la evapotranspiración. Según estos autores, los CC generalmente incrementaron el contenido de agua a la fecha de terminación, lo que a su vez se tradujo en mayor evapotranspiración durante el crecimiento del CP, mientras que los residuos de los CC redujeron la evapotranspiración en los días inmediatamente posteriores a lluvias abundantes. Por otra parte, al consumir agua para su crecimiento los CC pueden reducir el drenaje profundo. Daigh et al. (2014b) observaron una reducción en la intensidad de los eventos de drenaje y en la cantidad de agua drenada total en un CC de centeno en comparación con el barbecho desnudo. Estos resultados fueron atribuidos al mayor consumo de agua por las raíces del CC, y a un incremento en la densidad aparente y una disminución en la conductividad hidráulica saturada (K_0) debidos a la compactación por el tránsito adicional. Tribouillois et al. (2022), a partir del modelado del movimiento de agua bajo diferentes condiciones de manejo, estimaron que los CC generalmente disminuyen el drenaje durante su crecimiento, pero pueden aumentar el drenaje en algunos meses, lo que resulta en un efecto menor en el drenaje medio anual.

Por otra parte, la cantidad de agua que infiltra, se evapora o drena no solo depende del clima y la vegetación, sino también de la configuración del sistema poroso, de su geometría, conectividad y distribución de tamaño de poros. Por lo tanto, los CC pueden modificar el balance hídrico a través de cambios en las propiedades físicas e hidráulicas que determinan la capacidad de almacenaje de agua, su disponibilidad para los cultivos y su movilidad en el suelo. Varios autores observaron que los CC pueden incrementar el contenido de agua a capacidad de campo (FC) y el agua disponible para la planta (ADP) en comparación con un barbecho desnudo (Basche y DeLonge, 2017; Basche et al.; 2016; Qi et al.; 2011). Basche et al. (2016) notaron que los CC incrementaron el almacenaje de agua en profundidad (capa de 15-30 cm) tanto en años secos como húmedos, como resultado de mejoras en las propiedades físicas (mayor porosidad de almacenaje de agua) e hidráulicas (mayor

infiltración y conductividad hidráulica, K). Gabriel et al. (2019) observaron una mayor capacidad de infiltración y almacenaje de agua en profundidad (entre los 20 y 80 cm) en presencia de CC, debido a mayor micro y macro porosidad en un suelo con mejores rasgos estructurales, que podía compensar el consumo de agua por parte del CC. De manera similar, Chalise et al. (2019) registraron mayor contenido de agua durante el período de crecimiento del CP en lotes con CC, que atribuyeron a mejores rasgos estructurales (y como consecuencia mayor infiltración y capacidad de almacenaje de agua) como resultado de la protección que genera mantener el suelo cubierto. Sin embargo, estos autores solo observaron diferencias significativas en los primeros 15 cm de suelo. En este trabajo de tesis, se observó que los CC pueden afectar el ADP y el FC, generando tanto incrementos como disminuciones en estos indicadores en comparación con un barbecho desnudo, dependiendo de la rotación del cultivo principal, la duración del ensayo y el tipo de suelo. También se observó que los CC tienen un efecto variable sobre la conductividad hidráulica saturada (K_0) pudiendo generar incrementos, ningún efecto o disminuciones. En el caso del sitio Chascomús, para el que se evalúa el contenido de agua en este capítulo, se observó mayor ADP y mayor K_0 para el tratamiento con CC, en comparación con el barbecho desnudo.

Por lo tanto, pueden observarse efectos variables de los CC sobre la dinámica hídrica, siendo necesario un estudio más profundo del efecto de los CC sobre el contenido de humedad bajo distintas condiciones edáficas y climáticas. La mayoría de los trabajos que evalúan el efecto de los CC sobre el contenido y balance hídrico emplean un número limitado de medidas de humedad (por ejemplo, tomadas semanal o mensualmente) (Alfonso et al., 2020; Chalise et al., 2019; Krstić et al., 2018; Meyer et al., 2020; Mubvumba et al., 2021; Ward et al., 2012; Williams y Weil, 2004). Sin embargo, el movimiento del agua en el suelo es un proceso continuo que merece ser estudiado en distintas escalas de tiempo. Por ejemplo, para conocer el proceso de recepción y redistribución del agua después de un evento de precipitaciones, resulta interesante conocer el contenido de humedad a distintas profundidades a las horas o incluso minutos de iniciado el evento. En este sentido, el uso de sensores de humedad ubicados de manera permanente en el suelo es un método no-destrutivo que permite obtener un continuo de medidas de contenido de agua (Kutilek y Nielsen, 1994; Chakraborty et al., 2022). Por otra parte, la dificultad para cuantificar los distintos procesos que contribuyen al balance hídrico (como ser el drenaje profundo, la escorrentía, la transpiración y la evaporación) lleva en muchas ocasiones al uso de modelos de simulación (Lascano, 1991). El uso de herramientas de modelado permite estimar el flujo de agua debido a distintos procesos que resultan difíciles de medir a campo, así como estimar indicadores útiles para optimizar la eficiencia en el uso del agua (Meyer et al., 2020). Existen diferentes softwares diseñados para modelar el movimiento de agua en el suelo, con distintos niveles de complejidad y que hacen foco en distintos procesos o escalas (Ventrella et al., 2019). En particular el Hydrus-1D es un software que permite modelar el movimiento de agua, calor y solutos en el suelo en distintos estados de saturación, que fue usado y validado en múltiples aplicaciones (Ventrella et al., 2019). Sin embargo, los modelos son representaciones simplificadas de la realidad y deben ser usados con precaución (Lascano, 1991). La validación de las herramientas de modelado bajo distintas condiciones sitio-específicas y condiciones de modelación, empleando valores medidos a campo para comparar, es

crucial para poder extender el uso de estos modelos (Lascano, 1991). Meyer et al., (2020) combinaron medidas tomadas durante dos años en un experimento a campo con simulaciones, lo que les permitió concluir que los CC reducen el drenaje en comparación con un barbecho desnudo, y que pueden disminuir significativamente el contenido de agua, aunque este efecto puede verse drásticamente reducido al adelantar la fecha de terminación. Tribouillois et al. (2022) simularon el efecto de CC de distinta duración a escala de cuenca en una región con déficit hídrico. Estos autores observaron que los CC disminuyen el drenaje e incrementan la evapotranspiración durante el barbecho, pero no generan mayores cambios en el drenaje anual ni en el contenido hídrico. Chakraborty et al. (2022) combinaron el uso de sensores de humedad y tensión a campo con el uso de Hydrus-1D para evaluar el efecto de los CC sobre el contenido y disponibilidad de agua en comparación con un barbecho desnudo en un Haplustol franco arcillo limoso. Estos autores, observaron que el uso de CC resultó en iguales o menores valores de tensión (h) en el suelo, lo que implica un mayor contenido y/o disponibilidad de agua para el CP. Yu et al. (2016) midieron el efecto de distintas especies de CC en la curva de conductividad hidráulica (K(h)), y luego emplearon el Hydrus-2D para simular como estos cambios afectarían a la escorrentía ante diferentes intensidades de lluvia, aunque estos autores no compararon con un barbecho desnudo.

Por otra parte, los modelos de simulación como el Hydrus emplean datos descriptivos de las propiedades físicas e hidráulicas (como ser parámetros de la curva de retención hídrica, CRH, y de K(h)) para simular el comportamiento del agua en el suelo, que deben ser estimados de manera precisa para lograr una simulación adecuada del flujo de agua a escala de campo (Angulo-Jaramillo et al., 2019; Ventrella et al., 2019). En este sentido, el uso de ajustes más precisos de la CRH puede mejorar el desempeño de las simulaciones. Como se mencionó en el capítulo anterior, muchas veces en suelos estructurados ocurre una distribución de tamaño de poros con dos dominios de poros principales, que puede ser descripta de manera más precisa empleando ajustes bimodales de la CRH (Schwen et al., 2014). El uso de los parámetros obtenidos mediante ajustes bimodales en la simulación del balance hídrico podría mejorar la precisión de la simulación. Por otra parte, la determinación de la CRH y de la curva de K(h) puede ser difícil, costosa o demandante de tiempo (Lassabatère et al., 2006; Siltecho et al., 2015; Ventrella et al., 2019). Con el fin de extender el uso de modelos en situaciones en las que no se haya logrado determinar los parámetros físicos e hidráulicos de manera directa, una aproximación común es el uso de funciones de pedotransferencia que permiten estimar los parámetros faltantes a partir de otras características del suelo más fáciles de determinar, como la densidad aparente y la textura (Ventrella et al., 2019). Sin embargo, una de las principales limitaciones de las funciones de pedotransferencia radica en que generalmente se basan en la distribución del tamaño de partículas, pero no incluyen mayor información sobre la estructura del suelo, que resulta determinante para las propiedades hidráulicas (Siltecho et al., 2015). Una aproximación relativamente reciente que se perfila como una herramienta robusta y sencilla para la estimación de los parámetros hidráulicos es el método BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters*) (Lassabatère et al., 2006). Este método combina funciones de pedotransferencia con modelos de infiltración, y permite una caracterización física e hidráulica del suelo al

estimar la curva de $K(h)$ y la CRH completas, a partir de una serie de datos limitada y relativamente fáciles de obtener (Castellini et al., 2018; Lassabatère et al., 2006). El BEST emplea la distribución de tamaño de partículas para estimar la forma de las curvas, y datos de infiltración a 0 cm de h para estimar los parámetros de escala de las mismas (Lassabatère et al., 2006). El método BEST fue probado en distintos suelos y contrastado con datos obtenidos mediante diversas metodologías a campo y laboratorio, y se posiciona como un método fácil, robusto y de bajo costo para caracterizar el comportamiento hidráulico de los suelos (Angulo-Jaramillo et al., 2019; Castellini et al., 2018; Lassabatère et al., 2006). Sin embargo, las comparaciones con métodos estandarizados, y en particular con el método de evaporación simplificado (MES), son aún escasas, especialmente en Argentina. La validación en un mayor número de suelos y bajo distintas condiciones climáticas y de manejo es también necesaria (Angulo-Jaramillo et al., 2019). Castellini et al. (2018) compararon parámetros de la CRH obtenidos mediante el método BEST con parámetros estimados a partir de las curvas obtenidas mediante el MES. Estos autores observaron que el BEST logró reproducir correctamente, aunque subestimando los valores, las CRH de tres de los cuatro suelos estudiados. Siltecho et al. (2015), realizaron simulaciones con Hydrus-1D empleando como parámetros de entrada parámetros de la CRH obtenidos mediante distintos métodos, incluyendo entre otros el MES y el BEST, destacando que cualquier set de datos fue útil a la hora de modelar el balance hídrico.

El uso adecuado de las herramientas de simulación requiere de su validación en diferentes condiciones climáticas, edáficas y de manejo. El estudio a campo de la dinámica hídrica bajo distintas prácticas de manejo es fundamental para poder optimizar la eficiencia en el uso de agua. Más aún, un mayor conocimiento del efecto de los CC sobre el contenido de agua en el suelo es necesario para poder evaluar el efecto de la introducción de esta práctica.

5.2. HIPÓTESIS

1- Los CC, en comparación con un barbecho desnudo, generan condiciones que permiten un mayor contenido de agua al momento de la siembra y durante el crecimiento del CP en un Argiudol típico bajo SD.

2- El uso de parámetros hidráulicos obtenidos mediante el método BEST permite una simulación adecuada de la dinámica hídrica mediante el software Hydrus-1D, comparable con la simulación hecha a partir de parámetros obtenidos mediante el MES.

5.3. OBJETIVOS

1- Evaluar el efecto de los CC sobre el contenido de agua durante el ciclo de cultivo, en relación a un barbecho desnudo, después del primer año de su introducción en un Argiudol típico bajo SD de la Región Pampeana.

2- Evaluar la capacidad predictiva de las simulaciones de la dinámica hídrica realizadas con Hydrus-1D en relación al efecto de los CC, comparando el desempeño al utilizar parámetros obtenidos mediante ajustes bimodales de la CRH obtenida mediante el MES y de parámetros estimados mediante el método BEST.

5.4. MATERIALES Y MÉTODOS

5.4.1. Sitio de estudio y tratamientos

Se evaluó el contenido de agua en el suelo en el sitio Chascomús (CHA) en el período comprendido entre el 3/4/2019 (coincidente con la fecha de muestreo al final del cultivo de maíz, CHA-CP_f) y el 20/04/2020 (hacia el final del cultivo de soja del siguiente ciclo de cultivo, y aproximadamente un mes antes de su cosecha), en los dos tratamientos: barbecho desnudo (M) y barbecho con CC (M_{CC}), descriptos en el capítulo 1.

5.4.2. Monitoreo de humedad a campo

Para monitorear el contenido de agua en el suelo se emplearon sensores de humedad de capacitancia (sensores ECH₂O EC-5, Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, EEUU) que registran el contenido volumétrico de agua (θ) [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$], previa calibración en laboratorio según el fabricante. Se hizo un pozo y se insertaron los sensores en las paredes del mismo, paralelos a la superficie del suelo y en el horizonte A, a 5 y 15 cm de profundidad (Figura 5.1). Dado el volumen de exploración de los sensores, y asumiendo el θ homogéneo dentro de cada capa, las medidas dadas por los sensores a 5 y 15 cm de profundidad se consideraron representativas del θ en las capas de 0-10 y 10-20 cm, respectivamente. Se insertaron dos sensores por profundidad y tratamiento. Luego el pozo fue rellenado respetando la estratificación. Los sensores se conectaron a un datalogger (ECHO Em50 Datalogger Decagon), que fue programado para registrar valores de humedad cada 12 horas.

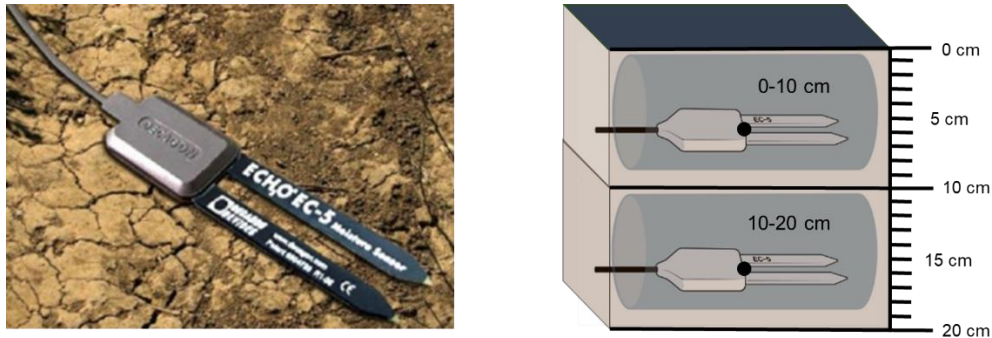


Figura 5.1. Sensores de humedad (ECH₂O EC-5, Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, EEUU) y esquema de las capas de suelo muestreadas.

Cálculo del contenido de agua diario y de la lámina de agua almacenada

Para el cálculo del θ diario para cada capa ($\theta_{0-10\text{ cm}}$ y $\theta_{10-20\text{ cm}}$) se usaron los promedios de los valores registrados por los dos sensores ubicados a una misma profundidad y para un mismo día. El θ medio para cada período fue estimado promediando los contenidos de agua en los días comprendidos en ese período. Para el cálculo de la lámina de agua almacenada (SWS) [mm] diaria se multiplicó el θ diario para cada capa por el espesor de la capa (100 mm). La SWS para los primeros 20 cm de suelo ($SWS_{0-20\text{ cm}}$) fue calculada sumando las SWS de cada capa. La $SWS_{0-20\text{ cm}}$ media mensual y en cada período fue estimada promediando las $SWS_{0-20\text{ cm}}$ en los días comprendidos en ese período (Basche et al., 2016).

Si bien las series de datos no se encontraban completas, ya que los sensores fueron removidos en distintos momentos para realizar tareas agrícolas, en los dos tratamientos se contó con el mismo número de observaciones. Se centró el análisis de $\theta_{0-10\text{ cm}}$, $\theta_{10-20\text{ cm}}$ y $SWS_{0-20\text{ cm}}$ en distintos períodos de interés agronómico. Los períodos contemplados fueron: i) durante todo el período estudiado (3/4/2019-20/04/2020), ii) durante el período de barbecho (desde el 3/4/2019 hasta el 10/11/2019), iii) durante el período de crecimiento del siguiente CP (soja), desde la siembra de la soja y hasta el final de las observaciones (11/11/2019-20/04/2020), iv) durante el mes de febrero, que es el mes en el que la soja alcanza el período crítico de consumo de agua (entre los estadios R4 y R5), v) durante la última semana del CC en la que se contó con datos medidos a campo (CC_f) (19/9/2019-25/9/2019) y vi) la primera semana del CP en la que se contó con datos medidos a campo (CP_o) (7/12/2019-13/12/2019).

Adicionalmente, en cada uno de los tratamientos se calculó el cambio en la lámina almacenada ($\Delta SWS_{0-20\text{ cm}}$) para los eventos de precipitaciones mayores a 20 mm diarios como la diferencia entre la $SWS_{0-20\text{ cm}}$ el día anterior al inicio del evento de precipitaciones y la $SWS_{0-20\text{ cm}}$ máxima alcanzada inmediatamente después de las precipitaciones, en los casos en que se contaba con valores de θ de los sensores a campo para esos días. En caso de lluvias en días consecutivos, la precipitación reportada corresponde a la suma de las precipitaciones mayores a 0 mm ocurridas en días consecutivos, en todos los casos antes o después de un evento de precipitación diaria mayor a 20 mm.

