

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES**



Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

**INFORME DE TRABAJO FINAL DE CARRERA**

Cultivos de cobertura. Efecto de distintas especies sobre la calidad  
física del suelo

**Nombre de la alumna:** Brenda García Falabella

**DNI:** 35601595

**Numero de legajo:** 27241/0

**Dirección de correo electrónico:** bm\_garciaf@hotmail.com

**Teléfono:** 2944-306788

**Director:** Dr. Rafael Villarreal

**Co-directora:** Lic. María Paz Salazar

**Fecha de entrega:**

**Institución:** Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP

**Lugar de trabajo:** Área de Física Aplicada

**Modalidad:** Trabajo de Investigación

22	<b>Índice</b>	
23	<b>RESUMEN</b> .....	3
24	<b>1. Introducción</b> .....	4
25	Antecedentes de la siembra directa .....	4
26	Cultivos de cobertura .....	5
27	Efectos de los CC en las propiedades del suelo .....	6
28	<b>2. Hipótesis</b> .....	8
29	<b>3. Objetivos</b> .....	8
30	Objetivo general .....	8
31	Objetivos particulares.....	8
32	<b>4. Materiales y métodos</b> .....	8
33	Infiltración a campo .....	10
34	Conductividad hidráulica .....	11
35	Porosidad efectiva.....	14
36	Densidad aparente y porosidad total.....	16
37	Distribución de tamaño de poros y curva de retención hídrica.....	16
38	Índice de repelencia al agua.....	17
39	Análisis estadístico.....	19
40	<b>5. Resultados</b> .....	19
41	Densidad aparente, porosidad total y macroporosidad.....	19
42	Conductividad hidráulica y macroporosidad grande efectiva .....	21
43	Índice de repelencia al agua.....	23
44	Carbono orgánico total .....	23
45	<b>6. Discusión</b> .....	24
46	Densidad aparente, porosidad total y macroporosidad .....	24
47	Conductividad hidráulica y porosidad grande efectiva .....	26
48	Índice de repelencia al agua.....	27
49	Carbono orgánico total .....	28
50	<b>7. Conclusiones</b> .....	29
51	<b>8. Bibliografía</b> .....	29
52		

53 **RESUMEN**

54 La siembra directa (SD) es una técnica basada en el cultivo de la tierra sin arado  
55 previo. Se ha reportado en nuestro país un impacto negativo de la SD sobre las  
56 propiedades físicas e hidráulicas del suelo, especialmente en suelos finos,  
57 encontrándose menores tasas de infiltración, desarrollo de estructura laminar y  
58 disminución de la porosidad total. En este contexto, la inclusión de cultivos de  
59 cobertura (CC) dentro de las distintas rotaciones agrícolas puede ser una estrategia  
60 que mejore la eficiencia de la SD como sistema de manejo al mejorar la calidad física  
61 del suelo. Los objetivos del presente trabajo final fueron determinar el impacto de la  
62 inclusión de CC sobre las propiedades físicas e hidráulicas del suelo y sobre el  
63 contenido de CO del suelo; determinar el efecto de distintas especies de cobertura  
64 sobre calidad física y el contenido de CO del suelo. El trabajo se realizó en la Chacra  
65 Experimental de Bellocq (MAA), provincia de Buenos Aires. Se evaluaron densidad  
66 aparente (DAP), porosidad total (PT), macroporosidad, conductividad hidráulica ( $K_0$ ),  
67 macroporosidad grande efectiva ( $\epsilon_{ma}$ ), índice de repelencia al agua y Carbono  
68 orgánico total (COT) sobre 5 tratamientos: centeno/soja (C/S), trigo/soja (T/S),  
69 vicia/maíz (V/M), maíz (M) y soja (S). Los tratamientos con CC, bajo sistemas de SD,  
70 presentaron mayores valores de  $K_0$  y  $\epsilon_{ma}$ . Por otra parte, la ausencia de diferencias  
71 entre tratamientos para las variables COT e índice de repelencia al agua sugieren  
72 mediciones en el mediano plazo para una evaluación más concluyente. De los  
73 resultados obtenidos se puede decir que la inclusión de CC en rotaciones bajo SD  
74 mejoran la capacidad del suelo de transmitir agua, a través de un aumento de la  
75 macroporosidad y de la conductividad hidráulica saturada, mejorando así su calidad  
76 física.

77

78

## 79        **1. Introducción**

### 80        Antecedentes de la siembra directa

81        La siembra directa (SD) es una técnica basada en el cultivo de la tierra sin arado  
82        previo. De esta manera, no se remueven los rastrojos de los cultivos anteriores para  
83        asegurar una cobertura permanente del suelo y mejorar las condiciones físicas,  
84        químicas y biológicas del recurso (Castilla, 2013). En Argentina la cantidad de  
85        hectáreas bajo el sistema descrito son 27.000.000, lo que representa el 81% del área  
86        de cultivo (INTA y Ministerio de Agricultura, 2011). En 1980 la superficie de cereales y  
87        oleaginosas implantados bajo SD en Argentina era de solo 5000 ha, alcanzando  
88        16.000.000 ha en 2002 según el Censo Agropecuario Nacional. La cifra inicial se  
89        multiplicó por veinte entre 1980 y 1990, dando un nuevo salto cuantitativo en 1997  
90        (Alapin, 2008). Entre los principales beneficios a nivel sistema suelo-planta-agua que  
91        llevaron a la difusión de la práctica de la SD se pueden mencionar la protección contra  
92        la erosión, el aumento del carbono orgánico (CO) en superficie, mejor  
93        aprovechamiento del agua, entre otros (INTA y Ministerio de Agricultura, 2011). En la  
94        actualidad, Argentina cuenta con un total de 32, 5 millones de hectáreas (Hermida,  
95        2018).

96        A causa de la expansión de la SD, en la región pampeana se ha intensificado el uso  
97        agrícola de los suelos pasando de sistemas mixtos de 4-5 años de pasturas perennes  
98        seguido de 4-8 años de cultivos anuales, a secuencias continuas de cereales y  
99        oleaginosas (De Battista et al., 1992). La superficie sembrada de los cuatro cultivos  
100        principales (trigo, maíz, girasol y soja) varió de 13,5 millones ha en la campaña  
101        1980/1981, a 27,8 millones ha en la campaña 06/07 (Ramírez & Portsmann, 2007),  
102        bajo el sistema de agricultura continua. Sin embargo, esto no fue acompañado por  
103        otras prácticas agrícolas tales como la rotación de cultivos, fertilización, control  
104        integrado de plagas, entre otras (Austin et al, 2006).

105 Como consecuencia de lo mencionado anteriormente se ha reportado en nuestro país  
106 un impacto negativo de la SD sobre las propiedades físicas e hidráulicas del suelo,  
107 especialmente en suelos de textura arcillo-limosa, encontrándose menores tasas de  
108 infiltración, desarrollo de estructura laminar y disminución de la porosidad total  
109 (Lozano, 2014). En este sentido, varios autores reportaron un exceso de compactación  
110 en suelos bajo SD, reflejado en el aumento de la densidad aparente (DAP) (Fabrizzi et  
111 al., 2005; Ferreras et al., 2000; Schjønning & Rasmussen, 2000). Adicionalmente,  
112 debido a que el sistema de SD conlleva que el suelo no sea labrado, el control de  
113 malezas pasó de ser mecánico a químico en los últimos 20 años (Satorre, 2005). El  
114 uso indiscriminado de los diferentes herbicidas provocó la aparición de malezas  
115 resistentes dentro de los sistemas de cultivo como *Hirschfeldia incana* (nabo, nabillo),  
116 *Avena fatua* (avena negra), *Amaranthus palmeri* (yuyo colorado), *Amaranthus hybridus*  
117 (yuyo colorado), *Brassica rapa* (nabo) (SENASA, 2019). En este contexto, la inclusión  
118 de cultivos de cobertura (CC) dentro de las distintas rotaciones agrícolas puede ser  
119 una estrategia que mejore la eficiencia de la SD como sistema de manejo, al mejorar  
120 la calidad física del suelo (Blanco-Canqui et al., 2011).

### 121 Cultivos de cobertura

122 En general, los CC se siembran entre dos cultivos de cosecha con el objetivo de  
123 aumentar el aporte de CO<sub>2</sub>, disminuir la lixiviación de nutrientes, reducir la  
124 compactación y aumentar la cobertura (Blanco-Canqui et al., 2015). Es una práctica  
125 que se incluye en la rotación como oportunidad para mitigar y/o revertir una serie de  
126 procesos que pueden condicionar la sostenibilidad de los sistemas de producción  
127 (Kruger & Quiroga, 2013). Algunos de los objetivos que llevan a realizar su siembra  
128 son: mejorar el balance de carbono; fijar nitrógeno para reducir los requerimientos de  
129 fertilizantes; atenuar las pérdidas por erosión hídrica y eólica; mejorar la captación de  
130 agua y reducir encharcamiento y/o el encostramiento; disminuir la presión de malezas

131 y uso de herbicidas; reducir la evaporación incrementando la eficiencia de  
132 conservación y disponibilidad de agua en el perfil; reducir riesgo de salinización por  
133 ascenso de napas; mejorar la actividad biológica (Blanco-Canqui et al., 2015;  
134 Schipanski et al., 2014).

135 La principal limitación para la adopción de esta práctica es la suposición de que  
136 consumen una importante cantidad de agua, lo que afectaría el rendimiento del cultivo  
137 de renta (Caviglia et al, 2013). Sin embargo, tener en cuenta el balance de agua diario  
138 del suelo junto con el estudio de la probabilidad de lluvias y capacidad de almacenaje  
139 de agua de cada suelo, puede ayudar a decidir la fecha correcta para suspender su  
140 crecimiento sin afectar al cultivo de renta (de Sá Pereira et al., 2013).