5.4.3. Caracterización climática para los períodos estudiados

Las precipitaciones y las temperaturas mínima y máxima diarias fueron obtenidas de la estación meteorológica perteneciente a INTA Chascomús. Las precipitaciones medias históricas para cada mes fueron obtenidas del SIGA (2020). Para caracterizar las condiciones climáticas en el período estudiado, se calcularon los índices de precipitación estandarizada (IPE), empleando una serie histórica de 43 años (Svoboda et al., 2012). Este índice permite caracterizar los meses de un año en relación a la precipitación media histórica para ese período. Para cada mes, se calculó el IPE₁, que caracteriza cada mes en relación a la media histórica para ese mismo mes, y el IPE₉ que compara los últimos 9 meses de precipitaciones con la media histórica para un período equivalente, y que caracteriza el clima a mediano plazo (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Caracterización de las precipitaciones para el período estudiado.

	Precipitación (mm)	Precipitación histórica (mm)	IPS ₁	IPS ₉
Abril 2019	48,3	105,9	-0,81	-0,24
Mayo 2019	21,1	77,1	-1,24	-0,57
Junio 2019	155,8	60,4	1,61	-0,44
Julio 2019	143,4	64,0	1,46	0,22
Agosto 2019	20,1	63,1	-0,8	-0,49
Septiembre 2019	13,3	64,7	-1,49	-0,99
Octubre 2019	114,6	101,1	0,44	-0,79
Noviembre 2019	178,9	99,4	1,27	0,05
Diciembre 2019	149,4	91,7	1,01	0,62
Enero 2020	52,4	97,8	-0,51	0,7
Febrero 2020	87,2	113,5	-0,29	0,87
Marzo 2020	119,3	103,7	0,43	0,41
Abril 2020	145,4	105,9	0,61	0,21

Índices de precipitación estandarizada para períodos de 1 y 9 meses (IPS₁ e IPS₉, respectivamente). Valores de referencia: > 2 = extremadamente húmedo; > 1,5 y < 1,99 = muy húmedo; > 1,0 y < 1,49 = moderadamente húmedo; > -0,99 y < 0,99 = normal; > -1,49 y < -1,0 = moderadamente seco; < -1,99 y < -1,50 = severamente seco; < -2,00 = extremadamente seco.

5.4.4. Simulación del contenido de agua en el suelo

Se empleó el software Hydrus-1D para simular el flujo de agua vertical unidimensional (Šimůnek y van Genuchten, 2008). Las simulaciones fueron realizadas para el período comprendido entre el 3/4/2019 y el 20/4/2020. Para la simulación, se consideró el flujo de agua dentro de los primeros 50 cm de suelo, teniendo en cuenta dos capas de distintas características: la capa de 0-40 cm, que fue caracterizada con parámetros obtenidos para el horizonte A, y una capa de 40-50 cm de profundidad, caracterizada con valores obtenidos para el horizonte Bt. En el Anexo IV – Tabla I se indican los parámetros de entrada para cada una de las capas del perfil. Las condiciones iniciales de θ se tomaron en base a las medidas de los sensores de humedad para el día inicial, con una discretización de los datos más fina cerca de la superficie, lo que permite obtener gradientes de θ más suaves y mejora la estabilidad de la simulación (Ventrella et al., 2019). Se fijaron dos puntos de observación a 5 y 15 cm de profundidad, coincidiendo con la ubicación de los sensores de humedad a campo, y se estimó el θ diario como variable de salida. Las condiciones de contorno inferior y superior se fijaron en ‘drenaje libre’ y ‘condiciones atmosféricas’, respectivamente. La evapotranspiración potencial fue estimada por el programa usando la función de Hargreaves, y la radiación potencial según la latitud. Para estimar la toma de agua por parte de las raíces se seleccionó la función de Feddes, y la información del cultivo se dio en base a la longitud de las raíces y el índice de área foliar. Como condiciones meteorológicas, se suministraron datos diarios de temperatura mínima, máxima y precipitaciones.

Los parámetros de entrada que describen las propiedades hidráulicas del suelo en cuestión fueron obtenidos mediante dos procedimientos distintos (MES y modelado con BEST), lo que llevó a dos simulaciones distintas con dos sets de datos, empleando en el primer caso el modelo de porosidad bimodal (Durner, dual van Genuchten – Mualem) y en el segundo el modelo de porosidad unimodal (van Genuchten – Mualem).

Parámetros obtenidos a partir del método de evaporación simplificado

En el caso del MES, las CRH obtenidas en el laboratorio para la fecha CHA-CP_f (que coincide con la fecha de inicio de las simulaciones: 3/4/2019) fueron ajustadas con el programa RETC (van Genuchten et al., 1991), empleando un ajuste bimodal según se describe en el capítulo 4. Como parámetros de entrada para la simulación se usaron los promedios de los parámetros α_1 , n_1 , α_2 , n_2 y w_2 obtenidos para cada una de las curvas ajustadas (Anexo IV – Tabla I).

Parámetros obtenidos a partir del modelado con BEST

Se empleó el algoritmo BEST para obtener los parámetros de la CRH y la K_0 (Lassabatère et al., 2006). El BEST combina funciones de pedotransferencia para estimar los llamados parámetros de forma (n , m y ϵ) de las funciones hidráulicas, con

parámetros de escala (K_0 y sortividad, S [$L \cdot T^{-2}$]) obtenidos mediante medidas de infiltración. Este algoritmo emplea el modelo propuesto por van Genuchten (1980) con la condición de Burdine (1953) para la CRH, y la ecuación de Brooks y Corey (1964) junto con el modelo de Mualem (1976) para la conductividad hidráulica en función del contenido de humedad $K(\theta)$ (ecuaciones 5.1 y 5.2, respectivamente).

$$\frac{\theta(h)-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} ; \quad m = 1 - 2/n \quad (5.1)$$

$$\frac{K(\theta)}{K_0} = \left[\frac{\theta(h)-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} \right]^\varepsilon \quad (5.2)$$

donde $\theta(h)$ es el contenido de agua a una tensión dada h , θ_s el contenido de agua a saturación, θ_r el contenido de agua residual que se asume igual a 0 [$L^3 \cdot L^{-3}$], h_g [L] es el parámetro de escala de la ecuación de van Genuchten y n , m y ε son los parámetros de forma. El parámetro ε se puede obtener según la ecuación 5.3:

$$\varepsilon = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (5.3)$$

donde la tortuosidad (p) se fija igual a 1 (Lassabatère et al., 2006). Los parámetros m y n son estimados a partir de la curva de frecuencia acumulada de tamaño de partículas usando una función de pedotransferencia incluida en el procedimiento. Los parámetros de escala son estimados a partir de experimentos de infiltración a $h = 0$ cm, usando el modelo de Haverkamp et al. (1994). Específicamente la infiltración acumulada (I) y la tasa de infiltración (i) pueden expresarse para el estado transitorio según las ecuaciones 5.4 y 5.5, y para el estado estacionario (I_s e i_s) según las ecuaciones 5.6 y 5.7:

$$I(t) = S\sqrt{t} + (AS^2 + BK_0)t \quad (5.4)$$

$$i(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + (AS^2 + BK_0) \quad (5.5)$$

$$I_s(t) = (AS^2 + K_0)t + C \frac{S^2}{K_0} \quad (5.6)$$

$$i_s(t) = AS^2 + K_0 \quad (5.7)$$

donde A [L^{-1}], B y C son constantes, que para el modelo de Brooks y Corey se definen como:

$$A = \frac{\gamma}{r(\theta_s - \theta_i)} \quad (5.8)$$

$$B = \frac{2-\beta}{3} \left[1 - \left(\frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^\varepsilon \right] + \left(\frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^\varepsilon \quad (5.9)$$

$$C = \frac{1}{2(1-\beta) \left[1 - \left(\frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^\varepsilon \right]} \ln \left(\frac{1}{\beta} \right) \quad (5.10)$$

donde θ_i es el contenido de agua inicial, y los coeficientes β y γ generalmente se fijan en 0,6 y 0,75, respectivamente, si $\theta_i < 0,25 \theta_s$ (Angulo-Jaramillo et al., 2019).

Finalmente, h_g es estimado a partir de la siguiente ecuación:

$$h_g = \frac{s^2}{c_p (\theta_s - \theta_i) \left[1 - \left(\frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^\varepsilon \right] K_0} \quad (5.11)$$

donde c_p está dado por la ecuación 5.12:

$$c_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left\{ \frac{\Gamma(m\varepsilon - \frac{1}{n})}{\Gamma(m\varepsilon)} + \frac{\Gamma(m\varepsilon + m - \frac{1}{n})}{\Gamma(m\varepsilon + m)} \right\} \quad (5.12)$$

y Γ indica la función gamma.

Para el ajuste con BEST se emplearon las curvas de infiltración obtenidas a campo a $h=0$ cm, en la fecha CHA-CP_f y para cada uno de los tratamientos (M y M_{CC}). Se usó la distribución de tamaño de partículas para la capa de 0-20 cm detallada en el capítulo 1 (Tabla 1.3). Sin embargo, los parámetros obtenidos mediante el BEST no pudieron ser empleados directamente, ya que en este método se ajusta la CRH con la función de van Genuchten pero empleando la condición de Burdine para los valores de m y n ($m = 1 - 2/n$) (Lassabatère et al., 2006), mientras que el Hydrus-1D usa la condición de Mualem ($m = 1 - 1/n$). Por lo tanto, se usó la CRH obtenida mediante BEST, y se ajustó nuevamente empleando el RETC para obtener los parámetros de van Genuchten-Mualem (Siltecho et al., 2015). Los parámetros de entrada empleados se encuentran en el Anexo IV – Tabla I.

5.4.5. Análisis estadístico

Tanto para θ a cada una de las profundidades (θ_{0-10} cm y θ_{10-20} cm) como para SWS₀₋₂₀ cm, y para cada uno de los períodos estudiados, se compararon los valores obtenidos en cada uno de los tratamientos (M y M_{CC}) usando la prueba de t para muestras apareadas. Se fijó un valor de significancia de 0,05.

Evaluación del desempeño de las simulaciones

Con el fin de evaluar el desempeño de las simulaciones, se calcularon los siguientes índices de acuerdo con Loague y Green (1991) y Siltecho et al. (2015): raíz del error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de determinación (CD), eficiencia de la simulación (EF) y coeficiente de masa residual (CMR) (ecuaciones 5.13 a 5.16).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5.13)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - O_m)^2} \quad (5.14)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \quad (5.15)$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5.16)$$

Donde n es el número de observaciones, P_i son los valores simulados, O_i son los valores observados y O_m es la media de los valores observados. El RMSE indica el grado de desvío entre los datos observados y los valores simulados, es siempre positivo y tiende a 0 cuando los datos simulados tienden a ser iguales a los observados. El CD relaciona la dispersión de los datos experimentales con la de los valores simulados, y tiende a 1 cuando ambos sets de datos son consistentes (Siltecho et al., 2015). El EF toma valores entre $-\infty$ y 1, donde 1 indica un ajuste perfecto entre los datos observados y simulados, mientras que valores menores a 0 indican que usar los valores simulados es menos adecuado que usar el promedio de los datos observados (Loague y Green, 1991). El CMR indica si el modelo tiende a sobreestimar ($CMR < 0$) o a subestimar ($CMR > 0$) los datos observados (Siltecho et al., 2015).

5.5. RESULTADOS

5.5.1. Efecto de los cultivos de cobertura sobre el contenido hídrico

En el Anexo IV – Tabla 2 se muestran los resultados del test de t. De las variables estudiadas, $SWS_{0-20\text{ cm}}$ considerando todo el período de estudio fue la única que no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (M y M_{CC}), mientras que los demás parámetros se vieron afectados por la presencia de CC (p -valor $< 0,05$) para cada uno de los períodos estudiados.

El clima durante el período de barbecho fue variable, con meses moderadamente secos, normales, moderadamente húmedos y muy húmedos (Tabla 5.2). Los meses durante los que se desarrolló el CP, por el contrario, fueron caracterizados como normales. Al considerar un período de tiempo mayor (IPS_9), fue un año con precipitaciones normales para cada mes, y sin mayores períodos de déficit ni exceso de precipitaciones.

Los valores de $SWS_{0-20\text{ cm}}$, $\theta_{0-10\text{ cm}}$ y $\theta_{10-20\text{ cm}}$ para los períodos considerados se muestran en la Tabla 5.3. Al considerar todo el período de estudio, la presencia de CC no modificó la $SWS_{0-20\text{ cm}}$. Por el contrario, al considerar θ , sí se observó un efecto de los CC, que fue distinto según la profundidad considerada. Mientras que $\theta_{0-10\text{ cm}}$ para todo el año fue mayor en M_{CC} que en M, $\theta_{10-20\text{ cm}}$ fue mayor en M que en M_{CC} . Durante el barbecho, la $SWS_{0-20\text{ cm}}$, $\theta_{0-10\text{ cm}}$ y $\theta_{10-20\text{ cm}}$ fueron mayores en M que en M_{CC} , al igual que en CC_f . Durante el CP, por el contrario $SWS_{0-20\text{ cm}}$, $\theta_{0-10\text{ cm}}$ y $\theta_{10-20\text{ cm}}$ fueron mayores en M_{CC} que en M, al igual que en CP_o y durante el mes de febrero.

Tabla 5.3. Efecto de los cultivos de cobertura (CC) sobre el contenido hídrico.

	$\theta_{0-10\text{ cm}}$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		$\theta_{10-20\text{ cm}}$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		$\text{SWS}_{0-20\text{ cm}}$ (mm)	
	M	M _{CC}	M	M _{CC}	M	M _{CC}
Todo el período	0,32 b	0,33 a	0,33 a	0,31 b	65,6 ns	64,5 ns
Barbecho	0,40 a	0,37 b	0,42 a	0,35 b	82,0 a	71,6 b
CC_f	0,34 a	0,27 b	0,40 a	0,28 b	73,8 a	54,4 b
CP	0,26 b	0,31 a	0,26 b	0,28 a	52,0 b	53,4 a
CP_o	0,21 b	0,27 a	0,25 b	0,27 a	45,6 b	54,3 a
Febrero	0,22 b	0,26 a	0,21 b	0,22 a	43,0 b	47,8 a

$\theta_{0-10\text{ cm}}$ y $\theta_{10-20\text{ cm}}$ = contenido de agua en las capas de 0-10 y 10-20 cm de profundidad, respectivamente, $\text{SWS}_{0-20\text{ cm}}$ = lámina de agua almacenada. M = barbecho desnudo, M_{CC} = barbecho con CC. CP = cultivo principal, CC_f = última semana del cultivo de cobertura, CP_o = primera semana del CP. Para un mismo parámetro y un mismo período, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (p-valor < 0,05).

5.5.2. Cambios en el contenido hídrico ante eventos de precipitaciones

En cuanto al $\Delta\text{SWS}_{0-20\text{ cm}}$ luego de eventos de precipitaciones mayores a 20 mm, en diez de los trece eventos registrados el incremento en la $\text{SWS}_{0-20\text{ cm}}$ fue mayor en M_{CC} que en M (Tabla 5.4), lo que implicó incrementos en M_{CC} de hasta 146 % con respecto al incremento en el tratamiento M. Solo en tres de los eventos de precipitaciones registrados el $\Delta\text{SWS}_{0-20\text{ cm}}$ fue mayor en M que en M_{CC}, con diferencias que no superaron el 38 %.

Tabla 5.4. Efecto de los cultivos de cobertura sobre el cambio en el contenido hídrico ante eventos de precipitaciones.

Fecha	Precipitación (mm)	Duración (días)	Δ SWS (mm)	
			M	M _{CC}
13/06/2019	30	1	7,8	12,5
16/06/2019	105	4	13,9	8,7
11/07/2019	84	2	2,8	5,7
21/07/2019	35	1	2,0	4,4
25/07/2019	22	2	2,1	5,2
27/12/2019	39	3	2,2	3,7
30/12/2019	92	1	33,1	28,1
15/01/2020	41	2	29,0	30,0
07/02/2020	47	3	30,3	38,5
11/03/2020	32	3	19,8	24,8
14/03/2020	26	3	22,0	19,8
25/03/2020	26	3	17,9	24,6
01/04/2020	80	2	13,0	22,3

M = barbecho desnudo, M_{CC} = barbecho con CC. Δ SWS_{0-20 cm} = cambio en la lámina de agua almacenada. La duración indica el número de días consecutivos en los que se registraron precipitaciones mayores a 0 mm en días inmediatamente anteriores o posteriores al evento de 20 o más mm de lluvia en un único día.

5.5.3. Modelización del contenido hídrico con Hydrus-1D

En la tabla 5.5 se muestran los valores de los parámetros calculados para evaluar la bondad de las simulaciones. La simulación hecha a partir de parámetros obtenidos por el MES tuvo un mejor desempeño (valores de RMSE y CMR más cercanos a 0 y valores de EF menos negativos) que la simulación a partir de parámetros obtenidos por el método BEST. Sin embargo, las simulaciones hechas a partir de los parámetros obtenidos por los dos métodos tuvieron características similares. Las simulaciones subestimaron de manera sistemática θ durante el período de barbecho (Figura 5.2 y 5.3), con valores observados de $\theta_{0-10 \text{ cm}}$ entre 0,24 y 0,49 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para este período, y valores simulados entre 0,08 y 0,47 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ y entre 0,05 y 0,40 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para las simulaciones realizadas a partir de MES (Figuras 5.4) y de BEST (Figura 5.5), respectivamente. Para la capa de 10-20 cm, los valores observados variaron entre 0,22 y 0,47 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ durante el barbecho, y los valores simulados entre 0,18 y 0,47 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para el MES (Figuras 5.4) y entre 0,09 y 0,39 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para el BEST (Figuras 5.5). Además, durante este período el ajuste fue mejor para el tratamiento M_{CC} que para M. Por otra parte, el ajuste fue más adecuado para el período de barbecho que para el del CP. Durante el período del CP, la precisión de la simulación fue menor con una dispersión mucho mayor de los datos simulados, tanto con datos subestimados como sobreestimados, aunque con mayor tendencia a subestimar (Figura 5.2 y 5.3).

Tabla 5.5. Parámetros empleados para evaluar la bondad de los ajustes.

		MES		BEST	
		M	M_{CC}	M	M_{CC}
RMSE	0-10 cm	0,16	0,14	0,17	0,17
	10-20 cm	0,16	0,11	0,17	0,13
CD	0-10 cm	0,35	0,26	0,33	0,21
	10-20 cm	0,38	0,27	0,36	0,26
EF	0-10 cm	-1,86	-1,98	-2,31	-3,64
	10-20 cm	-1,61	-1,49	-1,92	-2,38
CMR	0-10 cm	0,40	0,32	0,44	0,45
	10-20 cm	0,40	0,26	0,44	0,38

M = barbecho desnudo, M_{CC} = barbecho con CC. MES = método de evaporación simplificada, BEST = Beerkan estimation of soil parameters. RMSE = raíz del error cuadrático medio, CD = coeficiente de determinación, EF = eficiencia de la simulación, CRM = coeficiente de masa residual.

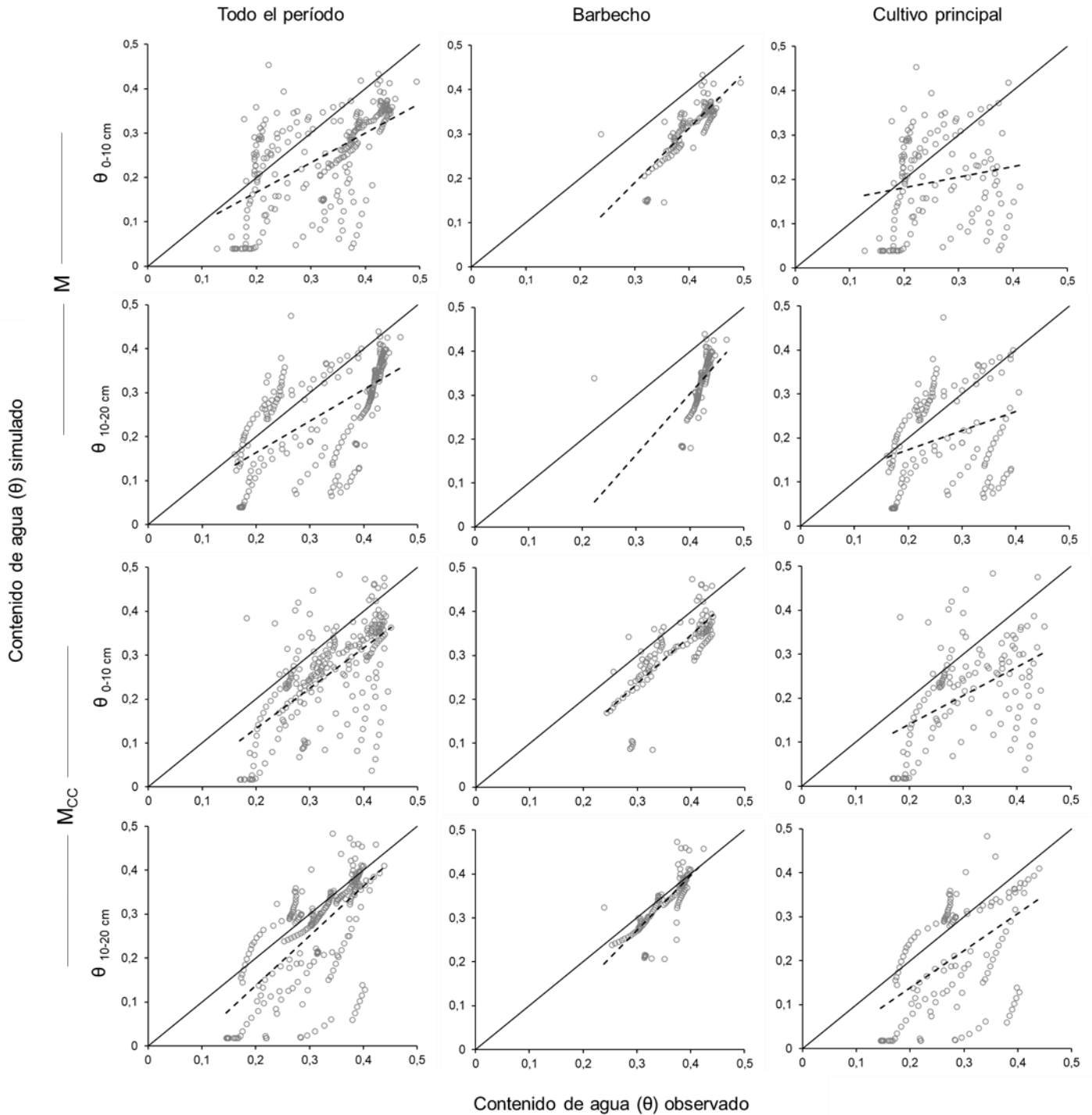


Figura 5.2. Datos de contenido de agua (θ) observados vs. simulados para la simulación a partir de los parámetros obtenidos mediante el método de evaporación simplificado (MES), para las capas de 0-10 y 10-20 cm. M = barbecho desnudo, M_{CC} = barbecho con CC. La primera columna corresponde a todos los datos de la simulación, la segunda columna a los datos del período de barbecho, y la tercera columna a los datos del período del cultivo principal.

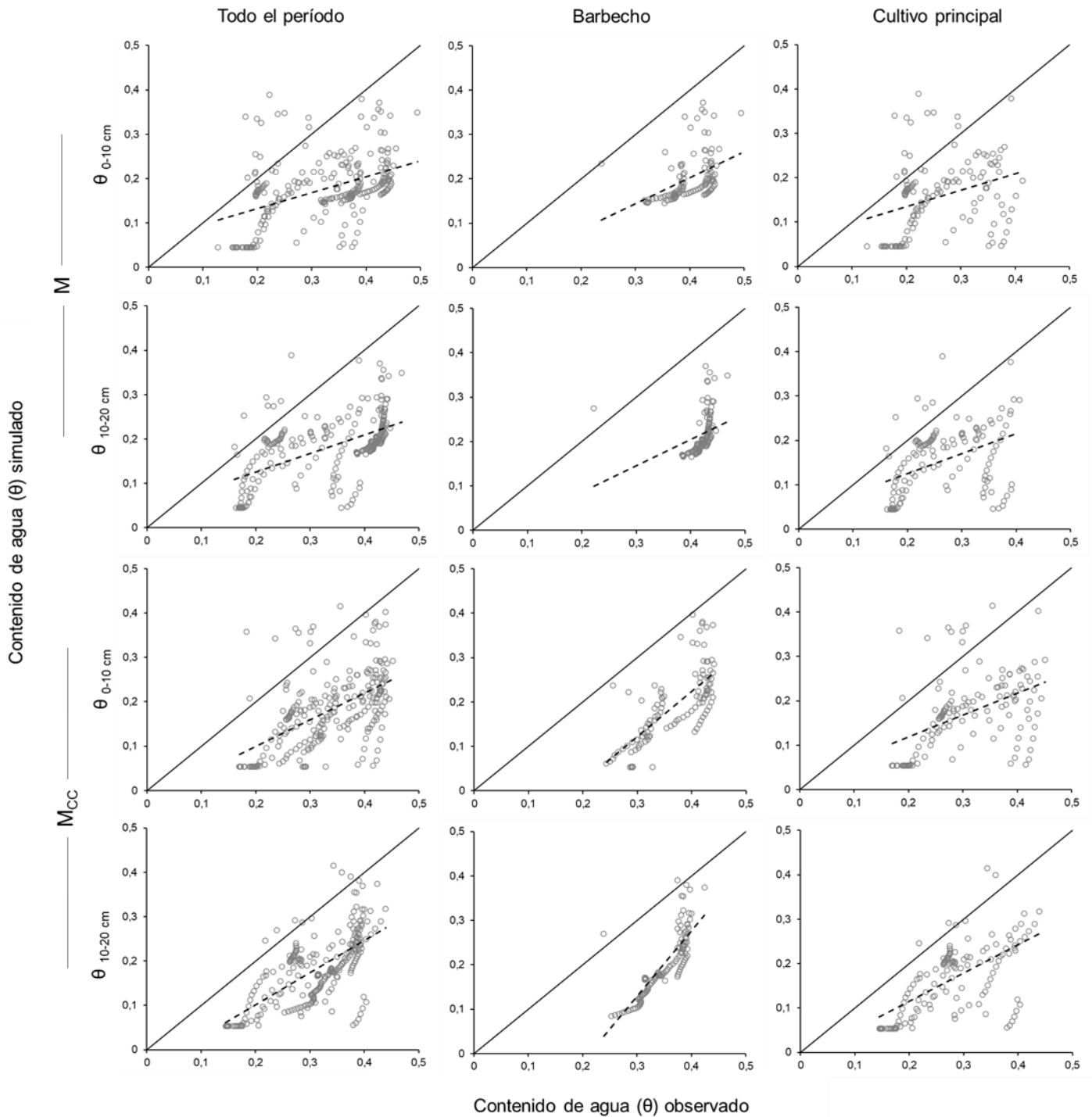


Figura 5.3. Datos de contenido de agua (θ) observados vs. simulados para la simulación a partir de los parámetros obtenidos mediante el método BEST, para las capas de 0-10 y 10-20 cm. M = barbecho desnudo, M_{CC} = barbecho con CC. La primera columna corresponde a todos los datos de la simulación, la segunda columna a los datos del período de barbecho, y la tercera columna a los datos del período del cultivo principal.

En las Figuras 5.4 y 5.5 se observa el resultado de los datos de θ medidos a campo y de las simulaciones hechas a partir de parámetros obtenidos mediante el

MES y el método BEST, respectivamente, junto con las precipitaciones registradas para el período.

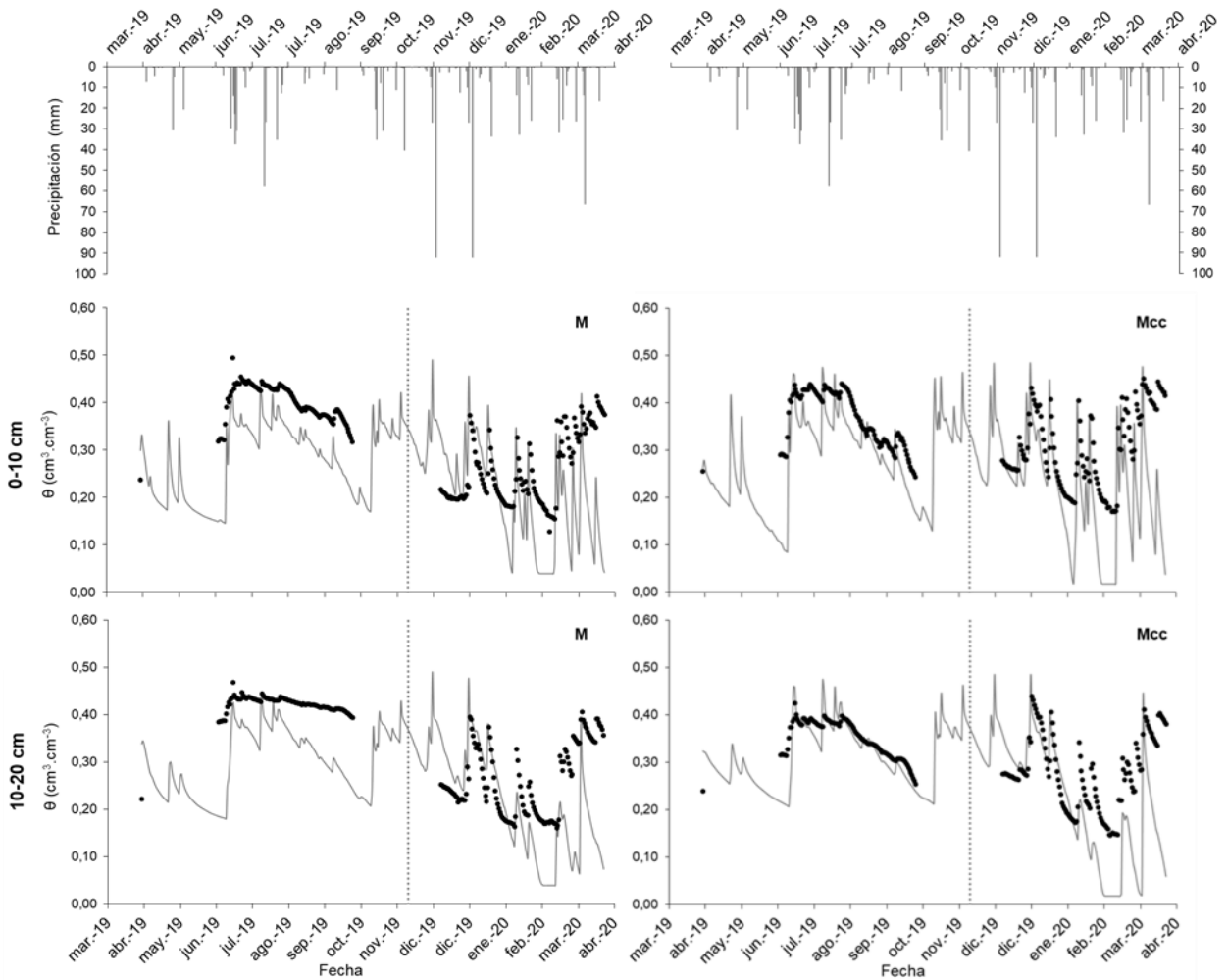


Figura 5.4. Contenido de agua (θ) observado (puntos) y simulado (líneas) a partir de parámetros obtenidos mediante el método de evaporación simplificado (MES), a dos profundidades y para los tratamientos de barbecho desnudo (M) a la izquierda, y barbecho con cultivo de cobertura (Mcc) a la derecha. La línea vertical punteada separa el período de barbecho (izquierda) del cultivo principal (derecha). Las barras en la parte superior de la figura muestran las precipitaciones diarias.

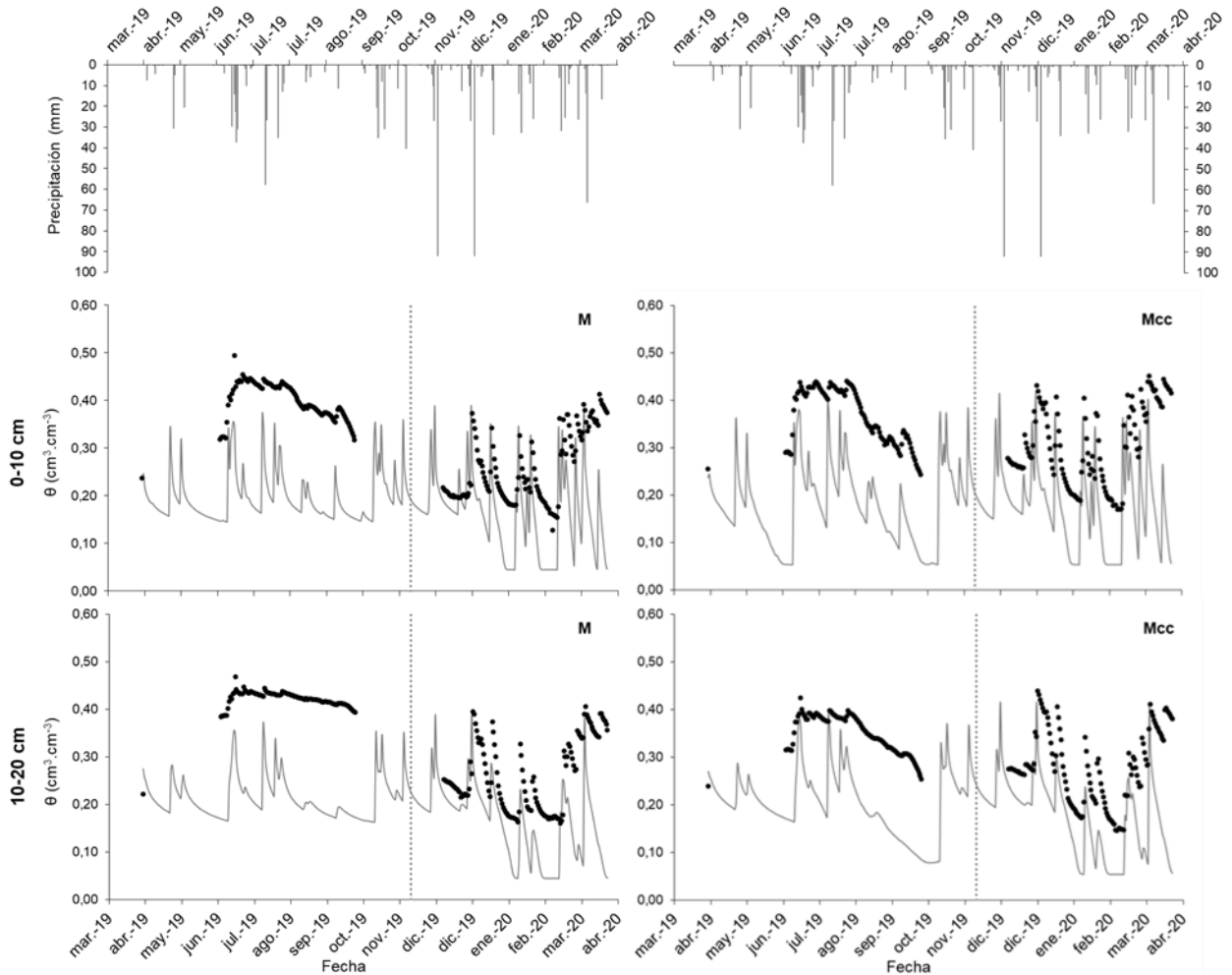


Figura 5.5. Contenido de agua (θ) observado (puntos) y simulado (líneas) a partir de parámetros obtenidos mediante el método BEST, a dos profundidades y para los tratamientos de barbecho desnudo (M) a la izquierda, y barbecho con cultivo de cobertura (M_{cc}) a la derecha. La línea vertical punteada separa el período de barbecho (izquierda) del cultivo principal (derecha). Las barras en la parte superior de la figura muestran las precipitaciones diarias.