141 Adicionalmente, otra cuestión a atender es la elección de especies que funcionarán  
142 como CC en función del tipo de suelo y características climáticas. Wheeler & Hill  
143 (1957) sostienen que dentro del género *Vicia*, *V. villosa* y *V. sativa* son cultivadas en  
144 diversas regiones templadas del mundo, como invierno-primaverales; por otra parte,  
145 en planteos donde el cultivo de renta es una especie leguminosa (e.g. soja) los CC  
146 convenientes son gramíneas invernales (Rillo et al., 2013). Otros autores plantean la  
147 ventaja de usar combinaciones de gramíneas y leguminosas como CC (Blanco-Canqui  
148 et al., 2011).

#### 149 *Efectos de los CC en las propiedades del suelo*

150 La dinámica de la materia orgánica (MO) ha adquirido relevancia como indicador de la  
151 salud del suelo, particularmente el estudio de las fracciones más jóvenes o  
152 intermedias, llamadas lábiles, particuladas o livianas (Galantini, 2008). El impacto de  
153 uso de sucesivos cultivos se ve reflejado sobre la fracción más sensible de la materia  
154 orgánica, constituida por materiales en proceso de humificación (Primavesi, 1982). En  
155 este contexto, la inclusión de CC implica mayor actividad de raíces y actividad

156 biológica en el suelo, además de un mayor aporte de MO durante el período en el que  
157 cumplen su función de protección (Studdert & Echeverría, 2000, Duval et al., 2016,  
158 Behrends Kraemer et al., 2017). En cuanto a la calidad física del suelo, los CC pueden  
159 ser una estrategia que mejore la eficiencia de la SD como sistema de manejo al  
160 mejorar la calidad física de los suelos (Blanco-Canqui et al., 2011). Haruna et al.  
161 (2018) menciona que los CC pueden implicar una mejora en las propiedades  
162 hidráulicas del suelo, como la conductividad hidráulica saturada ( $K_0$ ). Según Casas  
163 (2007), los CC permiten mantener elevadas tasas de infiltración del agua de lluvia  
164 debido al incremento de la cobertura del suelo y de la macroporosidad, dada a través  
165 de la descomposición de raíces que generan un sistema de canales o galerías.

166 Otro aspecto a tener en cuenta es que las prácticas de manejo del suelo que  
167 aumentan el contenido de C orgánico generalmente aumentan la hidrofobicidad o  
168 repelencia del agua (Harper et al., 2000; McKissock et al., 2002). Si bien altos niveles  
169 de hidrofobicidad, pueden retrasar la infiltración de agua (González-Peñaloza et al.,  
170 2012) y pueden disminuir el rendimiento de los cultivos, en niveles subcríticos puede  
171 contribuir a la estabilización de la estructura del suelo y favorecer la infiltración,  
172 proporcionando así un indicador de calidad útil (Blanco-Canqui, 2011; Kraemer et al.,  
173 2019). La repelencia al agua del suelo se ve afectada por las propiedades intrínsecas  
174 del mismo, como el tipo de suelo, la textura y la mineralogía, así como por la presencia  
175 de sustancias que exhiben esta propiedad, como la MO (Jaramillo, 2003; Dlapa et al.,  
176 2004). En este sentido, sería relevante evaluar la repelencia al agua que puede ser  
177 causada por mayor ingreso de CO al suelo, a partir de la inclusión en las rotaciones de  
178 CC. Bajo SD, las rotaciones de cultivos pueden alterarse para aumentar la estabilidad  
179 del suelo al inducir una mayor repelencia al agua.

180 Es por esto que el estudio de los efectos de la inclusión de CC en planteos de SD  
181 sobre distintas propiedades que describan la calidad física y química del suelo,

182 permitirá analizar dicha estrategia de manejo como mitigación a los procesos de  
183 degradación de los suelos de la Región Pampeana.

## 184 **2. Hipótesis**

185 - La inclusión de CC en planteos bajo SD mejoran la calidad física del suelo,  
186 aumentando la capacidad de infiltración y la macroporosidad.

187 - La inclusión de CC en planteos bajo SD aumentan el contenido de CO y la  
188 hidrofobicidad del suelo.

189 - La calidad física del suelo, así como el contenido de CO del suelo dependen de la  
190 especie seleccionada como CC.

## 191 **3. Objetivos**

### 192 Objetivo general

193 - Aportar conocimientos sobre alternativas de manejo para evitar los distintos  
194 procesos de degradación de los suelos agrícolas de la Región Pampeana.

### 195 Objetivos particulares

196 - Determinar el impacto de la inclusión de CC sobre las propiedades físicas e  
197 hidráulicas del suelo y sobre el contenido de CO del suelo.

198 - Determinar el efecto de distintas especies de cobertura sobre calidad física y el  
199 contenido de CO del suelo y su efecto en la hidrofobicidad.

## 200 **4. Materiales y métodos**

201 El estudio se realizó en la Chacra Experimental Bellocq (MAA Pcia de Buenos Aires),  
202 ubicada en cercanías de la localidad de Bellocq (35°55' S, 61°32' O), Provincia de  
203 Buenos Aires (Figura 1).



204

205 Figura 1. Imagen satelital del sitio de estudio.

206 El suelo es un Hapludol éntico, bien drenado, de escaso desarrollo con textura franco  
207 arenosa (Oficina de transferencia de tecnología y experimentación, OTEc). El clima en  
208 la región es templado, con temperatura media anual 15,6°C y precipitación anual  
209 promedio de 885 mm. Antes de iniciarse el ensayo, los lotes se encontraban bajo uso  
210 agrícola con el mismo manejo en SD. El ensayo, instalado en el año 2017, consiste en  
211 un diseño experimental completamente al azar, con 5 rotaciones distintas. Se  
212 evaluaron 5 tratamientos, correspondientes al último año de cada rotación:  
213 centeno/soja (C/S); trigo/soja (T/S); vicia/maíz (V/M); maíz (M); soja (S). El muestreo  
214 para la determinación de las distintas propiedades del suelo se realizó en el mes de  
215 junio de 2019, al finalizar el ciclo de cultivo.

216 A fin de evaluar el efecto del CC, se midieron distintos parámetros in situ y se tomaron  
217 8 muestras por cada tratamiento para determinaciones en laboratorio. Se extrajeron  
218 muestras no disturbadas en cilindros de acero de 5 cm de diámetro interno y 5 cm de  
219 longitud sobre las que se realizaron en laboratorio las mediciones de mini-infiltración  
220 con el fin de calcular el índice de repelencia al agua (R), como se desarrolla en el  
221 apartado correspondiente.

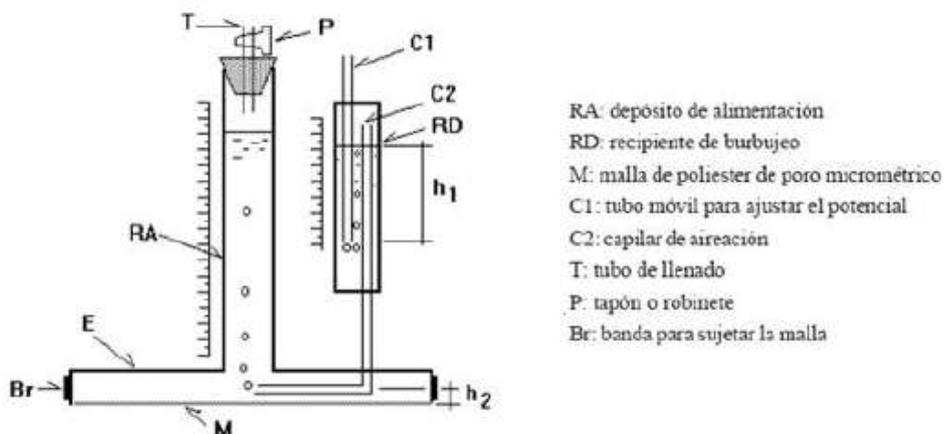
222 La densidad aparente se determinó en laboratorio a partir del peso de muestras de  
223 suelo tomadas con cilindros de acero inoxidable de volumen conocido y secas en  
224 estufa a 105°C hasta peso constante (Hillel, 1998).

225 La infiltración a campo se realizó al momento de la toma de muestras, mediante la  
226 metodología que se menciona más adelante. A partir de los datos de infiltración se  
227 calculó la conductividad hidráulica (K), y la porosidad efectiva para poder determinar la  
228 macoporosidad grande efectiva ( $\epsilon_{ma}$ ).

229 Además, se extrajeron muestras disturbadas de los primeros 10 cm del suelo en cada  
230 uno de los tratamientos y se determinó el COT según el micrométodo de digestión  
231 húmeda con dicromato de potasio (SAMPLA-PROMAR, 2004), adaptación de Walkley  
232 & Black (1934).

### 233 **Infiltración a campo**

234 Se midió la infiltración a campo empleando el infiltrómetro de disco a tensión (Perroux  
235 & White, 1988) (Figura 2).



236

237 Figura 2. Esquema del infiltrómetro de disco a tensión.

238 El disco del infiltrómetro empleado posee una base de radio 6,25 cm. Para garantizar  
239 un buen contacto entre el dispositivo y el suelo se extendió una delgada capa de arena  
240 seca sobre la superficie. Las presiones de agua en el suelo que se utilizaron fueron h  
241 (-3 y 0 cm), aplicadas en ese orden por cada tratamiento. La infiltración acumulada fue  
242 registrándose en planillas en las que se volcaron las lecturas de lámina de agua  
243 infiltrada (cm) que arrojaba el infiltrómetro para cada tiempo de la siguiente forma:  
244 cada minuto hasta completar 10 minutos, cada 5 minutos hasta completar 30 minutos  
245 y cada 10 minutos hasta finalizar la prueba. Cuando la cantidad de agua ingresada en  
246 el suelo no cambió con el tiempo para tres mediciones consecutivas tomadas a  
247 intervalos de diez minutos, se asumió el flujo de estado estacionario y se calculó la  
248 tasa de infiltración básica en base a las últimas tres mediciones. Se realizaron 4  
249 repeticiones por tratamiento.

#### 250 **Conductividad hidráulica**

251 A partir de los datos de infiltración básica, se calculó la conductividad hidráulica a  
252 distintas tensiones ( $K(h)$ ) a través del método de cargas múltiples (Ankeny et al.,  
253 1991) y la porosidad conductora de agua según Watson & Luxmoore (1986).

254 Wooding (1968), estudió matemáticamente el flujo de agua desde un disco en estado  
255 estacionario, para infiltración no confinada, concluyendo que el mismo está dado por:

$$256 \quad Q = \pi R^2 K + 4R\phi \quad (1)$$

257 donde Q es la tasa de infiltración por unidad de área en el estado estacionario [ $L^3T^{-1}$ ]  
258  $^{-1}$ ], R es el radio del disco [L], K es la conductividad hidráulica [ $LT^{-1}$ ], y  $\phi$  es el  
259 potencial de flujo mátrico [ $L^2T^{-1}$ ] (Gardner, 1958) para la superficie de infiltración  
260 con condición de contorno superior igual a potencial de agua del suelo cero:

$$261 \quad \phi(h) = \int_{h_1}^0 K(h)dh \quad (2)$$

262 donde  $h_1$  [L] es el potencial agua del suelo de referencia.

263 La ecuación 2 se puede reescribir para una condición de contorno de infiltración,  $h$ ,  
264 general, donde:

$$265 \quad \phi(h) = \int_{h_1}^h K(h)dh \quad (3)$$

266 Si se ajusta la ecuación 1 para mostrar la dependencia de  $K$  y de  $\phi$  con el potencial  
267 de contorno en la superficie,  $h$ , resulta en un flujo  $Q$  que es dependiente del  
268 potencial de contorno en la superficie. En este estudio se usó la aproximación de  
269 Ankeny et al. (1991), que requiere el conocimiento de las tasas de flujo en estado  
270 estacionario  $Q(h_1)$  y  $Q(h_2)$ , a dos tensiones,  $h_1$  y  $h_2$ , obtenidas con el mismo  
271 infiltrómetro de disco. La medición de los flujos  $Q(h_1)$  y  $Q(h_2)$  a dos potenciales ( $h_1$   
272 y  $h_2$ ) resulta en las siguientes dos ecuaciones con cuatro incógnitas:

$$273 \quad Q(h_1) = \pi R^2 K(h_1) + 4R\phi(h_1) \quad (4)$$

$$274 \quad Q(h_2) = \pi R^2 K(h_2) + 4R\phi(h_2) \quad (5)$$

275 Se puede obtener una tercera ecuación asumiendo una relación  $K(h)/\phi(h)$   
276 constante en el rango de presión que va de  $h_1$  a  $h_2$  (Philip, 1985, Ankeny et al.,  
277 1991).

$$278 \quad A = \frac{K(h)}{\phi} = \text{constante} [L^{-1}] \quad (6)$$

279 Entonces, las ecuaciones 4 y 5 pueden escribirse como:

$$280 \quad Q(h_1) = \left[ \pi R^2 + \frac{4R}{A} \right] K(h_1) \quad (7)$$

$$281 \quad Q(h_2) = \left[ \pi R^2 + \frac{4R}{A} \right] K(h_2) \quad (8)$$

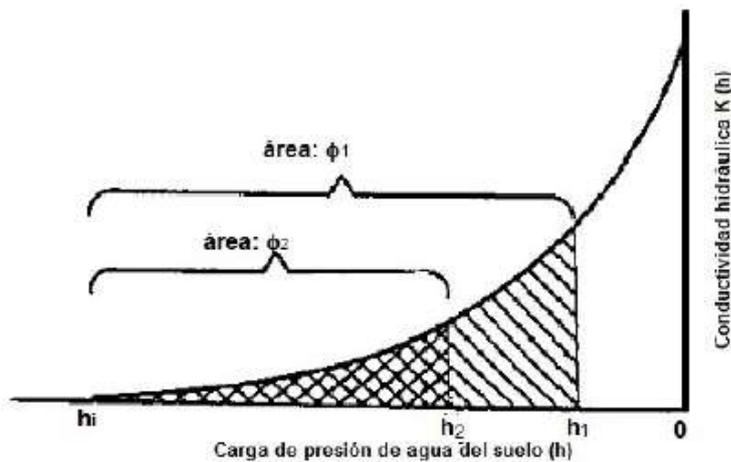
282 Las ecuaciones 7 y 8 contienen ahora solo 3 incógnitas. Analizando la Figura 3  
 283 (adaptada de Elrick et al., 1987, en Ankeny et al., 1991) se puede llegar a una  
 284 aproximación numérica para una solución. En la Figura 3, el  $\Phi (h_1)$  es toda el área  
 285 rayada bajo la curva, y  $\Phi (h_2)$  es el área doblemente rayada. La diferencia entre  $\Phi$   
 286 ( $h_1$ ) y  $\Phi (h_2)$  es aproximadamente:

287 
$$\phi (h_1) - \phi (h_2) = \frac{\Delta h [K(h_1) + K(h_2)]}{2} \quad (9)$$

288 Donde  $\Delta h = h_2 - h_1$ . Sustituyendo la ecuación 6 en la 9 da:

289 
$$\frac{[K(h_1) - K(h_2)]}{A} = \frac{\Delta h [K(h_1) + K(h_2)]}{2} \quad (10)$$

290 Entonces, las ecuaciones 7, 8 y 10 con tres incógnitas ( $K (h_1)$ ,  $K (h_2)$  y  $A$ ) pueden  
 291 resolverse simultáneamente obteniéndose las conductividades hidráulicas para  
 292 pares de tasas de infiltración no confinadas tomadas a diferentes tensiones.



293

294 Figura 3. Relación entre la conductividad hidráulica ( $K$ ) y la carga de presión del agua  
 295 del suelo ( $h$ ). Adaptado de Ankeny et al. (1991).

296 **Porosidad efectiva**

297 La ecuación de ascenso capilar permite calcular el radio de poro máximo lleno de  
298 agua,  $r$  [L], en función de  $h$  [L] (Romano & Hopmans, 2002):

299 
$$r = \frac{2\sigma\cos(\alpha)}{\rho gh} \quad (11)$$

300 Donde  $\sigma$  es la tensión superficial del agua [ $MT^{-2}$ ],  $\alpha$  es el ángulo de contacto entre  
301 el agua y la pared del poro (se asume igual a cero),  $\rho$  es la densidad del agua [ $ML^{-3}$ ],  
302 y  $g$  es la aceleración debida a la gravedad [ $LT^{-2}$ ]. Se asume que los poros con  
303 radio equivalente menor al calculado con la ecuación 11 están llenos de agua y son  
304 los únicos responsables de todo el flujo bajo un gradiente de presión. De acuerdo a  
305 la ley de Poiseuille, la tasa de flujo a través de un poro está dada por:

306 
$$Q_i = \frac{\pi r^4 \rho g \Delta L}{8 \eta \Delta z} \quad (12)$$

307 Donde  $Q_i(r)$  es la tasa de flujo [ $L^3T^{-1}$ ] como función del radio de poro  $r$  [L], y  $\eta$  es la  
308 viscosidad del agua [ $ML^{-1}T^{-1}$ ].  $\Delta L/\Delta z$  se asume igual a 1 debido a que se asume el  
309 estado estacionario donde el gradiente es unitario. La tasa de flujo total a través de  
310 poros con radio  $r$  ( $r$  como función de  $h$ ) ( $Q_t(r)$ ) para un área transversal de suelo  $A$   
311 [ $L^2$ ] es

312 
$$Q_t(r) = K(h)A \quad (13)$$

313 y,

314 
$$Q_t(r) = n(r)Q_i(r) \quad (14)$$

315 donde  $n(r)$  es el número de poros efectivos para un tamaño de poro  $r$  dado,  
316 responsables de  $Q_t(r)$ . La sustitución de 12 y 13 dentro de la ecuación 14 resulta  
317 en

318  $K(h)A = n(r) \frac{\pi r^4 \rho g}{8\eta}$  (15)

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

321  $N(r) = \frac{n(r)}{A}$  (16)

322 Resulta en

323  $N(r) = \frac{8\eta K(h)}{\pi r^4 \rho g}$  (17)

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

327  $\varepsilon(r) = N(r)\pi r^2$  (18)

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

333  $\Delta N(a, b) = \frac{8\eta \Delta K(a, b)}{\pi \rho g a^4}$  (19)

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

336  $\varepsilon(a, b) = \Delta N(a, b)\pi a^2 = \frac{8\eta \Delta K(a, b)}{\rho g a^2}$  (20)

337 Como  $a$  es el radio equivalente de poro menor en el rango,  $\varepsilon(a, b)$  es una  
338 estimación de la porosidad efectiva máxima, ya que  $(a)$  aparece en el denominador

339 de la ecuación 20. En la ecuación 20 se asume implícitamente un gradiente  
340 hidráulico unitario, y estado estacionario (Wahl et al., 2004).

341 A partir de los valores de  $K(h)$  obtenidos, se determinó la porosidad efectiva de  
342 acuerdo a la ecuación 20. La infiltración a tensiones de 3 y 6 cm excluye poros con  
343 diámetros equivalentes mayores a 1 y a 0,5 mm, respectivamente. Se definió  
344 macroporosidad grande efectiva ( $\epsilon_{ma}$ ) como aquellos poros drenando a  $h$  mayores  
345 que -3 cm ( $r > 0,5$  mm) (Lozano, 2014).