5.6. DISCUSIÓN

5.6.1. Efecto de los cultivos de cobertura sobre el contenido hídrico

Durante el barbecho los CC generaron una disminución promedio en θ de $0,03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para $\theta_{0-10 \text{ cm}}$ y de $0,07 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para $\theta_{10-20 \text{ cm}}$ (Tabla 5.3). Esta disminución fue más pronunciada hacia el final del CC (CC_f), siendo de $0,07 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para $\theta_{0-10 \text{ cm}}$ y de $0,12 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para $\theta_{10-20 \text{ cm}}$. La última semana del CC de la que se contó con datos de humedad fue durante el mes de septiembre, caracterizado como un mes moderadamente seco (Tabla 5.2). Esto está de acuerdo con otros autores, que también observaron una disminución en θ en presencia de CC debido al consumo de agua por parte de las plantas en crecimiento y un aumento en la transpiración (Alfonso

et al., 2020; Basche et al., 2016; Daigh et al., 2014b; Meyer et al., 2020; Mubvumba et al., 2021; Restovich et al., 2012; Tribouillois et al., 2022). Por otra parte, durante el barbecho en el tratamiento M las fluctuaciones en θ se dieron principalmente a la capa de 0-10 cm, mientras que de 10-20 cm θ permaneció relativamente constante (Figura 5.4). Por el contrario, en M_{CC} se observó que θ varió y fue más dependiente de las precipitaciones a ambas profundidades, lo que indica que las raíces de los CC afectan el contenido de agua en los primeros 20 cm de suelo, generando una mayor diferencia entre tratamientos en la capa de 10-20 cm.

Durante el período de crecimiento del CP, a diferencia de lo observado durante el barbecho, el θ fue mayor en M_{CC} que en M, con una diferencia promedio de $0,05 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para $\theta_{0-10 \text{ cm}}$ y $0,02 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para $\theta_{10-20 \text{ cm}}$. Esta diferencia se mantuvo en el mes de febrero, mes de máximo requerimiento de agua de la soja. El período de crecimiento del CP fue caracterizado como un período de precipitaciones normales (a excepción del primer mes y medio, caracterizado como moderadamente húmedo), lo que pudo haber ayudado a recargar el perfil, eliminando las diferencias entre tratamientos producidas por el CC en crecimiento. En este sentido, Mubvumba et al. (2021) observaron que la disponibilidad de agua para el CP dependió de la abundancia de precipitaciones ocurridas entre la terminación del CC y la siembra del CP. Rimski-Korsakov et al. (2015), para Molisoles de la Región Pampeana, observaron que la disminución en θ por la presencia de CC fue compensada para el inicio del CP cuando el CC se terminó dos o más meses antes de la siembra. Sin embargo, en este trabajo la disminución fue compensada aun cuando los CC se terminaron solo dos semanas antes de la siembra del CP. Otros autores también registraron mayor contenido de agua en presencia de CC durante el crecimiento del CP, que pudo deberse a un incremento en la capacidad de almacenaje (Basche et al., 2016) y/o a que los residuos del CC disminuyeron la evaporación durante el CP (Alfonso et al., 2020). Esto concuerda con los valores de ADP reportados en el capítulo 3, que fueron significativamente mayores en M_{CC} que en M (Tabla 3.9). Por otra parte, la disminución en θ ocurrida durante el crecimiento del CC tendió a ser mayor en $\theta_{10-20 \text{ cm}}$ que en $\theta_{0-10 \text{ cm}}$, lo que podría indicar que se debió principalmente al consumo de agua por parte de las raíces en profundidad, mientras que el aumento en θ ocurrido durante el crecimiento del CP fue mayor en $\theta_{0-10 \text{ cm}}$ que en $\theta_{10-20 \text{ cm}}$, posiblemente por una reducción en la evaporación de agua desde la superficie y/o a una mejora en la capacidad de infiltración. En este sentido, mientras que al inicio del CC no se observaron diferencias entre tratamientos en K_0 , K_3 ni K_6 (fecha Cha-CP_f, correspondiente al muestreo del 3/4/2019), hacia el final del barbecho (fecha CHA-B2, 26/9/2019) el tratamiento M_{CC} presentó mayores K_0 , K_3 y K_6 que M (Figura 3.17, capítulo 3). Además, hacia el final del CC se observó una muy alta cobertura en M_{CC} (del 100 %), mientras que en M la cobertura fue de un 70 %. Por lo tanto, un aumento en el agua infiltrada y una disminución en la pérdida de agua por evaporación en M_{CC} resultan esperables. Del mismo modo, un mayor $\Delta\text{SWS}_{0-20 \text{ cm}}$ ante eventos de precipitaciones en M_{CC} que en M podría ser explicado por un incremento en la capacidad de almacenaje, y por una mayor capacidad de infiltración hacia el final del CC y durante el CP.

Al analizar el año entero, los CC no generaron cambios significativos en la $\text{SWS}_{0-20 \text{ cm}}$. Esto indica que el mayor consumo de agua durante el barbecho se ve

compensado por las lluvias que ocurren después de finalizado el CC y por una mayor capacidad de captar y almacenar agua durante el período del CP (Basche et al., 2016; Restovich et al., 2012). Resultados similares fueron reportados por Alfonso et al. (2020) para un Molisol franco en clima templado húmedo, donde si bien los CC redujeron el contenido de agua durante su crecimiento, este efecto se vio revertido por las lluvias después de terminado el CC, sin diferencias significativas durante el cultivo siguiente. Tribouillois et al. (2022) también reportaron que el efecto de los CC sobre el balance hídrico anual es menor. Estos resultados parecen indicar, por lo menos de manera preliminar, que el uso de CC en sistemas productivos de la Región Pampeana no generaría problemas de déficit hídrico en años de precipitaciones normales.

5.6.2. Modelización del contenido hídrico con Hydrus-1D

La simulación hecha a partir de parámetros obtenidos por el MES tuvo un mejor desempeño que la simulación a partir de parámetros obtenidos por el método BEST. Esto puede deberse a que con el método MES se determinan la CRH y la curva de $K(h)$ completas, mientras que el BEST estima estas curvas a partir de un número limitado de medidas de infiltración y distribución de tamaño de partículas. Schwen et al. (2014) también observaron que simulaciones hechas a partir de un ajuste bimodal de las CRH y de $K(h)$ obtenidas por el MES lograron un mejor ajuste de los datos que simulaciones hechas a partir de parámetros obtenidos por funciones de pedotransferencia, destacando la importancia del uso de modelos bimodales en suelos bien estructurados con presencia de macroporos y flujo-preferencial. Por el contrario, Siltecho et al. (2015) observaron que los resultados de la simulación realizada con parámetros de entrada obtenidos mediante el BEST ajustaron mejor a los datos experimentales que emplear parámetros obtenidos mediante el MES. En este sentido, aunque en varios trabajos se promueve el uso de valores default de los parámetros que emplea el BEST (parámetros β y γ) la calibración de estos parámetros y la elección de valores apropiados puede llevar a mejoras en la estimación de las funciones hidráulicas (Angulo-Jaramillo et al., 2019; Castellini et al., 2018). Por otra parte, los parámetros de ingreso para la simulación con Hydrus-1D mostraron una gran variabilidad entre métodos, así como para un mismo método de obtención (Anexo I – Tabla I). Diferencias similares fueron también observadas por Siltecho et al. (2015). Sin embargo, ambos métodos arrojaron valores similares de K_0 , a diferencia de lo observado por Siltecho et al. (2015), quienes indicaron que el MES arroja valores de K_0 sistemáticamente mayores. Estos autores adjudicaron esta diferencia al uso de la condición de Mualem en la ecuación de van Genuchten, por lo que la falta de diferencias en este trabajo pudo deberse al ajuste que se hizo de los parámetros del BEST para cumplir con la condición de Mualem ($m = 1 - 1/n$) en lugar de la de Burdine ($m = 1 - 2/n$).

A pesar de las diferencias observadas entre ambos métodos, los parámetros empleados para evaluar la bondad del ajuste de ambas simulaciones estuvieron dentro del rango reportado en otros trabajos de simulación de la dinámica hídrica.

Schwen et al. (2014) obtuvieron valores de RMSE un orden de magnitud menor a los reportados en esta tesis. Chakraborty et al. (2022) obtuvieron valores de RMSE entre 0,03 y 0,08 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ en el modelado de θ con Hydrus-1D durante el período de crecimiento del CP. Sin embargo, en estos estudios el período de tiempo con datos observados para comparar con las simulaciones fue menor, limitándose al crecimiento del CP o a parte de este período (de entre 60 y 120 días), mientras que en la presente tesis se contó con 248 días con observaciones en un período de 384 días, incluyendo el barbecho y el CP. En este sentido, Alletto et al. (2015) obtuvieron valores de RMSE menores (del orden de 0,04 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) al inicio de la simulación, pero valores en el mismo orden ($\approx 0,13 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) para períodos de tiempo mayores. Esto también puede deberse a la variación temporal de las propiedades físicas durante el ciclo de cultivo, como fue reportado por distintos autores (Schwen et al. 2011a, Jirků et al. 2013; Villarreal et al., 2020). Schwen et al. (2011b) reportaron que la inclusión de la variabilidad temporal de las propiedades físicas mejoró la eficiencia de la simulación con el Hydrus-1D.

Por otra parte, ambas simulaciones mostraron características similares. Las simulaciones fueron mejores para el primer período contemplado (barbecho) que para el período de crecimiento del CP. En general el Hydrus-1D subestimó el contenido de agua en todo el período estudiado (valores de CMR mayores a 0) y especialmente durante el barbecho, pero no ante eventos de precipitaciones, momento en el que los datos simulados ajustan mejor a los datos observados (Figuras 5.4 y 5.5). Esta subestimación fue mayor en M que en M_{cc} a ambas profundidades, lo que podría indicar que el modelo sobreestima el flujo de agua que drena o evapora, especialmente en ausencia de vegetación. Esto puede deberse a que el programa no contempla distintos grados de cobertura por rastrojo, permitiendo incluir solamente vegetación viva. En cuanto al período del CP, se observa que los errores fueron más dispersos y no sistemáticos en una dirección, aunque también se observa que, en los momentos en que Hydrus-1D subestima el contenido de agua, el suelo se seca hasta valores mínimos de θ muy por debajo de los valores medidos a campo ($\theta < 0,05 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Otros autores también observaron que Hydrus subestimó el θ en el modelado de la dinámica hídrica durante el crecimiento de un cultivo de maíz (Alletto et al., 2015).

El empleo de Hydrus-1D permitió una simulación relativamente buena, con valores de θ dentro de lo esperable, con una buena respuesta de la simulación a los eventos de precipitaciones y que permite predecir de manera satisfactoria la dinámica hídrica a campo. En particular, el uso del Hydrus-1D empleando parámetros obtenidos mediante el BEST se posiciona como una alternativa prometedora, ya que permite el modelado de la dinámica hídrica a partir de datos de fácil obtención. Sin embargo, la calibración del modelo para cada tipo de suelo y manejo resulta necesaria para mejorar la precisión de las simulaciones. Por otra parte, otras estrategias de muestreo y simulación podrían emplearse a futuro para mejorar el desempeño de las simulaciones. Schwen et al. (2014) destacaron la importancia de considerar la variabilidad vertical de las propiedades físicas. Estos autores observaron cambios significativos en la distribución del tamaño de partículas, la Dap, la CRH y la curva de $K(h)$, que pudieron ser evidenciadas en incrementos de 5 cm de profundidad y dentro de un mismo horizonte, y que al ser consideradas en la simulación con Hydrus-1D

mejoraron el ajuste de los datos. Otro abordaje para mejorar la simulación, como se mencionó anteriormente, puede ser incluir la variabilidad temporal de las propiedades físicas e hidráulicas, partiendo la simulación en períodos con distintos parámetros de entrada (Alletto et al., 2015). Por otra parte, los parámetros que describen el crecimiento de las plantas (como ser longitud de raíces e índice de área foliar), que el Hydrus-1D utiliza para calcular la cobertura y la evapo-transpiración, fueron estimados. Si bien la simulación fue relativamente eficiente, emplear parámetros medidos y calibrar el modelo puede mejorar el desempeño a futuro, permitiendo obtener conclusiones más robustas y simular la dinámica hídrica en distintos escenarios.

5.7. CONCLUSIONES

Los CC generan las condiciones para que el suelo capte y almacene más agua, incrementando el θ y la SWS durante el período de crecimiento y de máximo requerimiento de agua del CP, en un Argiudol típico bajo SD en comparación con un barbecho desnudo. El uso de parámetros hidráulicos obtenidos mediante el método BEST permite una simulación adecuada de la dinámica hídrica, similar a la obtenida empleando parámetros provenientes de un ajuste bimodal de las CRH y $K(h)$ obtenidas mediante el MES.

CAPÍTULO 6 – Consideraciones finales

En esta tesis se evaluó el efecto de los cultivos de cobertura (CC), en comparación con un barbecho desnudo, sobre las propiedades físicas y químicas del suelo en cuatro sitios con suelos representativos de la Región Pampeana bajo siembra directa. En el sitio Villegas se evaluó el efecto de 15 años de un CC de centeno en un cultivo de soja y en una rotación soja-maíz, en un Hapludol típico de textura franco-arenosa. En Pergamino se evaluó el efecto de 8 y 9 años de CC de avena/vicia en un cultivo de soja, en un Argiudol típico franco limoso. En Bellocq se evaluó el efecto de dos años de tres rotaciones distintas del cultivo principal (maíz-soja, trigo/soja-maíz y soja-trigo/soja) en ausencia y en presencia de CC, en un Hapludol éntico franco arenoso. En Chascomús se evaluó el efecto de dos años de CC (cebada y vicia el primer año, y avena, vicia y cebada el segundo año) en un cultivo de maíz, en un Argiudol abruptico franco. Se evaluó el efecto de los CC sobre el contenido y composición de la materia orgánica, sobre indicadores estáticos y dinámicos de calidad física de suelos, así como sobre las curvas de retención hídrica y conductividad hidráulica determinadas por el método de evaporación simplificado. Por último, se evaluó el efecto de esta práctica sobre el contenido de agua en el suelo, y se exploraron distintas estrategias para la simulación de la dinámica hídrica.

Los CC afectaron el contenido, composición y distribución vertical del carbono orgánico del suelo (COS). Entre los principales resultados obtenidos, se observó que, en el largo plazo, los CC generaron un aumento en el contenido de materia orgánica en los primeros 5 a 10 cm de suelo en comparación con rotaciones sin CC, tanto en el Argiudol como en el Hapludol. En el caso del Hapludol estos incrementos se debieron principalmente a cambios en el carbono orgánico asociado a minerales y en el contenido de huminas, y en el caso del Argiudol, a cambios en las fracciones de carbono orgánico particulado grueso y fino, así como en las huminas. En el corto plazo, los CC tendieron a acelerar la dinámica de la materia orgánica, incluyendo su formación y su descomposición, lo que pudo observarse dentro de los dos años de iniciada la práctica. Esto fue atribuido a mayor aireación y actividad biológica, incentivada por el aporte de residuos orgánicos por parte de los CC en superficie y en profundidad. En el Hapludol, dos años de CC en las distintas secuencias de rotaciones generaron una disminución en el COS. En el Argiudol, no se observaron cambios significativos tras dos años de CC, aunque si en fechas anteriores, indicando que los CC modifican la variabilidad temporal del COS. Por otra parte, se observó que todas las fracciones estudiadas presentaron una variabilidad temporal y fueron susceptibles a las transformaciones biológicas. Las fracciones obtenidas por métodos físicos resultaron más sensibles para detectar el efecto de la inclusión de CC que las fracciones obtenidas por métodos químicos y que el carbono orgánico total.

En cuanto a los indicadores de calidad física de suelos, el efecto de los CC fue complejo y dependió de la secuencia de cultivos en la que fueron incluidos, el tipo de suelo y los años desde iniciada la práctica. Los CC tuvieron una capacidad menor para mejorar la estructura en el largo plazo, tanto en el Argiudol franco arcilloso como en el Hapludol franco arenoso. En el caso del Hapludol esto se atribuyó a la baja capacidad de estructuración en un suelo de textura más gruesa y con un contenido de

materia orgánica y arcillas expansivas relativamente bajo. En el Argiudol pudo deberse a que se trató de un suelo degradado y compactado por décadas de soja continua en siembra directa que, sumado a la ausencia de arcillas expansibles y la pérdida de materia orgánica, llevaron a una difícil recuperación de la estructura. Además, los resultados obtenidos pueden haberse visto afectados por un taponamiento temporal de los poros por las raíces del CC, en especial hacia el final o poco después de finalizado el mismo. En general, incluir CC en un cultivo de soja tanto en el Hapludol como en el Argiudol generó un incremento en el contenido de agua a capacidad de campo, y una disminución en θ_{me} y en el agua disponible para la planta (ADP) que pudo deberse al taponamiento temporal de los poros por las raíces de las gramíneas, que son más abundantes y más resistentes a la degradación. En la rotación soja-maíz en el Hapludol, la presencia de CC también generó una disminución en la mesoporosidad pero incrementó el ADP y la conectividad de los mesoporos.