#### 346 **Densidad aparente y porosidad total**

347 Se extrajeron muestras de suelo en cilindros de acero inoxidable de 7,5 cm de  
348 diámetro interno y 10 cm de altura en cada tratamiento. Se determinó la densidad  
349 aparente (DAP) ( $Mg\ m^{-3}$ ) a partir de la siguiente ecuación (Hillel, 1998):

$$350 \quad DAP = \frac{m}{VT} \quad (22)$$

351 Donde  $m$  es la masa seca a estufa a  $105^{\circ}C$  durante 48 horas y  $VT$  es el volumen  
352 de la muestra.

353 A partir de los valores obtenidos de DAP, se calculó la porosidad total del suelo  
354 (PT):

$$355 \quad PT = 1 - \left( \frac{DAP}{D_{real}} \right) \quad (23)$$

356 Donde  $D_{real}$  es la densidad real del suelo ( $Mg\ m^{-3}$ ), fijada en  $2,65\ g\ cm^{-3}$ .

#### 357 **Distribución de tamaño de poros y curva de retención hídrica**

358 Se extrajeron muestras indisturbadas de suelo en cilindros de acero inoxidable de 5  
359 cm de diámetro y 5 cm de altura (volumen,  $98\ cm^3$ ) en los diferentes tratamientos  
360 del sitio. Se realizaron 6 repeticiones en cada tratamiento. Dichas muestras se  
361 llevaron hasta saturación y se las sometió a distintas cargas hidráulicas (-0,1 m, -

362 0,3 m, -0,5 m, -0,7 m y -1 m en mesa de tensión, y -3 m y -150 m en olla de  
363 Richard). Se calculó la fracción correspondiente a los macroporos ( $\theta_{ma}$ , diámetro >  
364 60  $\mu\text{m}$ ) y mesoporos ( $\theta_{me}$ , 30  $\mu\text{m}$  < diámetro < 60  $\mu\text{m}$ ) (ecuación 11) como la  
365 relación entre la masa de agua retenida en esos poros y el volumen de la muestra  
366 (1 g = 1 cm<sup>3</sup>).

367 La función de retención hídrica del agua está dada por van Genuchten (1980):

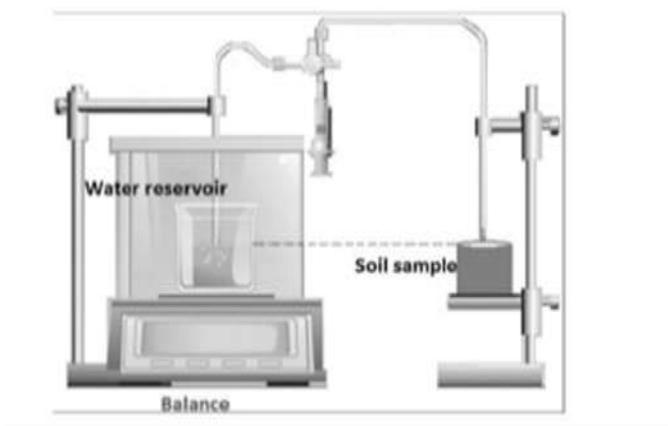
$$368 \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (24)$$

369 Donde  $\theta_r$  y  $\theta_s$  representan el contenido de agua residual y saturado,  
370 respectivamente [ $\text{L}^3\text{L}^{-3}$ ], y  $\alpha$  [ $\text{L}^{-1}$ ], n, y m ( $= 1 - 1/n$ ) (Mualem, 1976) son parámetros  
371 empíricos (parámetros de VG). Los datos obtenidos se ajustaron utilizando el  
372 código RETC (van Genuchten et al., 1991).

### 373 Índice de repelencia al agua

374 Se determinó el índice de repelencia de agua (R) en agregados de suelo entre 2 y 4  
375 mm, como la relación entre la sortividad en agua y en alcohol, a través de ensayos de  
376 mini-infiltración en laboratorio. La mini-infiltración en laboratorio se mide con un  
377 dispositivo similar al descrito por Villarreal et. al (2017) que puede visualizarse en la  
378 Figura 4.

379



384 Figura 4. Esquema de micro-infiltrómetro. Adaptado de Villarreal et al. (2017)

385 El mismo consta de un tubo conectado a un tanque con una pequeña esponja en el  
386 otro extremo (radio de la esponja = 1 cm) para proporcionar un buen contacto  
387 hidráulico con la muestra. Se colocó un depósito de agua en una balanza analítica ( $\pm$   
388 0,001 g), conectado a una computadora. Las burbujas de aire en el micro-infiltrómetro  
389 se eliminaron antes de la prueba. Los ensayos de infiltración se realizaron a tensión  
390  $h=0$  cm, para lo cual la punta del mini-infiltrómetro se colocó al mismo nivel que el pelo  
391 de agua del depósito. Cada muestra de suelo fue colocada en un soporte que permite  
392 variar su altura hasta dejar en contacto la esponja con la muestra. Cada determinación  
393 tomó aproximadamente 5 minutos. La cantidad de líquido infiltrado en la muestra por  
394 segundo, se calculó a partir de la diferencia de masa de agua o alcohol en el  
395 reservorio registrada en balanza analítica. La infiltración acumulada se determinó  
396 como la relación entre el volumen infiltrado y el área de la esponja que actúa como  
397 disco. La temperatura durante los experimentos fue constante (20 °C). Se realizaron 5  
398 repeticiones en cada tratamiento.

399 Una vez obtenida la infiltración acumulada con cada líquido para cada uno de los  
400 tratamientos se procedió al cálculo de la sortividad (S) tanto para agua como para  
401 alcohol a partir de la siguiente ecuación (Leeds-Harrison et al., 1994):

$$402 \quad S = \sqrt{\frac{Qf}{4rb}} \quad (24)$$

403 Donde Q es el caudal del líquido [ $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$ ],  $f$  la porosidad total del suelo [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ],  $r$  es el  
404 radio del mini-infiltrómetro [mm] y  $b$  es un parámetro de forma fijado en 0,55.

405 A partir de los valores obtenidos mediante la ecuación 24, el R se calcula como

$$406 \quad R = 1,95 \frac{S_{alcohol}}{S_{agua}} \quad (25)$$

407 Donde 1,95 es una constante utilizada por la diferencia en la tensión superficial y  
408 viscosidad de los líquidos (Hallett & Young, 1999).

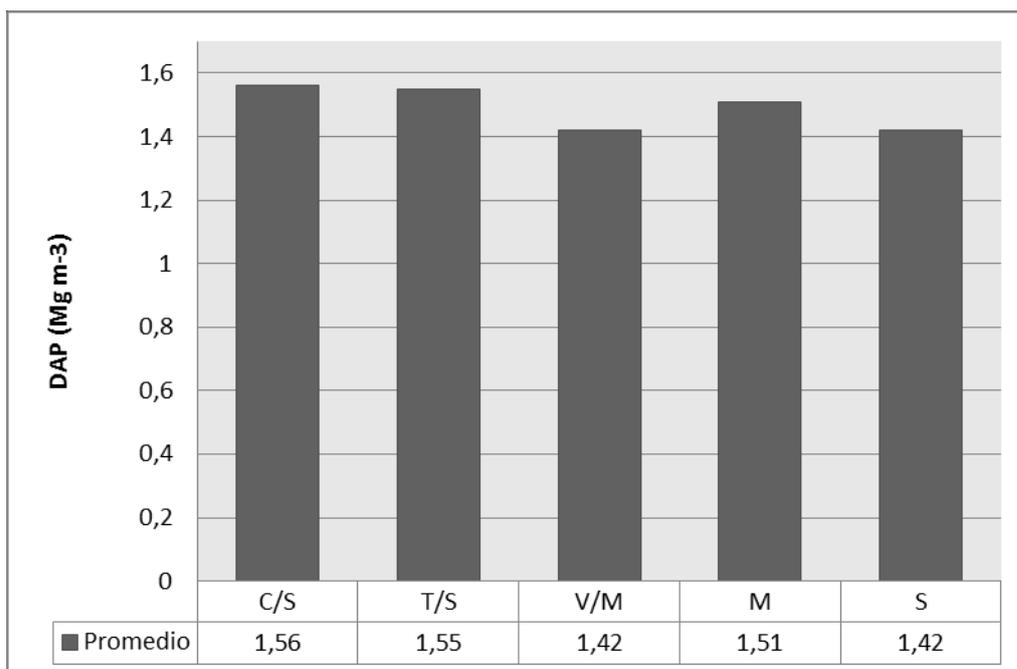
#### 409 **Análisis estadístico**

410 Para analizar el efecto de los distintos tratamientos sobre las propiedades hidráulicas y  
411 químicas del suelo se realizó un análisis de la varianza (Sokal & Rohlf, 1995). En los  
412 casos en los que hubo efecto del tratamiento, se compararon las medias a través de  
413 un test LSD Fischer. Los análisis fueron realizados con un nivel de significancia de  $p =$   
414 0,05. La distribución de  $K_0$  y  $\epsilon_{ma}$  es logarítmica normal, por lo que los valores se  
415 transformaron logarítmicamente antes del análisis estadístico. Todos los análisis se  
416 realizaron con el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2008).

### 417 **5. Resultados**

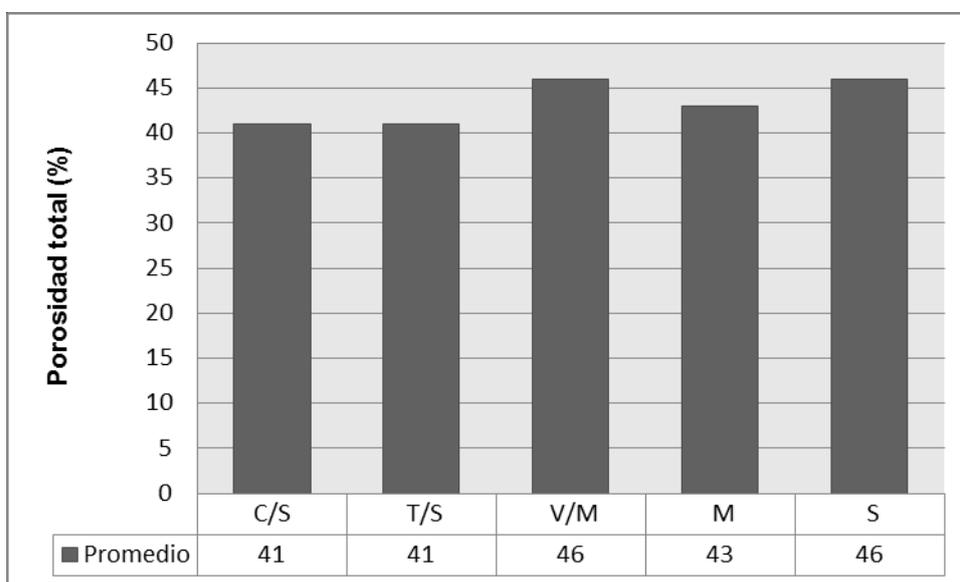
#### 418 **Densidad aparente, porosidad total y macroporosidad**

419 Los valores promedio de DAP y PT para cada tratamiento se muestran en las Figuras  
420 5 y 6, respectivamente. No se observaron diferencias significativas para estas  
421 variables entre tratamientos ( $p > 0,05$ ).



422

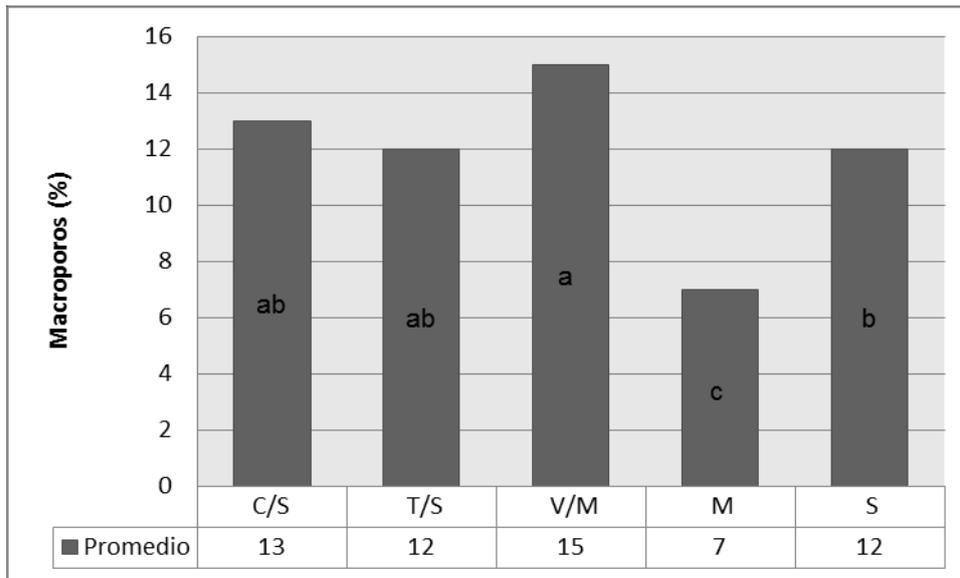
423 Figura 5. Valores promedio de Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), para cada uno de los  
 424 tratamientos: centeno/soja (C/S), trigo/soja (T/S), vicia/maíz (V/M), maíz (M) y soja (S).



425

426 Figura 6. Valores promedio de porosidad total, para cada uno de los tratamientos:  
 427 centeno/soja (C/S), trigo/soja (T/S), vicia/maíz (V/M), maíz (M) y soja (S).

428 En cuanto a la macroporosidad del suelo, se observaron diferencias significativas entre  
 429 tratamientos. La rotación V/M presentó el mayor valor, seguida de C/S y T/S, sin  
 430 diferencias significativas entre estos tres tratamientos. La rotación S, presentó menor  
 431 macroporosidad que V/M, pero sin diferencias significativas con C/S y T/S. Por último,  
 432 los menores valores de macroporosidad se observaron en la rotación M (Figura 7).



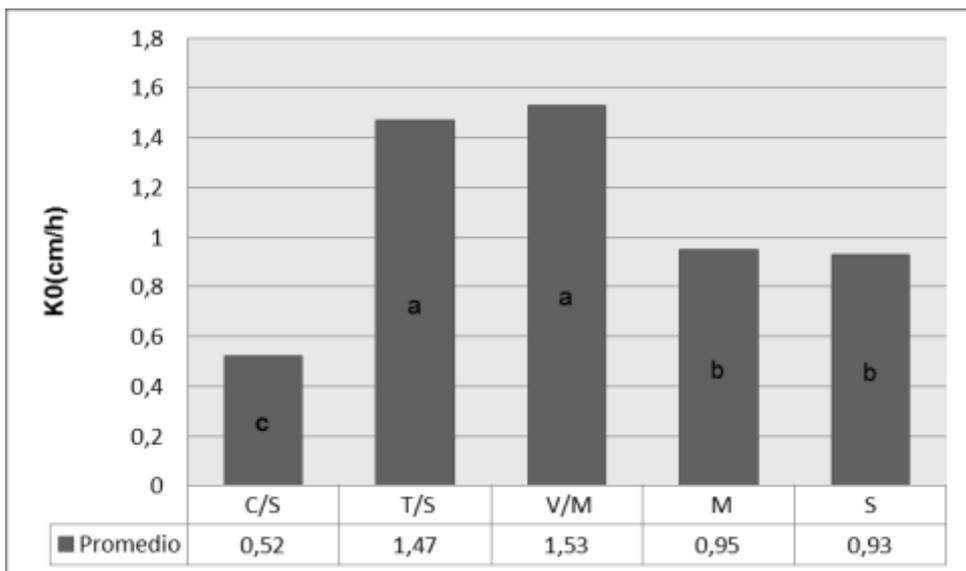
433

434 Figura 7. Porcentaje de macroporos para cada uno de los tratamientos: centeno/soja  
 435 (C/S), trigo/soja (T/S), vicia/maíz (V/M), maíz (M) y soja (S). Letras distintas indican  
 436 valores significativamente diferentes (LSD de Fisher,  $p < 0,05$ ).

437 **Conductividad hidráulica y macroporosidad grande efectiva**

438 Los valores promedio de  $K_0$  y  $\epsilon_{ma}$  se muestran en las Figuras 8 y 9, respectivamente.  
 439 Ambas variables mostraron diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).

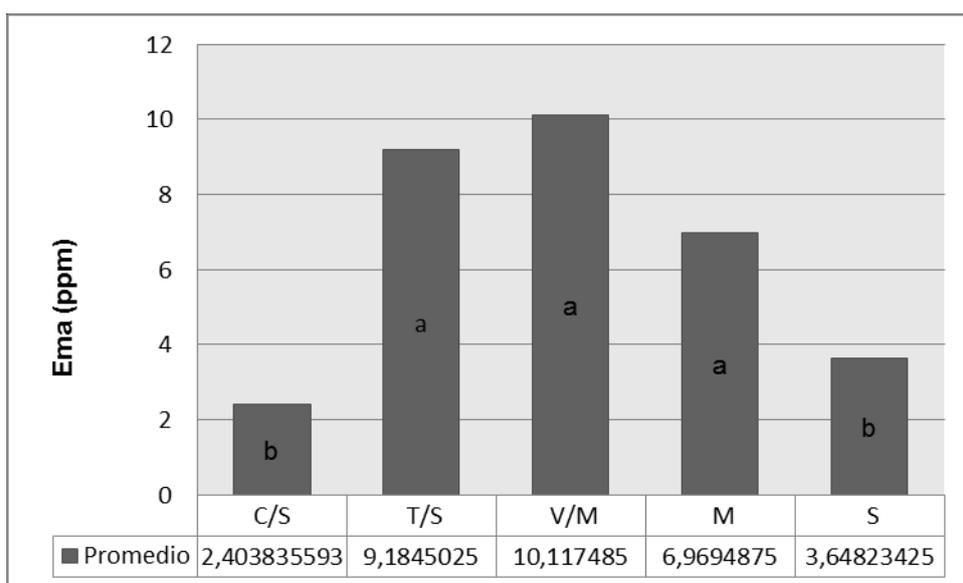
440 Los tratamientos con mayores valores de  $K_0$ , fueron T/S y V/M; Los tratamientos M y S  
 441 mostraron valores intermedios sin diferencias significativas entre sí y el menor valor lo  
 442 arrojó el tratamiento C/S.



443

444 Figura 8. Valores de conductividad hidráulica ( $K_0$ ) para cada uno de los tratamientos:  
 445 centeno/soja (C/S), trigo/soja (T/S), vicia/maíz (V/M), maíz (M) y soja (S). Letras  
 446 distintas indican valores significativamente diferentes (LSD de Fisher,  $p < 0,05$ ).

447 Por otra parte, los valores de  $\epsilon_{ma}$  fueron significativamente mayores para los  
 448 tratamientos V/M, T/S y M respectivamente. Los menores valores fueron observados  
 449 en los tratamientos S y C/S, sin diferencias significativas entre sí, siguiendo un  
 450 comportamiento similar a la  $K_0$  (Figura 9).