En el corto plazo, el efecto de los CC fue más variable en el tiempo y entre sitios y rotaciones, observándose un importante efecto del tránsito ya sea por una intensificación en las rotaciones o por la inclusión de CC. Esta intensificación en el tránsito produjo disminuciones en la PT, el volumen de macroporos y el contenido de agua a capacidad de campo. Sin embargo, al incluir CC esta compactación resultó temporaria, y se vio seguida de un aumento también temporal en la macro y mesoporosidad, producto del desarrollo de las raíces, la cobertura y la fauna asociada a los CC. Además, tanto en el Argiudol como en el Hapludol se observó que tanto gramíneas como leguminosas pueden producir un incremento en la conductividad hidráulica en el corto plazo, principalmente debida a un incremento en la conectividad de los poros, aunque en ocasiones se observaron disminuciones que se atribuyeron a un taponamiento temporal de los poros. En el Argiudol, se observó una variabilidad natural en las propiedades físicas significativa dentro de los dos ciclos de cultivo analizados, que sin embargo no se vio modificada mayormente por la presencia de CC. Además, dos años de CC fueron necesarios para empezar a observar efectos en la calidad física.

En general en el corto plazo los efectos tanto sobre la materia orgánica como sobre las propiedades físicas fueron más variables y en ocasiones se vieron enmascarados por la variabilidad temporal y espacial natural de las variables estudiadas. Estos resultados indican que una continuidad en esta práctica puede ser necesaria para observar efectos significativos y persistentes. Por otra parte, se evidenció la necesidad de estudiar la variabilidad temporal de las propiedades físicas e hidráulicas. Al estudiar las curvas de retención hídrica y de conductividad hidráulica y su variabilidad a lo largo de dos ciclos de cultivo en el sitio Chascomús, se observó que los CC modificaron la distribución de tamaño de poros, generando un desplazamiento de poros de la matriz a poros estructurales e incrementando la forma bimodal de las curvas, en comparación con un barbecho desnudo. Esto derivó en un incremento en la conductividad hidráulica, aunque este aumento no se vio relacionado con un incremento en la conectividad de los poros estructurales.

En cuanto a la dinámica hídrica, durante un ciclo de cultivo en el sitio Chascomús se registró el contenido de agua en el suelo, observando que, si bien los CC consumen agua generando una disminución en el agua almacenada durante su

crecimiento, también pueden generar las condiciones para que el suelo capte y almacene más agua, incrementando el contenido de agua durante el período de crecimiento y de máximo requerimiento de agua del cultivo principal. Sin embargo, la pregunta de si la disminución temporal en la SWS ocasionada durante el barbecho por la presencia de CC puede tener un impacto significativo en la recarga de napas o en el balance hídrico a nivel de cuenca es un interrogante de suma importancia que aún debe ser estudiado. Por otra parte, se exploraron distintos métodos para simular la dinámica hídrica. La simulación del contenido de humedad con Hydrus-1D resultó adecuada, tanto empleando parámetros del MES como del BEST.

Los CC resultan una práctica interesante para incrementar el contenido de COS en el largo plazo en sistemas bajo SD de la Región Pampeana, siendo necesario un período de tiempo mayor a 2 años para observar beneficios. En años de precipitaciones normales, los CC no generan un déficit de agua para el siguiente cultivo de renta; por el contrario, son capaces de incrementar la capacidad de almacenaje de agua en el suelo. En cuanto a la CFS, la adopción de CC en rotaciones simplificadas bajo SD en Molisoles de la Región Pampeana genera mejoras temporales en la capacidad del suelo para captar y transmitir agua, aunque puede no ser suficiente para revertir la degradación física ocasionada por años de un manejo inadecuado. En este sentido, los CC deberían acompañarse con otras prácticas de conservación, como ser la inclusión de pasturas o rotaciones más balanceadas, en la transición hacia sistemas de producción más sustentables.

REFERENCIAS

- AAPRESID. (2017). Cultivos de cobertura. Bases para su manejo en sistemas de producción. Recuperado de: <http://aapresid.org.ar/wp-content/uploads/sites/3/2017/09/AAP-Original-Cultivos-de-cobertura.pdf>. Fecha de acceso: octubre 2020.
- AAPRESID. (2018). Cultivos de cobertura en Argentina. Qué se está haciendo y qué falta. Recuperado de: <http://www.aapresid.org.ar/rem/wp-content/uploads/sites/3/2018/03/Analisis-encuesta-sobre-CC-web.pdf>
- AAPRESID. (2020). Informe de evolución de siembra directa en Argentina. Campaña 2018/2019. Recuperado de: <https://www.aapresid.org.ar/superficie/>. Fecha de acceso: octubre 2020.
- Acuña, J.C.M., y Villamil, M.B. (2014). Short-term effects of cover crops and compaction on soil properties and soybean production in Illinois. *Agronomy Journal*, 106, 860–870.
- Adetunji, A.T., Ncube, B., Mulidzi, R., y Lewu, F.B. 2020. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. *Soil and Tillage Research*, 204, 104717.
- Alfonso, C., Barbieri, P.A., Hernández, M.D., Lewczuk, N.A., Martínez, J.P., Echarte, M.M., y Echarte, L. (2020). Water productivity in soybean following a cover crop in a humid environment. *Agricultural Water Management*, 232, 106045.
- Alletto, L., Pot, V., Giuliano, S., Costes, M., Perdrieux, F., y Justes, E. (2015). Temporal variation in soil physical properties improves the water dynamics modeling in a conventionally-tilled soil. *Geoderma*, 243, 18-28.
- Alletto, L., y Coquet, Y. (2009). Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. *Geoderma*, 152(1-2), 85-94.
- Alonso, L.L., Demetrio, P.M., Etchegoyen, M.A., y Marino, D.J. (2018). Glyphosate and atrazine in rainfall and soils in agroproductive areas of the Pampas Region in Argentina. *Science of the Total Environment*, 645, 89-96.
- Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Perelman, S., y Morrás, H.J.M. (2014). Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Research*, 52(6), 533-542.
- Álvarez, R., y Steinbach, H.S. (2009). A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and tillage research*, 104(1), 1-15.
- Álvarez, R., Steinbach, H.S., y De Paepe, J.L. (2017). Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 170, 53-65.
- Andrade, J.F., Poggio, S.L., Ermacora, M., y Satorre, E.H. (2017). Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina: Diversifying crop sequences to increase yields and resource use. *European Journal of Agronomy*, 82, 1-10.

- Angulo-Jaramillo, R., Bagarello, V., Di Prima, S., Gosset, A., Iovino, M., y Lassabatere, L. (2019). Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) across soils and scales. *Journal of Hydrology*, 576, 239-261.
- Ankeny, M.D., Ahmed, M., Kaspar, T.C., Horton, R. (1991). Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2), 467-470.
- Aparicio, V., Zamora, M., Barbera, A., Castro-Franco, M., Domenech, M., De Gerónimo, E., Costa, J.L. (2018). Industrial agriculture and agroecological transition systems: A comparative analysis of productivity results, organic matter and glyphosate in soil. *Agricultural System*, 167, 103-112.
- Aparicio, V.C., De Gerónimo, E., Hernández Guijarro, K., Pérez, D., Portocarrero, R., y Vidal, C. (2015). *Los plaguicidas agregados al suelo y su destino en el ambiente*. Buenos Aires: Ediciones INTA.
- Aparicio, V.C., De Gerónimo, E., Marino, D., Primost, J., Carriquiriborde, P., y Costa, J.L. (2013). Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins. *Chemosphere*, 93, 1866-1873.
- Araújo de Medeiros Barbosa, V.F. (2015). Planting. *Sugarcane*, 35-51.
- Arlauskienė, A., Maikštėnienė, S., y Šlepetienė, A. (2010). Effect of cover crops and straw on the humic substances in the clay loam Cambisol. *Agronomy Research*, 8, 397-402.
- Arrouays, D., Saby, N., Walter, C., Lemerrier, B., y Schvartz, C. (2006). Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use Management*, 22(1), 48-51.
- Arya, L.M., Farrell, D.A., y Blake, G.R. (1975). A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: I. Determination of hydraulic properties of the soil. *Soil Science Society of America Journal*, 39(3), 424-430.
- Austin, A.T., Piñeiro, G., y Gonzalez-Polo, M. (2006). More is less: agricultural impacts on the N cycle in Argentina. *Biogeochemistry*, 79, 45-60.
- Bacq-Labreuil, A., Crawford, J., Mooney, S.J., Neal, A.L., Ritz, K. (2019). Cover crop species have contrasting influence upon soil structural genesis and microbial community phenotype. *Scientific Reports*, 9(1), 1-9.
- Basche, A., y DeLonge, M. (2017). The impact of continuous living cover on soil hydrologic properties: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 81(5), 1179-1190.
- Basche, A.D., y DeLonge, M.S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS one*, 14(9), e0215702.
- Basche, A.D., Kaspar, T.C., Archontoulis, S.V., Jaynes, D.B., Sauer, T.J., Parkin, T.B., y Miguez, F.E. (2016). Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 172, 40-50.

- Basile-Doelsch, I., Balesdent, J., y Pellerin, S. (2020). Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil. *Biogeosciences*, 17(21), 5223-5242.
- Baumert, V., Vasilyeva, N., Vladimirov, A., Meier, I., Kögel-Knabner, I., Mueller, C. (2018). Root exudates induce soil macroaggregation facilitated by fungi in subsoil. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 140.
- Baveye, P.C., y Wander, M. (2019). The (bio) chemistry of soil humus and humic substances: Why is the “new view” still considered novel after more than 80 years? *Frontiers in Environmental Science*, 7, 27.
- Beare, M.H., Hendrix, P.F., Cabrera, M.L., y Coleman, D.C. (1994). Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional-and no-tillage soils. *Soil Science Society American Journal*, 58(3), 787-795.
- Beck-Broichsitter, S., Gerke, H.H., Leue, M., von Jeeze, P.J., Horn, R. (2020). Anisotropy of unsaturated soil hydraulic properties of eroded Luvisol after conversion to hayfield comparing alfalfa and grass plots. *Soil Tillage Research*, 198, 104553.
- Behrends Kraemer, F. (2015). *Influencia de la granulometría y la mineralogía en el comportamiento hidro-físico y estructural en suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa* (Tesis doctoral). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Behrends Kraemer, F., Hallett, P. D., Morrás, H., Garibaldi, L., Cosentino, D., Duval, M., y Galantini, J. (2019). Soil stabilization by water repellency under no-till management for soils with contrasting mineralogy and carbon quality. *Geoderma*, 355, 113902.
- Behrends Kraemer, F., Soria, M. A., Castiglioni, M. G., Duval, M., Galantini, J., y Morrás, H. (2017). Morpho-structural evaluation of various soils subjected to different use intensity under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 169, 124-137.
- Beltrán, M., Galantini, J.A., Salvagiotti, F., Tognetti, P., Bacigaluppo, S., Sainz Rozas, H.R., Barraco, M.R., y Barbieri, P. A. (2021). Do soil carbon sequestration and soil fertility increase by including a gramineous cover crop in continuous soybean (*Glycine max*)? *Soil Science Society American Journal*, 85(5), 1380-1394.
- Beltrán, M.J., Sainz-Rozas, H., Galantini, J.A., Romaniuk, R.I., y Barbieri, P. (2018). Cover crops in the Southeastern region of Buenos Aires, Argentina: effects on organic matter physical fractions and nutrient availability. *Environmental Earth Sciences*, 77(12), 428.
- Benites, V.M., Madari, B., y Machado, P.L. (2003). Extração e Fracionamento Quantitativo de Substâncias Húmicas do Solo: um Procedimento Simplificado de Baixo Custo, *Comunicado Técnico, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento*.
- Blanco-Canqui, H. (2021). No-till technology has limited potential to store carbon: How can we enhance such potential? *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 313, 107352.

- Blanco-Canqui, H., y Lal, R. (2009). Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical reviews in plant science*, 28(3), 139-163.
- Blanco-Canqui, H., y Ruis, S.J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164-200.
- Blanco-Canqui, H., Holman, J. D., Schlegel, A. J., Tatarko, J., y Shaver, T. M. (2013a). Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: Effects on soil properties. *Soil Science Society of America journal*, 77(3), 1026-1034
- Blanco-Canqui, H., Mikha, M.M., Presley, D.R., y Claassen, M.M. (2011). Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties *Soil Science Society of America journal*, 75(4), 1471-1482.
- Blanco-Canqui, H., Shapiro, C.A., Wortmann, C.S., Drijber, R.A., Mamo, M., Shaver, T.M., y Ferguson, R.B. (2013b). Soil organic carbon: The value to soil properties. *Journal of Soil and Water Conservation*, 68(5), 129A–134A.
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T.M., Lindquist, J.L., Shapiro, C.A., Elmore, R.W., Francis, C.A., y Hergert, G.W. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107(6), 2449-2474.
- Bodner, G., Loiskandl, W., Buchan, G., y Kaul, H.P. (2008). Natural and management-induced dynamics of hydraulic conductivity along a cover-cropped field slope. *Geoderma*, 146, 317–325.
- Bodner, G., Leitner, D., y Kaul, H.P. (2014). Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. *Plant Soil*, 380, 133–151.
- Bolinder, M.A., Crotty, F., Elsen, A., Frac, M., Kismányoky, T., Lipiec, J., Tits, M., Tóth, Z., y Kätterer, T. (2020). The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes in agroecosystems: a synthesis of reviews. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(6), 929-952.
- Bongiovanni, M.D. y Lobartini, J.C. (2006). Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro- and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma*, 136, 660–665.
- Bormann, H., y Klaassen, K. (2008). Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. *Geoderma*, 145(3-4), 295-302.
- Bronick, C.J., y Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.
- Brooks, R.H., y Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap.* 3, 27 pp., Agr. Eng. Dep., Colorado State Univ., Fort Collins.
- Burdine, N. (1953). Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, 5(03), 71-78.
- Buschiazzo, D.E., Quiroga, A.R., y Stahr, K. (1991). Patterns of organic matter accumulation in soils of the semiarid Argentinian Pampas. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 154(6), 437-441.

- Cáceres, D.M. (2018). Biotecnología y poder ¿Usan los cultivos transgénicos menos agroquímicos? *Revista Interdisciplinaria de Estudios Agrarios*, 48.
- Calegari, A., Tourdonnet, S., Tessier, D., Rheinheimer, D.S., Ralisch, R., Hargrove, W., Guimarães, M.F., & Filho, J.T. (2013). Influence of soil management and crop rotation on physical properties in a long-term experiment in Paraná, Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(13), 2019-2031.
- Calonego, J.C., Raphael, J.P., Rigon, J.P., de Oliveira Neto L., y Rosolem, C.A. (2017). Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy*, 85: 31-37.
- Cambardella, C.A., y Elliott, E.T. (1992). Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 777-783.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., y Pereira, L.S. (2003). Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil and Tillage Research*, 70: 131-140.
- Carof, M., De Tourdonnet, S., Coquet, Y., Hallaire, V., y Roger-Estrade, J. (2007). Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France. *Soil Use and Management*, 23(3): 230-237.
- Carrasco, A.E., Sánchez, N.E., y Tamagno, L.E. (2012). *Modelo agrícola e impacto socio-ambiental en la Argentina: monocultivo y agronegocios*. La Plata: AUGM- SeDiCI.
- Castellini, M., Di Prima, S., y Iovino, M. (2018). An assessment of the BEST procedure to estimate the soil water retention curve: A comparison with the evaporation method. *Geoderma*, 320, 82-94.
- Castiglioni, M., Navarro Padilla, R., Eiza, M., Romaniuk, R., Beltran, M., Mousegne, F. (2016). Respuesta en el corto plazo de algunas propiedades físicas a la introducción de cultivos de cobertura. *Ciencia del Suelo*, 34, 263–278.
- Castiglioni, M.G., y Behrends Kraemer, F. (2019). Short-term effect of cover crops on aggregate stability assessed by two techniques. *Ciencia del Suelo*, 37(2): 298-314.
- Caviglia, O.P., y Andrade, F.H. (2010). Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*, 3(1): 1-8.
- Celette, F., Gaudin, R., y Gary, C. (2008). Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy*, 29, 153–162.
- Chagas, C., Marelli, H., y Santanatoglia, O. (1994). Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol típico bajo tres sistemas de labranza. *Ciencia del suelo*, 12, 11–16.