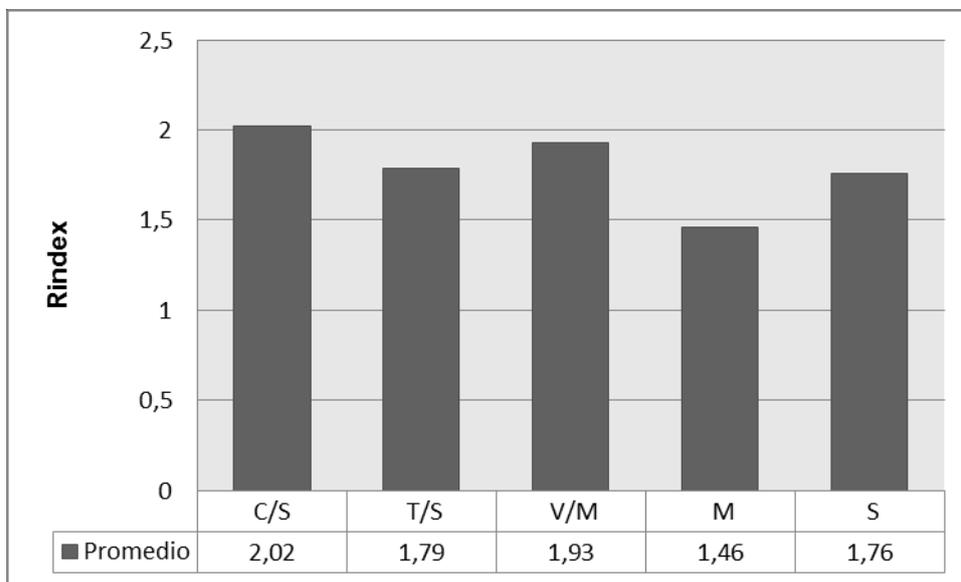


451

452 Figura 9. Macroporosidad grande efectiva expresada en partes por millón (ppm) para  
 453 cada uno de los tratamientos: centeno/soja (C/S), trigo/soja (T/S), vicia/maíz (V/M),  
 454 maíz (M) y soja (S). Letras distintas indican valores significativamente diferentes (LSD  
 455 de Fisher,  $p < 0,05$ ).

456 **Índice de repelencia al agua**

457 Los valores de R observados no mostraron diferencias significativas entre tratamientos  
 458 ( $p > 0,05$ ). Los valores promedios para cada tratamiento se muestran en la Figura 10.

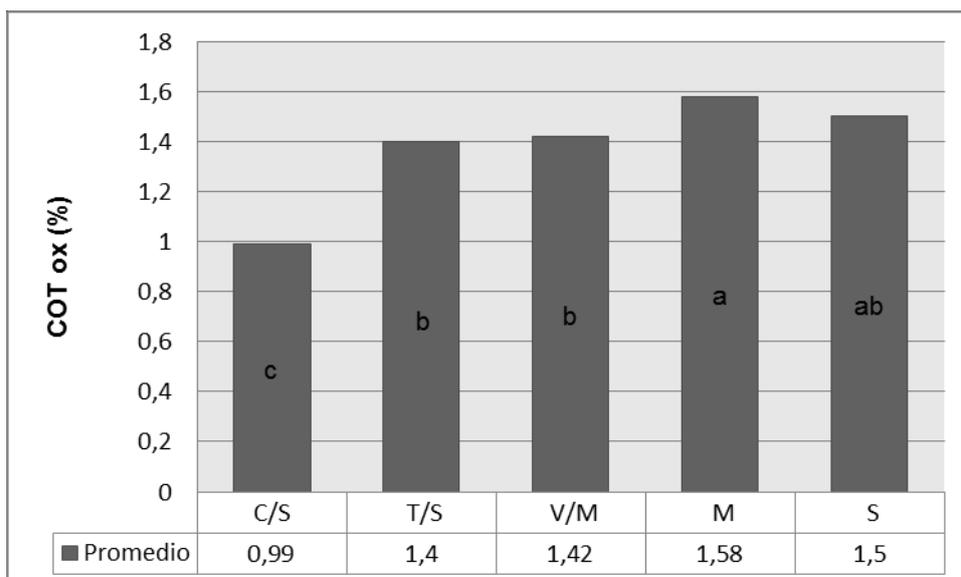


459

460 Figura 10. Índice de repelencia (R) al agua para cada uno de los tratamientos:  
 461 centeno/soja (C/S), trigo/soja (T/S), vicia/maíz (V/M), maíz (M) y soja (S).

462 **Carbono orgánico total**

463 La variable COT para los primeros 10 cm del suelo mostró diferencias significativas  
 464 entre tratamientos (Figura 11).



465

466 Figura 11. Carbono orgánico total para cada uno de los tratamientos: centeno/soja  
 467 (C/S), trigo/soja (T/S), vicia/maíz (V/M), maíz (M) y soja (S). Letras distintas indican  
 468 valores significativamente diferentes (LSD de Fisher,  $p < 0,05$ ).

469 El tratamiento que presentó menores valores de CO fue la rotación C/S. Los  
 470 tratamientos S, T/S y V/M mostraron valores mayores, sin diferencias significativas  
 471 entre sí, mientras que el tratamiento M mostró el mayor valor de CO, sin diferencias  
 472 significativas con S (Figura 11).

## 473 6. Discusión

### 474 Densidad aparente, porosidad total y macroporosidad

475 En cuanto a los valores de DAP encontrados en el presente trabajo, los resultados  
 476 están de acuerdo con trabajos previos, quienes reportaron valores similares de DAP  
 477 entre tratamientos con y sin CC (Álvarez et al., 2017, Mukherjee & Lal, 2015). Por otro  
 478 lado, Ridley (2012) trabajando sobre un Argiudol típico en Santa Fé evaluó los  
 479 cambios de DAP dentro de una rotación agrícola trigo/soja<sup>2a</sup>-maíz-soja 1<sup>a</sup> con y sin un  
 480 CC de avena. Este autor solo encontró una disminución de la DAP en el tratamiento

481 que incluía secado temprano y fertilización nitrogenada en el CC a una profundidad de  
482 6 - 12 cm. El resto de los tratamientos del ensayo tuvieron una densidad intermedia,  
483 sin diferencias significativas. Si bien esta es una propiedad que arroja características  
484 sobre el sistema poroso del suelo, ya que su aumento con respecto a una situación de  
485 referencia indica la degradación de la estructura de los mismos, depende de factores  
486 como el sistema de labranza o labores de descompactación (Villarreal, 2018). Por lo  
487 tanto, su evolución en el tiempo debe ser monitoreada en periodos más largos de los  
488 que se realizaron en este ensayo. En concordancia con la falta de diferencias  
489 significativas que también arrojó la variable PT, puede decirse que ambos indicadores  
490 no describen la configuración del sistema poroso en detalle y muchas veces las  
491 diferentes prácticas de manejo afectan la distribución de los poros, pero no su valor  
492 total (Soracco et al., 2015).

493 Por otra parte, la macroporosidad sí presentó diferencias significativas. La rotación  
494 V/M arrojó el mayor porcentaje de macroporosidad, mientras que el tratamiento M el  
495 menor. Villamil et al. (2006) observaron un cambio en la distribución en el tamaño de  
496 poros, donde midieron un aumento significativo del porcentaje de poros de entre 5 y 50  
497  $\mu\text{m}$ , correspondiente a la clasificación de macroporos de la presente tesina. Esto  
498 también fue observado por Ridley (2012). Los resultados del presente trabajo  
499 concuerdan con los obtenidos por Blanco-Canqui (2011), quien sostiene que los CC  
500 aumentan la macroporosidad y conectividad de los poros.

501 Los distintos valores de macroporosidad pueden atribuirse a los diferentes sistemas  
502 radiculares de las plantas utilizadas en las rotaciones ya que, por ejemplo, en V/M las  
503 raíces de vicia presentan gran densidad y exploración en profundidad; esto se  
504 combina con el sistema radicular del maíz que tiene gran desarrollo de raíces  
505 adventicias. Cuando esta combinación de diferentes especies no se da, como ocurre  
506 en los monocultivos, la menor exploración de raíces genera cambios en la distribución

507 del tamaño de poros lo que puede provocar una disminución de la macroporosidad y  
508 por ende del movimiento de agua en el suelo.

509 Los aumentos producidos en la macroporosidad mejoran aspectos como la tasa de  
510 infiltración y la dinámica del agua en el suelo. A su vez favorecen la circulación de aire  
511 en el suelo lo que aumenta la actividad de la fauna edáfica. La inclusión de CC en las  
512 rotaciones es un aporte positivo para esta variable, más allá de la especie que se elija  
513 como se observa en la Figura 7. Todos los tratamientos con CC arrojan valores  
514 mayores que los tratamientos sin ellos.

### 515 **Conductividad hidráulica y porosidad grande efectiva**

516 Los mayores valores de  $K_0$  observados en los tratamientos V/M y T/S se condicen con  
517 mayores valores de  $\epsilon_{ma}$  como puede verse en las Figuras 8 y 9, respectivamente.  
518 Esto está de acuerdo con Rillo et al. (2012), quien trabajando en Hapludol éntico de la  
519 serie Norumbega encontraron que la infiltración en rotaciones que incluyeron CC fue  
520 significativamente mayor en comparación a los tratamientos sin CC. Si bien autores  
521 como Blanco-Canqui et al. (2011) sostienen que los cambios en las propiedades  
522 hidráulicas (infiltración de agua, capacidad de retención de agua y conductividad  
523 hidráulica saturada) a menudo no pueden ser medidos durante los primeros 5 años, en  
524 este trabajo pueden notarse las diferencias en  $K_0$  para las diferentes rotaciones  
525 llevadas a cabo durante 2 años.

526 Por otra parte, el tratamiento C/S presentó para este ensayo los menores valores de  
527  $K_0$ . Esto podría deberse a un problema de conectividad de poros, porque los valores  
528 de macroporosidad que presenta la rotación no se ven reflejados en un aumento de la  
529 infiltración como sí ocurre en los demás tratamientos con CC (Villarreal et al., 2020).  
530 Otra causa que explique este fenómeno en C/S podría ser el efecto de “*clogging*”,  
531 donde las raíces obturan los poros generados ya que el sistema radicular de la soja

532 tiende a explorar el suelo en profundidad, pero a su vez una porción de raíces queda a  
533 menor profundidad, donde antes estuvo ocupada por el sistema radical fasciculado  
534 que tiene el centeno (Bodner et al., 2008). La obstrucción temporal de los poros por el  
535 crecimiento de las raíces de las plantas podría resultar en una tasa de infiltración  
536 reducida (Carof et al., 2005). Por esto, quizás para esta combinación de cultivos  
537 debería evaluarse mejor la fecha de secado óptima del CC, donde tenga mayor tiempo  
538 de descomponer las raíces que queden en el suelo y los poros generados no sean  
539 obturados por el cultivo de soja. Sasal y Andriulo (2003) encontraron menor infiltración  
540 en SD en una rotación con mayor proporción de soja, atribuyéndoselo a una mayor  
541 disposición horizontal de los macroporos del espesor superficial producto del nuevo  
542 ordenamiento horizontal de agregados producido por el tránsito de las máquinas y el  
543 bajo volumen de rastrojo de soja. Carof et al. (2007) mencionan que los cambios en la  
544 porosidad generalmente no resultaran en una K mayor, sino que participaron en el  
545 mantenimiento de la estructura y la K a lo largo del tiempo.

546 Por lo general, el aumento de K se debe a un mayor volumen de macroporos (Gabriel  
547 et al., 2019). Esto pudo corroborarse en este trabajo, ya que las rotaciones que  
548 incluyeron CC mostraron mayores valores de K, junto con mayores valores de  
549 macroporosidad. La combinación de especies con distinto sistema radicular, como  
550 ocurre entre vicia y maíz es una correlación positiva para la conductividad hidráulica  
551 del suelo.

### 552 **Índice de repelencia al agua**

553 Esta variable no presentó diferencias significativas entre tratamientos (Figura 10). Si  
554 bien Kraemer et al. (2019) han encontrado un aumento del R cuando se intensifican  
555 los cultivos, sumado a la textura y mineralogía del suelo, este indicador debería  
556 evaluarse a mediano plazo para poder observar resultados más concluyentes ya que  
557 el ensayo presenta diferentes tipos de manejo sobre el lote. Esto, sumado a las

558 características inherentes del suelo, podrían en un futuro presentar cambios sobre la  
559 repelencia al agua debido al diferente aporte de carbono que realizan los distintos  
560 cultivos.

### 561 **Carbono orgánico total**

562 Como puede verse en la Figura 11, el tratamiento M presentó mayor valor de COT, sin  
563 diferencias significativas con el tratamiento S. Salvagiotti et al. (2012) encontraron que  
564 la inclusión de CC en una rotación que ya incluía gramíneas no afectó en el corto  
565 plazo el CO en fracciones por encima de la 106  $\mu\text{m}$  a una profundidad de 3,5 cm  
566 posiblemente debido a la cantidad de C aportado por el maíz y el trigo de la secuencia.  
567 Por el contrario, Rillo et al (2012) reportaron un aumento de CO particulado en los  
568 primeros 5 cm del perfil en los tratamientos que incluyeron CC en comparación con  
569 barbecho desnudo. En el mismo sentido, Scianca et al. (2006) reportaron una relación  
570 positiva entre el aporte de la biomasa aérea de los CC y el CO particulado, en una  
571 secuencia agrícola girasol-CC y maíz. En la Figura 11 puede verse que, en este caso,  
572 las rotaciones que incluyen CC muestran valores intermedios de CO.

573 El contenido de carbono orgánico total es significativamente mayor para las gramíneas  
574 por su aporte de rastrojo al suelo. La inclusión de este tipo de especies en las  
575 rotaciones ya sea como CC o como cultivo de renta aporta al aumento de esta  
576 variable. Si bien es importante generar un aumento del contenido de CO porque  
577 colabora con la estructuración de los suelos, aumenta la infiltración y demás variables  
578 relacionadas, no es un buen indicador de calidad ya que no es lo suficientemente  
579 sensible como para detectar cambios a corto plazo debido a prácticas de manejo  
580 (Purakayastha et al., 2008). Estudios futuros deberían focalizarse en la variación de  
581 las distintas fracciones del carbono, ya que varios autores (Rillo et al 2012, Scianca et  
582 al 2006, Eiza et al 2008) encuentran variaciones en el CO particulado trabajando con  
583 diferentes especies de CC.

584 **7. Conclusiones**

585 La inclusión de CC en rotaciones bajo SD mejoran la capacidad del suelo de transmitir  
586 agua, a través de un aumento de la macroporosidad y de la conductividad hidráulica  
587 saturada.

588 La inclusión de CC en rotaciones bajo SD no implica un aumento del CO ni de la  
589 hidrofobicidad del suelo en el corto plazo.

590 La combinación de leguminosas como CC junto a gramíneas como cultivo de verano,  
591 significan un mayor aumento en la infiltración y la macroporosidad del suelo, producto  
592 de los distintos sistemas radicales.

593 **8. Bibliografía**

594 **Actualización técnica INTA n°58.** 2011. Siembra directa. Disponible en  
595 [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-siembra\\_directa\\_2011.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-siembra_directa_2011.pdf). Ultimo  
596 acceso: Agosto, 2019.

597 **Alapin, H.** 2008. Rastrojos y algo más: Historia de la siembra directa en Argentina- 1ª  
598 ed.- Buenos Aires: Editorial Teseo, 2008. 132pp.

599 **Álvarez, R., Steinbach, H.S. & De Paepe, J.L.** 2017. Cover crop effects on soils and  
600 subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. Soil & Tillage Research. 170 (2017)  
601 53-65.

602 **Ankeny M.D., Ahmed, M., Kaspar, T.C. & Horton, R.** 1991. Simple field method for  
603 determining unsaturated hydraulic conductivity. Soil Science Society of  
604 America Journal, 55(2):467-470.

605 **Austin, A., T. Pineiro, G. & Gonzalez-Polo, M.** 2006. More is less: agricultural  
606 impacts on the N cycle in Argentina, Biogeochemistry, 79: 45–60.

607 **Blanco-Canqui, H., Mikha, M., M. Presley, D., & R. Claassen, M.M.** 2011. Addition of  
608 cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties, *Soil Sci.*  
609 *Soc. Am. J.*, 75: 1471–1482.

610 **Blanco-Canqui, H.** 2011. Does no-till farming induce water repellency to soils? *Soil*  
611 *UseManag.* 27, 2–9.

612 **Blanco-Canqui, H. & Ruis, S.J.** 2018. No-tillage and soil physical environment,  
613 *Geoderma*, 326: 164-200.

614 **Blanco-Canqui, H., Shaver, T.M., Lindquist, J.L., Shapiro, C.A., Elmore, R.W.,**  
615 **Francis, C.A., Hergert, G.W.** 2015. Cover crops and ecosystem services: Insights  
616 from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107(6): 2449-2474.

617 **Bodner, G., Loiskandl, W., Buchan, G., Kaul, H.P.** 2008. Natural and management-  
618 induced dynamics of hydraulic conductivity along a cover-cropped field slope.  
619 *Geoderma*. 146(1-2): 317-325.

620 **Cambardella, C.A. & E.T. Elliott.** 1992. Particulate soil organic matter changes across  
621 a grassland cultivation sequence, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 777-782.

622 **Carof, M., S De Tourdonnet, Coquet, Y., Hallaire, V. & Roger- Estrade, J.** 2007.  
623 Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of  
624 three species of cover crop in northern France. *Soil Use and Management*. September  
625 2007. 230–237.

626 **Castilla, F.** 2013. Siembra directa, la elegida para conservar el suelo. Disponible en  
627 <http://ria.inta.gob.ar/sites/default/files/numeros/ria-39-2-2013.pdf>. Ultimo acceso:  
628 Agosto, 2019.

629 **Casas, R.** 2007. Dtor CIRN INTA Castelar. Comunicación Pública

630 **Caviglia, O.P., Novelli, L., Gregorutti, V.C., Van Opstal, N.V. & Melchiori, R.J.**  
631 2012. Cultivos de cobertura invernales: una alternativa de intensificación sustentable  
632 en el centro-oeste de Entre Ríos. En: Contribución de los cultivos de cobertura a la  
633 sustentabilidad de los sistemas de producción / edición literaria a cargo de Cristián  
634 Álvarez... [Et al.] – 1a ed. – La Pampa: Ediciones INTA, 2012. Pp: 148- 157.

635 **Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M.,**  
636 **Robledo, C.W.** 2008. InfoStat, versión 2008. Grupo infostat, fca, Universidad Nacional  
637 de Córdoba, Argentina. 268.

638 **De Battista, J., A. Andriulo & C. Pecorari.** 1992. El perfil cultural: un método para la  
639 evaluación de sistemas de cultivo. Ciencia del Suelo 10-11, 89-93.

640 **Dlapa, P., Doerr, S.H., Lichner, L., Šír, M., Tesař, M.** 2004. Effect of kaolinite and  
641 camontmorillonite on the alleviation of soil water repellency. Plant Soil Environ. 50,  
642 358–363.

643 **Duval, M.E., Galantini, J.A., Capurro, J.E & Martínez, J.M.** 2016. Winter cover crops  
644 in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions, Soil & Tillage,  
645 161: 95-105.

646 **Eiza M., Studdert, G. & Domínguez, G.** 2008. Dinámica de la materia orgánica del  
647 suelo bajo rotaciones mixtas: II Materia orgánica particulada. XX Congreso Argentino  
648 de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy (Resumen. en CD).

649 **Elrick, D.E., Reynolds, W.D., Baumgartner, N., Tan, K.A. & Bradshaw, K.L.** 1987.  
650 In-situ measurements of hydraulic properties of soils using the Guelph  
651 permeameter and the Guelph infiltrometer. In International Workshop On  
652 Land Drainage. 3, 13-23.