- Chakraborty, P., Singh, J., Singh, N., y Kumar, S. (2022). Assessing the influence of cover crop on soil water dynamics using soil moisture measurements and hydrus-1D Simulations. *Soil Science Society of America Journal*.
- Chalise, K.S., Singh, S., Wegner, B.R., Kumar, S., Pérez-Gutiérrez, J.D., Osborne, S.L., Nleya, T., Guzman, J., y Rohila, J.S. (2019). Cover crops and returning residue impact on soil organic carbon, bulk density, penetration resistance, water retention, infiltration, and soybean yield. *Agronomy Journal*, 111(1): 99-108.
- Chandrasekhar, P., Kreiselmeier, J., Schwen, A., Weninger, T., Julich, S., Feger, K.H., y Schwärzel, K. (2018). Why we should include soil structural dynamics of agricultural soils in hydrological models. *Water*, 10(12): 1862.
- Chandrasekhar, P., Kreiselmeier, J., Schwen, A., Weninger, T., Julich, S., Feger, K. H., y Schwärzel, K. (2019). Modeling the evolution of soil structural pore space in agricultural soils following tillage. *Geoderma*, 353: 401-414.
- Chertov, O.G., y Komarov, A.S. (1997). SOMM: A model of soil organic matter dynamics. *Ecological Modelling*, 94(2-3): 177–189.
- Christensen, B.T. (2001). Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 52: 345-353.
- Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Deneff, K. y Paul, E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19: 988–995.
- Dabney, S.M., Delgado, J.A., y Reeves, D.W. (2001). Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7-8): 1221-1250.
- Dabney, S.M., Delgado, J.A., Meisinger, J.J., Schomberg, H.H., Liebig, M.A., Kaspar, T., Mitchell, J., y Reeves, W. (2010). Using cover crops and cropping systems for nitrogen management. *Advances in nitrogen management for water quality*, 231-282.
- Daigh, A.L., Helmers, M.J., Kladvko, E., Zhou, X., Goeken, R., Cavdini, J., ... y Sawyer, J. (2014a). Soil water during the drought of 2012 as affected by rye cover crops in fields in Iowa and Indiana. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(6), 564-573.
- Daigh, A.L., Zhou, X., Helmers, M.J., Pederson, C.H., Ewing, R., y Horton, R. (2014b). Subsurface drainage flow and soil water dynamics of reconstructed prairies and corn rotations for biofuel production. *Vadose Zone Journal*, 13(4).
- De Pue, J., Rezaei, M., Van Meirvenne, M., y Cornelis, W.M. (2019). The relevance of measuring saturated hydraulic conductivity: Sensitivity analysis and functional evaluation. *Journal of Hydrology*, 576, 628–638.
- Delgado, J.A., Mosquera, V.H.B., Alwang, J.R., Villacis-Aveiga, A., Ayala, Y.E.C., Neer, D., Monar, C., y López, L.O.E. (2021). Potential use of cover crops for

soil and water conservation, nutrient management, and climate change adaptation across the tropics. *Advances in Agronomy*, 165, 175-247.

- Derpsch, R. (1998). Historical review of no-tillage cultivation of crops. Proceedings, The 1st JIRCAS Seminar on Soybean Research. No-tillage Cultivation and Future Research Needs, Iguazu Falls, Brazil. JIRCAS Working Report N° 13. 12 pp.
- Derpsch, R. (2003). Conservation tillage, no-tillage and related technologies. *Conservation agriculture*, 181-190.
- Derpsch, R., y Friedrich, T. (2009). Development and current status of no-till adoption in the world. 18th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO). Disponible en: <https://soil4234.okstate.edu/Articles/DerpschFriedrich%202009%20Development%20and%20Current%20Status%20of%20No-till%20Derpsch%20Final.pdf>
- Di Pace, M. (1992). Las utopías del medio ambiente. Centro Editor de América Latina. Buenos Aires, Argentina. 204 pp.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W. (2008) InfoStat, versión 2008. Argentina: Grupo infostat, fca, Universidad Nacional de Córdoba.
- Díaz-Zorita, M., Barraco, M., y Álvarez, M. (2004). Efectos de doce años de labranzas en un hapludol del Noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo*, 22(1), 11-18.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G.A., y Grove, J.H. (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 1-18.
- Dijkstra, F., Zhu, B., y Cheng, W. (2021). Root effects on soil organic carbon: a double-edged sword. *New Phytologist*, 230(1), 60-65.
- Ding, G., Liu, X., Herbert, S., Novak, J., Amarasiriwardena, D., Xing, B. (2006). Effect of cover crop management on soil organic matter. *Geoderma*, 130(3-4), 229-239.
- Ding, G., Novak, J.M., Amarasiriwardena, D., Hunt, P.G., y Xing, B. (2002). Soil organic matter characteristics as affected by tillage management. *Soil Science Society of America Journal*, 66(2), 421-429.
- Doane, T.A., Devêvre, O.C., & Horwath, W.R. (2003). Short-term soil carbon dynamics of humic fractions in low-input and organic cropping systems. *Geoderma*, 114(3-4), 319-331.
- Domínguez, A., y Bedano, J.C. (2016). The adoption of no-till instead of reduced tillage does not improve some soil quality parameters in Argentinian Pampas. *Applied Soil Ecology*, 98, 166-176.
- Domínguez, A., Bedano, J.C., y Becker, A.R. (2010). Negative effects of no-till on soil macrofauna and litter decomposition in Argentina as compared with natural grasslands. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 51-59.

- Duchaufour, P. (1982). The dynamics of organic matter. *Pedology* (pp. 28-66). Springer, Dordrecht.
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30, 211-223.
- Duval, M., Galantini, J., Martínez, J., López, F., y Wall, L. (2015). Evaluación de la calidad física de los suelos de la región pampeana: efectos de las prácticas de manejo. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias – UNR*, 0(25), 33–43.
- Duval, M.E., De Sa Pereira, E., Iglesias, J.O., y Galantini, J. (2014). Efecto de uso y manejo del suelo sobre las fracciones de carbono orgánico en un Argiudol. *Ciencia del Suelo*, 32(1), 105-115.
- Duval, M.E., Galantini J.A., Iglesias, J.O., Canelo, S., Martínez, J.M., y Wall, L. (2013). Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research*, 131, 11-19.
- Duval, M.E., Galantini, J.A., y Martínez, F.L. (2018). Labile soil organic carbon for assessing soil quality: influence of management practices and edaphic conditions. *Catena*, 171, 316–326.
- Duval, M.E., Galantini, J.A., Capurro, J.E, y Martínez, J.M. (2016). Winter cover crops in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions. *Soil and Tillage*, 161, 95-105.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., y Bailey, B.A. (2005). Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. *Communications in soil science and plant analysis*, 36(19-20), 2733-2757.
- Fernandez, P.L., Alvarez, C.R., Behrends Kraemer, F., Morrás, H.J.M., Scheiner, J., Boivin, P., y Taboada, M.A. (2020). Curvas de contracción del suelo y micromorfología bajo diferentes manejos. *Ciencia del suelo*, 38(1), 29-44.
- Ferraro, D.O., y Ghersa, C.M. (2013). Fuzzy assessment of herbicide resistance risk: Glyphosate-resistant johnsongrass, *Sorghum halepense* (L.) Pers., in Argentina's croplands. *Crop Protection*, 51, 32-39.
- Fronning, B.E., Thelen, K.D., y Min, D. (2008). Use of manure, compost and cover crops to supplant crop residue carbon in corn stover removed cropping systems. *Agronomy Journal*, 100, 1703–1710.
- Fukuoka, M. (1985). The natural way of farming. Tokyo: Japan Publications.
- Gabriel, J.L., Quemada, M., Martín-Lammerding, D., y Vanclooster, M. (2019). Assessing the cover crop effect on soil hydraulic properties by inverse modelling in a 10-year field trial. *Agricultural Water Management*, 222, 62-71.
- Galantini, J.A. (2008). Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de Argentina. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Argentina. p. 19-39.
- García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J.L., Alonso-Ayuso, M., Quemada, M. (2018). Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma*, 322, 81–88.

- García-Préachac, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G., y Terra, J.A. (2004). Integrating no-till into crop–pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 1-13.
- Gardner, W.R., & Mayhugh, M.S. (1958). Solutions and tests of the diffusion equation for the movement of water in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 22(3), 197-201.
- Głab, T., Scigalska, B., Łabuz, B. (2013). Effect of crop rotations with triticale (xTriticosecale Wittm.) on soil pore characteristics. *Geoderma*, 202, 1–7.
- Goidts, E., Van Wesemael, B., y Crucifix, M. (2009). Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales. *European Journal of Soil Science*, 60(5), 723-739.
- González Chávez, M.D.C., Aitkenhead-Peterson, J., Gentry, T.J., Zuberer, D., Hons, F., y Loeppert, R. (2010). Soil microbial community, C, N, and P responses to long-term tillage and crop rotation. *Soil and Tillage Research*, 106, 285–293.
- González-Peñaloza, F.A., Cerdà, A., Zavala, L.M., Jordán, A., Giménez-Morera, A., y Arcenegui, V. (2012). Do conservative agriculture practices increase soil water repellency? A case study in citrus-cropped soils. *Soil and Tillage Research*, 124, 233-239.
- Guimarães, D.V., Gonzaga, M.I.S., da Silva, T.O., da Silva, T.L., da Silva Dias, N., y Matias, M.I.S. (2013). Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil and Tillage Research*, 126, 177-182.
- Haas, C. y Horn, R. (2018). Impact of small-scaled differences in micro-aggregation on physico-chemical parameters of macroscopic biopore walls. *Frontiers of Environmental Sciences*, 6, 90.
- Haruna, S.I., Anderson, S.H., Nkongolo, N.V., y Zaibon, S. (2018). Soil hydraulic properties, Influence of tillage and cover crops. *Pedosphere*, 28(3), 430-442.
- Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J., Parlange, J.Y., (1994). Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer 2. Physically based infiltration equation. *Water Resource Research*, 30, 2931–2935.
- Hayes, M.H., y Swift, R.S. (2020). Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water. *Advances in Agronomy*, 163, 1-37.
- Herbrich, M., y Gerke, H.H. (2017). Scales of water retention dynamics observed in eroded Luvisols from an arable postglacial soil landscape. *Vadose Zone Journal*, 16(10), 1-17.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego.
- Hochman, D., Dor, M., y Mishaël, Y. (2021). Diverse effects of wetting and drying cycles on soil aggregation: Implications on pesticide leaching. *Chemosphere*, 263, 127910.
- Holden, J. (2009). Flow through macropores of different size classes in blanket peat. *Journal of Hydrology*, 364(3-4), 342-348.

- Hopkins, F. M., Torn, M. S., & Trumbore, S. E. (2012). Warming accelerates decomposition of decades-old carbon in forest soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(26), E1753-E1761.
- Hu, W., Shao, M., Wang, Q., Fan, J., y Horton, R. (2009). Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. *Geoderma*, *149*(3-4), 355–366.
- Huang, J., Liu, W., Pan, S., Wang, Z., Yang, S., Jia, Z., Wang, Z., Deng, M., Yang, L., Liu, C., Chang, P., y Liu, L. (2021). Divergent contributions of living roots to turnover of different soil organic carbon pools and their links to plant traits. *Functional Ecology*, *35*, 2821–2830.
- Hudek, C., Putinica, C., Otten, W., y De Baets, S. (2022). Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science*, *73*(1), e13147.
- IARC. (2015). IARC Monographs Volume 112: evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides. World Health Organization, Lyon.
- Imhoff, S., Ghiberto, P.J., Grioni, A., Gay, J.P. (2010). Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma*, *158*, 268–274.
- Iovino, M., Castellini, M., Bagarello, V., y Giordano, G. (2016). Using static and dynamic indicators to evaluate soil physical quality in a Sicilian area. *Land Degradation & Development*, *27*(2), 200-210.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Irmak, S., Sharma, V., Mohammed, A.T., y Djaman, K. (2018). Impacts of cover crops on soil physical properties: Field capacity, permanent wilting point, soil-water holding capacity, bulk density, hydraulic conductivity, and infiltration. *Transactions of the ASABE*, *61*(4), 1307-1321.
- ISAAA (2016). Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2016. ISAAA Brief No. 52. ISAAA: Ithaca, Nueva York. 135 pp.
- IUSS Working Group WRB. (2007). World Reference Base for soil resources 2006, first update 2007. In: World Soil Resources Reports. FAO, Rome, pp. 103
- Janzen, H.H. (2006). The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology and Biochemistry*, *38*(3), 419-424.

- Jensen, J.L., Schjønning, P., Watts, C.W., Christensen, B.T., Munkholm, L.J. 2020. Short-term changes in soil pore size distribution: Impact of land use. *Soil and Tillage Research*, 199, 104597.
- Jian, J., Du, X., Reiter, M.S., y Stewart, R.D. (2020). A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. *Soil Biology and Biochemistry*, 143, 107735.
- Jirků, V., Kodešová, R., Nikodem, A., Mühlhanslová, M., y Žigová, A. (2013). Temporal variability of structure and hydraulic properties of topsoil of three soil types. *Geoderma*, 204, 43-58.
- John, A., Fuentes, H.R., y George, F. (2021). Characterization of the water retention curves of Everglades wetland soils. *Geoderma*, 381, 114724.
- Kargas, G., Kerkides, P., Sotirakoglou, K., y Poulouvasilis, A. (2016). Temporal variability of surface soil hydraulic properties under various tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 158, 22-31.
- Karlen, D.L., Hurley, E.G., Andrews, S.S., Cambardella, C.A., Meek, D.W., Duffy, M.D., y Mallarino, A.P. (2006). Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. *Agronomy journal*, 98(3), 484-495.
- Kay, B.D., y VandenBygaart, A.J. (2002). Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 66, 107-108.
- Keisling, T.C., Scott, H.D., Waddle, B.A., Williams, W., y Frans, R.E. (1994). Winter cover crops influence on cotton yield and selected soil properties. *Communications in soil science and plant analysis*, 25(19-20), 3087-3100.
- Kiani, M., Hernandez-Ramirez, G., Quideau, S., Smith, E., Janzen, H., Larney, F.J., y Puurveen, D. (2017). Quantifying sensitive soil quality indicators across contrasting long-term land management systems: Crop rotations and nutrient regimes. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 248, 123-135.
- Kleber, M., y Johnson, M.G. (2010). Advances in understanding the molecular structure of soil organic matter: implications for interactions in the environment. *Advances in agronomy*, 106, 77-142.
- Kleber, M., & Lehmann, J. (2019). Humic substances extracted by alkali are invalid proxies for the dynamics and functions of organic matter in terrestrial and aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 48(2), 207-216.
- Kögel-Knabner, I. (2000). Analytical approaches for characterizing soil organic matter. *Organic Geochemistry*, 31(7-8), 609-625.
- Kögel-Knabner, I., Guggenberger, G., Kleber, M., Kandeler, E., Kalbitz, K., Scheu, S., ... & Leinweber, P. (2008). Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(1), 61-82.
- Kögel-Knabner, I., y Rumpel, C. (2018). Advances in molecular approaches for understanding soil organic matter composition, origin, and turnover: a historical overview. *Advances in agronomy*, 149, 1-48.

- Koorevaar, P., Menelik, G., Dirksen, D., (1983). *Elements of soil physics*. Elsevier Science Publisher, Amsterdam.
- Kreiselmeier, J., Chandrasekhar, P., Weninger, T., Schwen, A., Julich, S., Feger, K. H., y Schwärzel, K. (2019). Quantification of soil pore dynamics during a winter wheat cropping cycle under different tillage regimes. *Soil and Tillage Research*, 192: 222-232.
- Kreiselmeier, J., Chandrasekhar, P., Weninger, T., Schwen, A., Julich, S., Feger, K.H., y Schwärzel, K. (2020). Temporal variations of the hydraulic conductivity characteristic under conventional and conservation tillage. *Geoderma*, 362, 114-127.
- Krstić, Đ., Vujić, S., Jaćimović, G., D'Ottavio, P., Radanović, Z., Erić, P., y Čupina, B. (2018). The effect of cover crops on soil water balance in rain-fed conditions. *Atmosphere*, 9(12), 492.
- Kutílek, M., y Nielsen, D.R. (1994). *Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines*. Catena Verlag.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627.
- Lal, R. (2009a). The plow and agricultural sustainability. *Journal of sustainable agriculture*, 33(1), 66-84.
- Lal, R. (2009b). Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal of Soil Science*, 60(2), 158-169.
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277.
- Landl, M., Schnepf, A., Uteau, D., Peth, S., Athmann, M., Kautz, T., ... y Vanderborght, J. (2019). Modeling the impact of biopores on root growth and root water uptake. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-20.
- Lascano, R.J. (1991). Review of models for predicting soil water balance. *IAHS Publ*, 199, 443-458.
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J. M., Cuenca, R., Braud, I., y Haverkamp, R. (2006). Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 521-532.
- Lavallee, J.M., Soong, J.L., y Cotrufo, M.F. 2020. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 26(1), 261-273.
- Lehmann, J., y Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60-68.
- Leinweber, P., y Schulten, H.R. 1999. Advances in analytical pyrolysis of soil organic matter. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 49(1-2), 359–383.

- Lenka, N.K., y Lal, R. (2013). Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system. *Soil and Tillage Research*, 126, 78-89.
- Liang, Z., Mortensen, E. Ø., De Notaris, C., Elsgaard, L., & Rasmussen, J. (2022). Subsoil carbon input by cover crops depends on management history. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 326, 107800.
- Liesch, A.M., Krueger, E.S., y Ochsner, T.E. (2011). Soil structure and physical properties under rye-corn silage double-cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 75, 1307-1314.
- Loague, K., y Green, R.E. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of contaminant hydrology*, 7(1-2), 51-73.
- Lozano, L.A. (2014). *Desarrollo de estructura laminar del suelo en siembra directa. Factores predisponentes y efectos sobre las propiedades hidráulicas* (Tesis Doctoral). Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Lozano, L.A., Soracco, C.G., Cornelis, W.M., Gabriels, D., Sarli, G.O., y Villarreal, R. (2013). Anisotropy of pore size classes' connectivity related to soil structure under no tillage. *Soil Science*, 178(11), 612-617.
- Lozano, L.A., Soracco, C.G., Villarreal, R., Ressia, J.M., Sarli, G.O., y Filgueira, R.R. (2016). Soil Physical Quality and Soybean Yield as Affected by Chiseling and Subsoiling of a No-Till Soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40.
- Luo, Z., Viscarra Rossel, R.A., y Shi, Z. (2020). Distinct controls over the temporal dynamics of soil carbon fractions after land use change. *Global change biology*, 26(8), 4614-4625.
- Lupi, L., Bedmar, F., Puricelli, M., Marino, D., Aparicio, V.C., Wunderlin, D., y Miglioranza, K.S. (2019). Glyphosate runoff and its occurrence in rainwater and subsurface soil in the nearby area of agricultural fields in Argentina. *Chemosphere*, 225, 906-914.
- Manuel-Navarrete, D., Gallopín, G.C., Blanco, M., Díaz-Zorita, M., Ferraro, D., Herzer, H., ... y Celis, A. (2005). *Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extra pampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas*. CEPAL, Santiago de Chile. 65 pp.
- Mazetto Júnior, J., Torres, J. L. R., Costa, D. D. D., Silva, V. R., Souza, Z. M., y Lemes, E. M. (2019). Production and decomposition of cover crop residues and associations with soil organic fractions. *The Journal of Agricultural Science*, 11, 58-69.
- McClelland, S.C., Paustian, K., y Schipanski, M.E. (2021). Management of cover crops in temperate climates influences soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Ecological Applications*, 31(3), e02278.

- McDaniel, M.D., Tiemann, L.K., y Grandy, A.S. (2014). Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecological Applications*, 24(3), 560-570.
- Mennan, H., Jabran, K., Zandstra, B.H., y Pala, F. (2020). Non-chemical weed management in vegetables by using cover crops: A review. *Agronomy*, 10(2), 257.
- Meurer, K., Barron, J., Chenu, C., Coucheney, E., Fielding, M. Hallet, P. Herrmann, A.M., Keller, T., Koestel, J., Larsbo, M., Lewan, E., Or, D., Parsons, D., Parvin, N., Taylor, A., Vereecken, H. Jarvis, N. (2020). A framework for modelling soil structure dynamics induced by biological activity. *Global Change Biology*, 26, 5382-5406.
- Meyer, N., Bergez, J.E., Constantin, J., Belleville, P., y Justes, E. (2020). Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management. *Agricultural Water Management*, 231, 105998.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Mubvumba, P., DeLaune, P.B., y Hons, F.M. (2021). Soil water dynamics under a warm-season cover crop mixture in continuous wheat. *Soil and Tillage Research*, 206, 104823.
- Mukherjee, A., y Lal, R. (2015). Short-term effects of cover cropping on the quality of a Typic Argiaquolls in Central Ohio. *Catena*, 131, 125-129.
- Munawar, A., Blevins, R.L., Frye, W.W., y Saul, M.R. (1990). Tillage and cover crop management for soil water conservation. *Agronomy Journal*, 82(4), 773-777.
- Murphy, B.W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605-635.
- Nascente, A.S., y Stone, L.F. (2018). Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation. *Rice Science*, 25(6), 340-349.
- Naveed, M., Brown, L.K., Raffan, A.C., George, T.S., Bengough, A.G., Roose, T., Sinclair, I., Koebernick, N., Cooper, L., Hackett, C.A., Hallett, P.D. (2017). Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time. *European Journal of Soil Science*, 68, 806–816.
- Nelson, D.W., y Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En: *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, C.T., y M.E. Sumner (Eds.). Ed. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Madison. pp. 961–1010.
- Nielsen, D.C., Lyon, D.J., Hergert, G.W., Higgins, R.K., y Holman, J.D. (2015). Cover crop biomass production and water use in the Central Great Plains. *Agronomy Journal*, 107(6), 2047-2058.

- NOAA George E. Marsh Album, Historic CyGS Collection. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dust-storm-Texas-1935.png>. Fecha de acceso: abril 2021.
- Nobili, M., Bravo, C., y Chen, Y. (2020). The spontaneous secondary synthesis of soil organic matter components: A critical examination of the soil continuum model theory. *Applied Soil Ecology*, *154*, 103655.
- Novara, A., Cerda, A., Barone, E., y Gristina, L. (2021). Cover crop management and water conservation in vineyard and olive orchards. *Soil and Tillage Research*, *208*, 104896.
- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., y Melchiori, R.J.M. (2011). Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma*, *167*, 254–260.
- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., y Piñeiro, G. (2017). Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. *Soil and Tillage Research*, *165*, 128-136.
- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Wilson, M.G., y Sasal, M.C. (2013). Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*, *195*, 260-267.
- Oliveira, M., Barre, P., Trindade, H., & Virto, I. (2019). Different efficiencies of grain legumes in crop rotations to improve soil aggregation and organic carbon in the short-term in a sandy Cambisol. *Soil and Tillage Research*, *186*, 23-35.
- Okada, E. (2014). *Factores biológicos, físicos y químicos que condicionan la dinámica del herbicida glifosato en distintos suelos de la Argentina* (Tesis Doctoral). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina.
- Okada, E., Pérez, D., De Gerónimo, E., Aparicio, V., Massone, H., y Costa, J. L. (2018). Non-point source pollution of glyphosate and AMPA in a rural basin from the southeast Pampas, Argentina. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(15), 15120-15132.
- Olk, D.C., Bloom, P.R., Perdue, E.M., McKnight, D.M., Chen, Y., Fahrenhorst, A., Senesi, N., Chin, Y.P. Schmitt-Kopplin, P., Hertkorn, N., y Harir, M. (2019a). Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters. *Journal of Environmental Quality*, *48*, 217–232.
- Olk, D.C., Bloom, P.R., De Nobili, M., Chen, Y., McKnight, D., Wells, M., y Weber, J. (2019b). Using humic fractions to understand natural organic matter processes in soil and water: selected studies and applications. *Journal of Environmental Quality*, *48*, 1633-1643.
- Olson, K.R., Ebelhar, S.A., y Lang, J.M. (2010). Cover crop effects on crop yields and soil organic carbon content. *Soil Science*, *175*(2), 89-98.
- Pansu, M., y Gautheyrou, J. (2007). *Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods*. Springer Science & Business Media.

- Paul, E.A. (2016). The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 98, 109-126.
- Pausch, J., Zhu, B., Kuzyakov, Y., y Cheng, W. (2013). Plant inter-species effects on rhizosphere priming of soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 91-99.
- Peña-Sancho, C., López, M.V., Gracia, R., Moret-Fernández, D. (2017). Effects of tillage on the soil water retention curve during a fallow period of a semiarid dryland. *Soil Research*, 55, 114–123.
- Pérez, D.J., Okada, E., De Gerónimo, E., Menone, M.L., Aparicio, V.C., y Costa, J.L. (2017a). Spatial and temporal trends and flow dynamics of glyphosate and other pesticides within an agricultural watershed in Argentina. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36, 3206–3216
- Pérez, D.J., Okada, E., Menone, M.L., y Costa, J.L. (2017b). Can an aquatic macrophyte bioaccumulate glyphosate? Development of a new method of glyphosate extraction in *Ludwigia peploides* and watershed scale validation. *Chemosphere*, 185, 975-982.
- Perroux, K.M., y White, I., (1988). Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 52(2), 1205–1215.
- Peters, A., y Durner, W. (2008). Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356, 147–162.
- Pinto, P., Long, M.E.F., y Piñeiro, G. (2017). Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 48-57.
- Piñeiro, G., Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., y Oesterheld, M. (2009). Grazing effects on belowground C and N stocks along a network of cattle exclosures in temperate and subtropical grasslands of South America. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2).
- Platt, J. (2021). *Southeastern US Upper Coastal Plain Ecological Sites for Dynamic Soil Property Characterization* (Tesis de maestría). Graduate Faculty of Auburn University, Auburn, Alabama.
- Plaza-Bonilla, D., Álvaro-Fuentes, J., y Cantero-Martínez, C. (2014). Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices. *Soil and Tillage Research*, 139, 19–22.
- Poeplau, C., y Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops— A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33-41.
- Priesack, E., y Durner, W. (2006). Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function. *Vadose Zone Journal*, 5, 121–124.
- Primost, J.E., Marino, D.J., Aparicio, V.C., Costa, J.L., y Carriquiriborde, P. (2017). Glyphosate and AMPA, “pseudo-persistent” pollutants under real-world

- agricultural management practices in the Mesopotamic Pampas agroecosystem, Argentina. *Environmental Pollution*, 229, 771-779.
- Purakayastha, T.J., Rudrappa, L., Singh, D., Swarup, A., y Bhadraray, S. (2008). Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize–wheat–cowpea cropping system. *Geoderma*, 144(1-2), 370-378.
- Qi, Z., Helmers, M.J., y Kaleita, A.L. (2011). Soil water dynamics under various agricultural land covers on a subsurface drained field in north-central Iowa, USA. *Agricultural Water Management*, 98(4), 665-674.
- Ramos, M.L.G., Silva, V.G.D., Carvalho, A.M.D., Malaquias, J.V., Oliveira, A.D.D., Sousa, T.R.D., y Silva, S.B. (2020). Carbon fractions in soil under no-tillage corn and cover crops in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55.
- Rasse, D.P., Rumpel, C., & Dignac, M.F. (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and soil*, 269(1), 341-356.
- Recio-Vázquez, L., Almendros, G., Knicker, H., Carral, P., y Álvarez, A. (2014). Multivariate statistical assessment of functional relationships between soil physical descriptors and structural features of soil organic matter in Mediterranean ecosystems. *Geoderma*, 230, 95-107.
- Reeves, D.W. (1994). Cover crops and rotations. En: *Advances in soil science: Crops residue management*. CRC-Press.
- Restovich, S.B., Andriulo, A.E., y Améndola, C. (2011). Introducción de cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: efecto sobre algunas propiedades del suelo. *Ciencia del suelo*, 29(1), 61-73.
- Restovich, S.B., Andriulo, A.E., y Portela, S.I. (2012). Introduction of cover crops in a maize–soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Research*, 128, 62-70.
- Reynolds, W.D. (2017). Use of bimodal hydraulic property relationships to characterize soil physical quality. *Geoderma*, 294, 38-49.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., y Yang, X.M. (2015). Temporal effects of food waste compost on soil physical quality and productivity. *Canadian Journal of Soil Science*, 95(3), 251-268.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., y Yang, X.M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263.
- Rimski-Korsakov, H., Alvarez, C. R., y Lavado, R. S. (2015). Cover crops in the agricultural systems of the Argentine Pampas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(6), 134A-140A.
- Virano Riquelme, V.V., Fontenla-Razzetto, G., Wahren, F.T., Feger, K.H., Heil, B., Heilig, D., Kovacs, G. y Julich, S. (2021). The Impact of Poplar Short Rotation Coppice on Topsoil Physical Properties and Related Water Conditions. *Bioenergy Research*, 14(2), 1-10.

- Robertson, A.D., Paustian, K., Ogle, S., Wallenstein, M.D., Lugato, E., y Cotrufo, M.F. (2019). Unifying soil organic matter formation and persistence frameworks: the MEMS model. *Biogeosciences*, 16(6), 1225-1248.
- Romaniuk, R., Beltrán, M., Brutti, L., Costantini, A., Bacigaluppo, S., Sainz-Rozas, H., y Salvagiotti, F. (2018). Soil organic carbon, macro-and micronutrient changes in soil fractions with different lability in response to crop intensification. *Soil and Tillage Research*, 181, 136-143.
- Romano, N., Nasta, P., Severino, G., y Hopmans, J.W. (2011). Using bimodal lognormal functions to describe soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 75(2), 468-480.
- Ronco, A.E., Marino, D.J.G., Abelando, M., Almada, P., y Apartin, C.D. (2016). Water quality of the main tributaries of the Paraná Basin: glyphosate and AMPA in surface water and bottom sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(8), 1–13
- Rossi, A.S., Fantón, N., Michlig, M.P., Repetti, M.R., y Cazenave, J. (2020). Fish inhabiting rice fields: Bioaccumulation, oxidative stress and neurotoxic effects after pesticides application. *Ecological Indicators*, 113, 106186.
- Sainju, U.M., Singh, B.P., y Whitehead, W.F. (2000). Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen and tomato yield. *Canadian journal of soil science*, 80(3), 523-532.
- Sainju, U.M., Singh, B.P., Whitehead, W.F., y Wang, S. (2006). Carbon supply and storage in tilled and nontilled soils as influenced by cover crops and nitrogen fertilization. *Journal of environmental quality*, 35(4), 1507-1517.
- SAMLA (2004). Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina. Dirección de Producción Agrícola. Versión Electrónica.
- Sandin, M., Jarvis, N., y Larsbo, M. (2018). Consolidation and surface sealing of nine harrowed Swedish soils. *Soil and Tillage Research*, 181, 82–92.
- Santos, I.L.D., Caixeta, C.F., Sousa, A.A.T.C.D., Figueiredo, C.C.D., Ramos, M.L.G., y Carvalho, A.M.D. (2014). Cover plants and mineral nitrogen: effects on organic matter fractions in an oxisol under no-tillage in the cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(6), 1874-1881.
- Sasal, C. (2012). *Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua* (Tesis Doctoral). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Sasal, M.C., Andriulo, A.E., y Taboada, M.A. (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*, 87, 9–18.
- Sasal, M. C., Castiglioni, M. G., y Wilson, M. G. (2010). Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil and Tillage Research*, 108(1-2), 24-29.

- Sasal, M.C., Hubert Boizard, A.E., Andriulo, M.G., y Wilson, J.L. (2017). Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research*, 173, 33–41.
- Sastre, B., Marques, M.J., García-Díaz, A., Bienes, R. (2018). Three years of management with cover crops protecting sloping olive groves soils, carbon and water effects on gypsiferous soil. *Catena*, 171, 115–124.
- Scanlan, C.A. (2009). *Processes and effects of root-induced changes to soil hydraulic properties* (Tesis Doctoral). University of Western Australia, Australia.
- Schindler, U., y Müller, L. (2006). Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169, 623–629.
- Schindler, U., Durner, W., Von Unold, G., Mueller, L., y Wieland, R. (2010). The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *Journal of plant nutrition and soil science*, 173(4), 563-572.
- Schmidt, E.S., Villamil, M.B., y Amiotti, N.M. (2018). Soil quality under conservation practices on farm operations of the southern semiarid pampas region of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 176, 85-94.
- Schnitzer, M. (1982). Organic matter characterization. En: *Methods of soil analysis, part 2: Chemical and microbiological properties*, ed. A. L. Page, R. H. Miller, y D. R. Keeny, 581–594. Madison: American Society of Agronomy.
- Schnitzer, M., y Monreal, C.M. (2011). Quo vadis soil organic matter research? A biological link to the chemistry of humification. *Advances in agronomy*, 113, 143-217.
- Schulte, E.E., y Hoskins, B. (1995). Recommended soil organic matter tests. Recommended Soil Testing Procedures for the North Eastern USA. *Northeastern Regional Publication*, 493, 52-60.
- Schwen, A., Bodner, G., Scholl, P., Buchan, G.D., Loiskandl, W. (2011a). Temporal dynamics of soil hydraulic properties and the water-conducting porosity under different tillage. *Soil Tillage Research*, 113, 89–98.
- Schwen, A., Bodner, G., y Loiskandl, W. (2011b). Time-variable soil hydraulic properties in near-surface soil water simulations for different tillage methods. *Agricultural Water Management*, 99(1), 42-50.
- Schwen, A., Zimmermann, M., y Bodner, G. (2014). Vertical variations of soil hydraulic properties within two soil profiles and its relevance for soil water simulations. *Journal of Hydrology*, 516, 169-181.
- Scianca, C. (2010). *Cultivos de cobertura en molisoles de la región pampeana. Producción de materia seca, eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno e incidencia sobre el cultivo de soja* (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Sharma, P., Singh, A., Kahlon, C.S., Brar, A.S., Grover, K.K., Dia, M., y Steiner, R.L. (2018). The role of cover crops towards sustainable soil health and

- agriculture—A review paper. *American Journal of Plant Sciences*, 9(9), 1935-1951.
- SIGA (2020). Sistema de Información y Gestión Meteorológica INTA, Argentina. Disponible en: <http://siga2.inta.gov.ar/>
- Siltecho, S., Hammecker, C., Sriboonlue, V., Clermont-Dauphin, C., Trelo-Ges, V., Antonino, A.C.D., y Angulo-Jaramillo, R. (2015). Use of field and laboratory methods for estimating unsaturated hydraulic properties under different land uses. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(3), 1193-1207.
- Šimůnek, J., y van Genuchten, M.T. (2008). Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 782-797.
- Singh, S., Kumar, V., Gill, J.P.K., Datta, S., Singh, S., Dhaka, V., Kapoor, D., Wani, A.B., Dhanjal, D.S., Kumar, M., Harikumar, S.L., y Singh, J. (2020). Herbicide glyphosate: Toxicity and microbial degradation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7519.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., y Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., y Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and soil*, 241(2), 155-176.
- Smettem, K. R. J., y Kirkby, C. (1990). Measuring the hydraulic properties of a stable aggregated soil. *Journal of Hydrology*, 117(1-4), 1-13.
- Soil Survey Staff (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Sokal, R.R., y Rohlf, F.J. (1995). Biometry: The Principles and Practices of Statistics in Biological Research [Hardcover], Biological Research.
- Sokol, N.W., Kuebbing, S.E., Karlsen-Ayala, E., y Bradford, M.A. (2019). Evidence for the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon. *New Phytologist*, 221(1), 233-246.
- Sollins, P., Homann, P., y Caldwell, B.A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, 74(1-2), 65-105.
- Soracco, C.G., Lozano, L.A., Sarli, G.O., Gelati, P.R., y Filgueira, R.R. (2010). Anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil and Tillage Research*, 109, 18-22.
- Soracco, C.G., Lozano, L.A., Villarreal, R., Melani, E., y Sarli, G.O. (2018a). Temporal variation of soil physical quality under conventional and no-till systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42.
- Soracco, C.G., Lozano, L.A., Villarreal, R., Palancar, T.C., Collazo, D.J., Sarli, G.O., y Filgueira, R.R. (2015). Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(2), 408-415.

- Soracco, C.G., Villarreal, R., Lozano, L.A., Vittori, S., Melani, E.M., Marino, D.J. (2018b). Glyphosate dynamics in a soil under conventional and no-till systems during a soybean growing season. *Geoderma*, 323, 13-21.
- Soracco, C.G., Villarreal, R., Melani, E.M., Oderiz, J.A., Salazar, M.P., Otero, M.F., Irizar, A.B., Lozano, L.A. (2019). Hydraulic conductivity and pore connectivity. Effects of conventional and no-till systems determined using a simple laboratory device. *Geoderma*, 337, 1236–1244.
- Sparks, D.L. (2003). Environmental soil chemistry: An overview. Environmental soil chemistry. San Diego, California.
- SSSA. (1997). Glossary of soil science term, Soil Science Society: Madison, Wisconsin.
- Stavi, I., Lal, R., Jones, S., y Reeder, R.C. (2012). Implications of cover crops for soil quality and geodiversity in a humid-temperate region in the Midwestern USA. *Land Degradation & Development*, 23(4), 322-330.
- Strudley, M.W., Green, T.R., y Ascough II, J.C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 4-48.
- Studdert, G.A., y Echeverria, H.E. (2000). Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1496-1503.
- Svoboda, M., Hayes, M., y Wood, D. (2012). *Standardized precipitation index: user guide*. World Meteorological Organization, Suiza.
- Swift, R.S. (1996). Organic matter characterization. En: Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods. D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, C.T., y M.E. Sumner (Eds.). Ed. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Madison.
- Tabashnik, B.E., Mota-Sanchez, D., Whalon, M.E., Hollingworth, R.M., y Carrière, Y. (2014). Defining terms for proactive management of resistance to Bt crops and pesticides. *Journal of economic entomology* 107(2), 496-507.
- Taboada, M.A. y Álvarez, C.R. (2008). Fertilidad física de los suelos. Editorial Facultad Agronomía. Buenos Aires. 237 pp.
- Taboada, M.A. y Varela, M.F. (2014). Impactos de las rotaciones de cultivos sobre los suelos. Disponible en: <https://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2014/12/RotaciondecultivosTaboada.docx.pdf>. Visto por ultima vez: noviembre 2020
- Taboada, M.A., Micucci, F.G., Cosentino, D.J., Lavado, R.S. (1998). Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 49(1-2), 57-63.
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, 33(2), 141-163.

- Topp, G.C., Reynolds, W.D., Cook, F.J., Kirby, J.M., y Carter, M.R. (1997). Physical attributes of soil quality. En: *Developments in soil science*. Elsevier.
- Tribouillois, H., Constantin, J., Casal, L., Villerd, J., y Therond, O. (2022). Introducing and expanding cover crops at the watershed scale: Impact on water flows. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 337, 108050.
- van Genuchten, M.T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898.
- van Genuchten, M.T., Leij, F.J., Yates, S.R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Roberts Kerr Environ. Reseach Lab.
- Vara, A.M., Piaza, A., y Arancibia, F. (2012). Biotecnología agrícola y “sojización” en la Argentina: controversia pública, construcción de consenso y ampliación del marco regulatorio. *Política y Sociedad*, 11(20), 135-170.
- Varela, M.F., Scianca, C.M., Taboada, M.A., y Rubio, G. (2014). Cover crop effects on soybean residue decomposition and P release in no-tillage systems of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 143, 59-66.
- Vendig, I.W. (2019). Effects of No-Till and Daikon Winter Crops on Surface Soil Structure and *Hydrology*.
- Ventrella, D., Castellini, M., Di Prima, S., Garofalo, P., y Lassabatère, L. (2019). Assessment of the physically-based HYDRUS-1D model for simulating the water fluxes of a Mediterranean cropping system. *Water*, 11(8), 1657.
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J.W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., ... y Allison, S.D. (2016). Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose zone journal*, 15(5).
- Villamil, M.B., Bollero, G.A., Darmody, R.G., Simmons, F.W., y Bullock, D.G. (2006). No-till corn/soybean systems including winter cover crops: Effects on soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70(6), 1936-1944.
- Villarreal, R. (2018). *Variación temporal de las propiedades físicas del suelo y su impacto en la dinámica del glifosato en suelos bajo siembra directa y labranza convencional* (Tesis Doctoral). Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Villarreal, R., Lozano, L.A., Salazar, M.P., Bellora, G.L., Melani, E.M., Polich, N., y Soracco, C.G. (2020). Pore system configuration and hydraulic properties. Temporal variation during the crop cycle in different soil types of Argentinean Pampas Region. *Soil and Tillage Research*, 198, 104528.
- Villarreal, R., Soracco, C.G., Lozano, L.A., Melani, E.M., y Sarli, G.O. (2017). Temporal variation of soil sorptivity under conventional and no-till systems determined by a simple laboratory method. *Soil and Tillage Research*, 168, 92-98.
- von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., y Marschner, B. (2007). SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(9), 2183-2207.

- Wagger, M.G., y Denton, H.P. (1989). Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no-till corn. *Soil Science Society of America Journal*, 53(4), 1206-1210.
- Wahl, N.A., Bens, O., Buczko, U., Hangen, E., y Hüttl, R.F. (2004). Effects of conventional and conservation tillage on soil hydraulic properties of a silty-loamy soil. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(11-12), 821-829.
- Walkley, A., y Black, I.A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29–38.
- Wander, M. (2004). Soil organic matter fractions and their relevance to soil function, in Weil, R. R.: Soil organic matter in sustainable agriculture. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Ward, P.R., Flower, K.C., Cordingley, N., Weeks, C., y Micin, S.F. (2012). Soil water balance with cover crops and conservation agriculture in a Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 132, 33-39.
- Watson, K.W., y Luxmoore, R.J. (1986). Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 578-582.
- Weninger, T., Bodner, G., Kreiselmeyer, J., Chandrasekhar, P., Julich, S., Feger, K.-H., Schwärzel, K., y Schwen, A. (2018). Combination of measurement methods for a wide- range description of hydraulic soil properties. *Water*, 10, 1021.
- Williams, S.M., y Weil, R.R. (2004). Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1403-1409.
- Wilson, M.G., Maggi, A.E., Castiglioni, M.G., Gabioud, E.A., y Sasal, M.C. (2020). Conservation of ecosystem services in argiudolls of Argentina. *Agriculture*, 10(12), 649.
- Wingeyer, A.B., Amado, T.J., Pérez-Bidegain, M., Studdert, G.A., Perdomo Varela, C. H., Garcia, F.O., y Karlen, D.L. (2015). Soil quality impacts of current South American agricultural practices. *Sustainability*, 7(2), 2213-2242.
- Wooding, R.A. (1968). Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water resources research*, 4(6), 1259-1273.
- Wu, L., Allmaras, R.R., Gimenez, D., y Huggins, D.M. (1997). Shrinkage and water retention characteristic in a fine textured mollisol compacted under different axle loads. *Soil and Tillage Research*, 44(3–4), 179–194.
- Wyngaard, N., Crespo, C., Angelini, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Reussi Calvo, N., Carciochi, W., y Sainz Rozas, H. (2022). The effect of agriculture on topsoil carbon stocks is controlled by land use, climate, and soil properties in the Argentinean Pampas. *Catena*, 212, 106126.

- Yang, Z., Singh, B.R.M., y Sitaula, B.K. (2004). Fractions of organic carbon in soils under different crop rotations, cover crops and fertilization practices. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70, 161–166.
- Yu, Y., Loiskandl, W., Kaul, H.P., Himmelbauer, M., Wei, W., Chen, L., y Bodner, G. (2016). Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems. *Journal of Hydrology*, 538, 667-676.
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T. M., ... & Schroth, G. (1997). Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*, 79(1-4), 117-161.
- Zhang, Z., Peng, X. (2021). Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 206, 104844.

ANEXOS

Anexo I

Tablas de Análisis de la varianza para el contenido de carbono orgánico del suelo y sus fracciones.

Tabla I. Sitio Villegas (VIL). Análisis de la varianza de los factores cultivo principal (CP) y cultivo de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS), sus fracciones y la contribución relativa de cada fracción al COS, para cada una de las profundidades estudiadas.

VIL	0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm		20-40 cm				
	CP	CC	CP x CC	CP CC	CP CC	CP CC	CP CC	CP CC			
COS	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	*	*	ns
AF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
AH	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
hum	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
COPg	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
COPf	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
COM	ns	*	*	*	*	ns	ns	ns	ns	*	*
AF/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
AH/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
hum/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
COPg/COS	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
COPf/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
COM/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*

AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. Niveles de significancia: *: p-valor <0,05; ns: p-valor >0,05.

Tabla II. Sitio Pergamino (PER). Análisis de la varianza de los factores fecha (F) y cultivo de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS), sus fracciones y la contribución relativa de cada fracción al COS, para cada una de las profundidades estudiadas.

PER	0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm		20-40 cm					
	F	CC	F x CC	F CC	F CC	F x CC	F CC	F x CC				
COS	ns	*	*	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	*	*
AF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*
AH	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	*
hum	*	*	*	ns	ns	*	*	ns	ns	*	*	*

COPg	*	*	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
COPf	*	*	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
COM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	*
AF/COS	*	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	*
AH/COS	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*	*	*
hum/COS	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	*	*
COPg/COS	*	*	ns	*	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
COPf/COS	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
COM/COS	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	*	*	ns	ns	ns

AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. Niveles de significancia: *: p-valor <0,05; ns: p-valor >0,05.

Tabla III. Sitio Bellocq (BEL). Análisis de la varianza de los factores fecha (F) y cultivo de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS), sus fracciones y la contribución relativa de cada fracción al COS, para cada una de las profundidades estudiadas.

BEL	0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm		20-40 cm					
	CP	CC	CP x CC	CP	CC	CP x CC	CP	CC	CP x CC	CP	CC	CP x CC
COS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ns
AF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
AH	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
hum	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*
COPg	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
COPf	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
COM	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
AF/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
AH/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
hum/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
COPg/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
COPf/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
COM/COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*

AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. Niveles de significancia: *: p-valor <0,05; ns: p-valor >0,05.

Tabla IV. Sitio Chascomús, quinta fecha (CHA-B2). Análisis de la varianza del factor cultivo de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS), sus fracciones y la contribución relativa de cada fracción al COS, para cada una de las profundidades estudiadas.

CHA	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-40 cm
COS	ns	ns	ns	ns
AF	ns	ns	ns	ns
AH	ns	ns	ns	ns
hum	ns	ns	ns	ns
COPg	ns	ns	ns	ns
COPf	ns	ns	ns	*
COM	ns	ns	ns	ns
AF/COS	ns	ns	ns	ns
AH/COS	ns	ns	ns	ns
hum/COS	ns	ns	ns	ns
COPg/COS	ns	ns	ns	ns
COPf/COS	ns	ns	ns	ns
COM/COS	ns	ns	ns	*

AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. Niveles de significancia: *: p-valor <0,05; ns: p-valor >0,05.

Tabla V. Sitio Chascomús (CHA), en cinco fechas. Análisis de la varianza los factores fecha (F) y cultivo de cobertura (CC) sobre el carbono orgánico del suelo (COS), sus fracciones y la contribución relativa de cada fracción al COS, para cada una de las profundidades estudiadas.

CHA	0-5 cm			5-10 cm			10-20 cm			20-40 cm		
	F	CC	F x CC	F	CC	F x CC	F	CC	F x CC	F	CC	F x CC
COS	ns	ns	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns	ns
AF	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	ns	*	ns	ns
AH	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
hum	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*	*
COPg	*	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns
COPf	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns
COM	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	*	*

AF = ácidos fúlvicos, AH = ácidos húmicos, hum = huminas. COPg = carbono orgánico particulado grueso, COPf = carbono orgánico particulado fino, COM = carbono orgánico asociado a minerales. Niveles de significancia: *: p-valor <0,05; ns: p-valor >0,05.

Anexo II

Tablas de Análisis de la varianza para los indicadores de calidad física de suelos (CFS).

Tabla I. Análisis de la varianza para distintos indicadores de CFS, en los sitios Villegas (VIL), Pergamino (PER), Bellocq (BEL) y Chascomús (CHA).

	VIL		PER			BEL		CHA			CHA-B2		
	CP	CC	CP x CC	F	CC	F x CC	CP	CC	CP x CC	F	CC	F x CC	CC
Dap	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	*	*	ns	ns
PT	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	*	*	ns	ns
θ_{ma}	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns	ns
θ_{me}	*	*	ns	*	*	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*
θ_{mi}	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	*	ns	*	*	ns	ns
AC	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*	*	ns	ns	ns
PMP	ns	*	ns	*	*	ns	*	*	*	*	ns	ns	ns
ADP	ns	ns	*	*	*	ns	ns	ns	*	*	*	ns	ns
$\ln(K_0)$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	*	ns
$\ln(K_3)$	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	*	ns	*	*
$\ln(K_6)$	*	*	ns	*	*	*	*	ns	*	*	*	*	*
$\ln(\epsilon_{ma})$	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	*	ns
$\ln(\epsilon_{me})$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
$\ln(Cw_{PT})$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	*	ns
$\ln(Cw_{ma})$	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	*	*	*	*	ns
$\ln(Cw_{me})$	ns	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns

CP = cultivo principal, CC = cultivo de cobertura, F = fecha. Dap = densidad aparente, PT = porosidad total, θ_{ma} = macroporosidad, θ_{me} = mesoporosidad, θ_{mi} = microporosidad, AC = , FC = capacidad de campo, ADP = agua disponible para la planta, K_0 = conductividad hidráulica saturada, K_3 y K_6 = conductividad hidráulica a 3 y 6 cm de tensión, ϵ_{ma} y ϵ_{me} = macro y mesoporosidad efectiva, Cw_{PT} , Cw_{ma} y Cw_{me} = conectividad de poros para la porosidad total, macroporosidad y mesoporosidad, respectivamente. Niveles de significancia: *: p-valor <0,05; ns: p-valor >0,05.

Anexo III

Tabla I. Parámetros de ajuste (α , n y m) para los dos dominios de poros (1 para el dominio de la matriz y 2 para el dominio estructural) para los datos obtenidos por el método de evaporación simple en las tres fechas estudiadas (CHA-B1, CHA-CP_o y CHA-CP_f).

	CHA-B1		CHA-CP _o		CHA-CP _f	
	M	M _{CC}	M	M _{CC}	M	M _{CC}
θ_s	0.48 ±0.01	0.49 ±0.01	0.47 ±0.01	0.50 ±0.01	0.49 ±0.01	0.51 ±0.01
α_1	0.004 ±0.002	0.007 ±0.007	0.011 ±0.004	0.011 ±0.008	0.02 ±0.04	0.009 ±0.007
n_1	1.7 ±0.3	1.4 ±0.2	1.5 ±0.2	1.4 ±0.2	1.4 ±0.3	1.7 ±0.4
α_2	0.15 ±0.05	0.1 ±0.2	0.3 ±0.2	0.26 ±0.09	0.10 ±0.07	0.2 ±0.2
n_2	1.9 ±0.6	1.7 ±0.3	1.8 ±0.4	2.0 ±0.7	1.8 ±0.6	1.4 ±0.4
w_2	0.3 ±0.1	0.24 ±0.09	0.2 ±0.2	0.3 ±0.1	0.2 ±0.2	0.4 ±0.2

M = maíz, M_{CC} = maíz con CC. θ_s = contenido de humedad en saturación, w_2 = factor de ponderación del peso relativo del dominio de poros estructural.

Tabla II. Análisis de la varianza para distintos indicadores de CFS, en el sitio Chascomús (CHA).

	CC	F	F*CC
K_{0-MI}	ns	*	ns
K_{3-MI}	ns	*	ns
K_{6-MI}	ns	*	ns
K (h=316 cm)	*	*	ns
K_0	ns	ns	ns
P_E	ns	ns	*
P_M	ns	ns	*
CW_{PE}	ns	*	ns

CC = cultivo de cobertura, F = fecha. K_{0-MI} , K_{3-MI} y K_{6-MI} = conductividad hidráulica a 0, 3 y 6 cm de tensión (h), respectivamente, medidas mediante mini-infiltración. K (h=316 cm) y K_0 = conductividad hidráulica a 316 y 0 cm de tensión, respectivamente, obtenidas a partir de la curva de ajuste de los datos medidos mediante el método de evaporación simplificado. P_E y P_M = porosidad estructural y de la matriz, respectivamente. CW_{PE} = índice de conectividad para la porosidad estructural. Niveles de significancia: *: p-valor <0,05; ns: p-valor >0,05.

Anexo IV

Tabla I. Parámetros de ingreso para la simulación con Hydrus-1D, obtenidos mediante distintos procedimientos.

		Horizonte A		Horizonte Bt*	
		M	M _{cc}	M	M _{cc}
Ajuste bimodal (MES)	θ_s	0,49	0,51	0,46	0,46
	K_0	84,0	112,6	3,8	8,0
	α_1	0,02	0,009	0,26	0,26
	n_1	1,4	1,7	1,19	1,19
	α_2	0,10	0,2	0,005	0,005
	n_2	1,8	1,4	2,5	2,5
	w_2	0,2	0,4	0,6	0,6
Ajuste BEST	θ_s	0,49	0,51	0,46	0,46
	K_0	100,4	93,8	3,8	8,0
	α	2,5	0,9	0,01	0,01
	n	1,27	1,26	1,38	1,38

M = lotes que venían de maíz, M_{cc} = lotes que venían de maíz con cultivo de cobertura, θ_s = contenido de agua en saturación (cm³.cm⁻³). K_0 = conductividad hidráulica saturada (cm.día⁻¹) α , n y w son parámetros de ajuste de la función de van Genuchten. * Los parámetros para el horizonte Bt fueron estimados a partir del ajuste de curvas obtenidas mediante el método de evaporación simplificado (MES), empleando ajustes bi-modales o unimodales.

Tabla II. Resultados del Test de t para el contenido de humedad (θ) y la lámina de agua almacenada (SWS).

	$\theta_{5\text{cm}}$	$\theta_{15\text{cm}}$	SWS (0-20 cm)
Todo el período	*	*	ns
Barbecho	*	*	*
CP	*	*	*
Febrero	*	*	*
Fin del CC	*	*	*
Inicio del CP	*	*	*

Niveles de significancia: *: p-valor <0,05; ns: p-valor >0,05.