- 653 **Fabrizzi, K.P., García, F.O., Costa, J.L & Picone, L.** 2005. Soil water dynamics,  
654 physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems  
655 in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81: 57-69
- 656 **Ferreras, L.A., Costa, J.L., García, F.O & Pecorari, C.** 2000. Effect of no-tillage on  
657 some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the  
658 southern "Pampa" of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 31-39
- 659 **Gabriel, J.L., Quemada, M., Martín-Lammerding, D. & Vanclooster, M.** 2019.  
660 Assessing the cover crop effect on soil hydraulic properties by inverse modelling in a  
661 10-year field trial. *Agric. Water Manag.* 222, 62–71.
- 662 **Galantini, J.A., Rosell, R.A., Iglesias, J.O.** 1994. Determinación de materia orgánica  
663 empleando el método de Walkley y Black en fracciones granulométricas del suelo,  
664 *Ciencia del suelo*, 12: 81-83.
- 665 **Galantini, J.A & Suñer, L.** 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en  
666 los suelos de la Argentina *Agrocientia* vol XXV (1) 41-55.
- 667 **Gardner, W.R.** 1958. Algunas soluciones de estado estacionario de la ecuación de  
668 flujo de humedad insaturada con aplicación a la evaporación de un nivel freático. *Soil*  
669 *science*, 85 (4): 228-232.
- 670 **González-Peñaloza, F.A., Cerdà, A., Zavala, L.M., Jordán, A., Giménez-Morera,**  
671 **A.G. & Arcenegui, V.** 2012. Do conservative agriculture practices increase soil water  
672 repellency? A study in citrus-cropped soils. *Soil Till. Res.* 124, 233–239.
- 673 **Hallett, P.D., Nunan, N., Douglas, J.T., Young, I.M.** 2004. Millimeter-scale spatial  
674 variability in soil water sorptivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 352-358.

675 **Harper, R., Mckissock, I., Gilkes, R., Carter, D. & Blackwell, D.P.** 2000. A  
676 multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management  
677 and landuse on water repellency. *J. Hydrol.* 231-232, 371–383.

678 **Haruna, S.I., Anderson, S.H., Nkongolo, N.V., & Zaibon, S.** 2018. Soil hydraulic  
679 properties: Influence of tillage and cover crops. *Pedosphere*, 28(3), 430-442.

680 **Hermida, G.** 2018. Evolución de la producción de granos en Argentina. Departamento  
681 de estimaciones agrícolas. Bolsa de cereales. Disponible en:  
682 <http://www.bolsadecereales.com/imagenes/informes/2018-08/59-curitiba2018->  
683 [bolsadecereales.pdf](http://www.bolsadecereales.com/imagenes/informes/2018-08/59-curitiba2018-bolsadecereales.pdf). Último acceso: Agosto, 2019.

684 **Hillel, D.** 1998. *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and*  
685 *environmental considerations*, Elsevier.

686 **Jaramillo, J.D.F.** 2003. Efecto de la temperatura de secado del suelo sobre la  
687 repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. Informe de  
688 investigación. Universidad Nacional de Colombia, Medellín (36 p).

689 **Kraemer Behrends, F., Hallet, P.D., Morrás, H., Garibaldi, L., Cosentino, D., Duval,**  
690 **M., & Galantini, J.** 2019. Soil stabilization by water repellency under no- till  
691 management for soils with contrasting mineralogy and carbon quality. *Geoderma* 355  
692 (2019) 113902.

693 **Kruger, H. & Quiroga, A.** 2012. La “interfase suelo-atmósfera” y su valor estratégico  
694 en regiones semiáridas. En: *Contribución de los cultivos de cobertura a la*  
695 *sustentabilidad de los sistemas de producción / edición literaria a cargo de Cristián*  
696 *Álvarez ... [et al.] – 1a ed. – La Pampa: Ediciones INTA, 2012. Pp: 5-6.*

697 **Lozano, L.A.** 2014. Desarrollo de estructura laminar del suelo en siembra directa.  
698 Factores predisponentes y efectos sobre las propiedades hidráulicas. Tesis Doctoral.  
699 Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. 167.

700 **Mualem, Y.** 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated  
701 porous media. *Water Resour. Res.* 12, 513-522.

702 **Mukherjee, A. & Lal, R.** 2015. Short-term effects of cover cropping on the quality of a  
703 Typic Argiaquolls in Central Ohio. *Catena*. 131 (2015) 125-129.

704 **Pansu, M., Gautheyrou, J.** 2003. Handbook of Soil Analysis Mineralogical, Organic  
705 and Inorganic Methods, Nueva York, Springer-Verlag. ISBN-10 3-540-31210-2  
706 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-31210-9 Springer Berlin  
707 Heidelberg New York.

708 **Perroux K. M., & White, I.** 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society*  
709 *of America Journal*, 52(5): 1205-1215.

710 **Philip, J. R.** 1985. Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated  
711 soil. *Water Resources Research*, 21(7): 1025-1033.

712 **Primavesi, A.** 1999. Manejo Ecológico del Suelo, El Ateneo, Buenos Aires. 1982.

713 **Purakayastha, T.J., Rudrappa, L., Singh, D., Swarup, A., Bhadraray, S.** 2008.  
714 Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in  
715 maize–wheat–cowpea cropping system. *Geoderma*. 144(1-2): 370-378.

716 **Ramírez & Porsmann.** 2007. Evolución de la superficie de los 4 cultivos en la región  
717 pampeana y extra pampeana. CD.

718 **Ridley, N.** 2012. Cultivos de cobertura en el sur de Santa Fé: Efectos sobre la  
719 eficiencia de barbecho y la porosidad del suelo. En: Contribución de los cultivos de

720 cobertura a la sustentabilidad de los sistemas de producción / edición literaria a cargo  
721 de Cristián Álvarez... [Et al.] – 1a ed. – La Pampa: Ediciones INTA, 2012. Pp: 7-15.

722 **Rillo, S., Álvarez, C., Bagnato, R & Noellemeyer, E.** 2012. Cultivos de cobertura:  
723 gramíneas y leguminosas en el centro oeste de la provincia de Buenos Aires En:  
724 Contribución de los cultivos de cobertura a la sustentabilidad de los sistemas de  
725 producción / edición literaria a cargo de Cristián Álvarez ... [et al.] – 1a ed. – La  
726 Pampa: Ediciones INTA, 2012. Pp: 58-68.

727 **Romano, N., Hopmans, J. W.** 2002. Suction table. p. 692–698. JH Dane and GC  
728 Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.

729 **Salvagiotti, F., Vernizzi, A., Bodrero, M., & Bacigaluppo, S.** 2012. Cambios en el  
730 corto plazo en distintas fracciones de la materia orgánica en respuesta a la inclusión  
731 de cultivos de cobertura en secuencias basadas en soja. En: Contribución de los  
732 cultivos de cobertura a la sustentabilidad de los sistemas de producción / edición  
733 literaria a cargo de Cristián Álvarez... [Et al.] – 1a ed. – La Pampa: Ediciones INTA,  
734 2012. Pp: 88-91.

735 **SAMLA-PROMAR.** 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de  
736 Análisis de Suelos (SAMLA). SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y  
737 Alimentación de la Nación Argentina. Dirección de Producción Agrícola). Versión  
738 Electrónica. ISBN 987-9184-40-8.

739 **Sasal, M.C., & Andriulo, A.E.** 2003. Comparación de dos métodos para determinar la  
740 distribución de la porosidad edáfica en dos sistemas de labranza. Ciencia del suelo 21  
741 (2): 74-78.

742 **Satorre, E.H.** 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual.  
743 Disponible en:

744 [https://www.researchgate.net/profile/Emilio\\_Satorre/publication/284026616\\_Cambios\\_tecnologicos\\_en\\_la\\_agricultura\\_argentina\\_actual/links/58efa9a2458515ff23a87917/Cambios-tecnologicos-en-la-agricultura-argentina-actual.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Emilio_Satorre/publication/284026616_Cambios_tecnologicos_en_la_agricultura_argentina_actual/links/58efa9a2458515ff23a87917/Cambios-tecnologicos-en-la-agricultura-argentina-actual.pdf). Ultimo acceso: Agosto, 747 2019.

748 **Schjønning, P. & K.J. Rasmussen.** 2000. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil Till.Res.* 57: 69-82.

750 **Scianca, C., Álvarez, C., Barraco, M., Pérez, A. & Quiroga, A.** 2006. Cultivos de cobertura en sistemas orgánicos. Aporte de carbono y dinámica de malezas. Actas del 751 XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. (En CD).

753 **Senasa.** Casos confirmados de malezas resistentes en Argentina. Disponible en 754 <http://www.senasa.gob.ar/casos-confirmados-de-malezas-resistentes-en-argentina>. Ultimo acceso: Agosto, 2019.

756 **Sokal, R.R., & Rohlf, F.J.** 1995. Los principios y la práctica de las estadísticas en la 757 investigación biológica. Nueva York: Edición, 3.

758 **Soracco, C.G., Lozano, L.A., Villarreal, R., Palancar, T.C., Collazo, D.J., Sarli, G.O., & Filgueira, R.R.** 2015. Effects of compaction due to machinery traffic on soil 759 pore configuration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(2): 408-415.

761 **Studdert, G. A. & Echeverria, H. E.** 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to 762 manage soil organic carbon dynamics, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1496–1503.

763 **van Genuchten, M.T.** 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic 764 conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.

765 **van Genuchten, M.T., Leij, F.J., Yates, S.R.** 1991. The RETC code for quantifying the 766 hydraulic functions of unsaturated soils.

767 **Villamil, M.B., Bollero, G.A., Darmody, R.G., Simmons, F.W, Bullock, D.G.** 2006.  
768 “No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops: Effects on Soil  
769 Properties”. Soil Science Society of America Journal. 70:1936–1944.

770 **Villarreal, R., Soracco, C.G., Lozano, L.A., Melani, E.M., & Sarli, G.O.** 2017.  
771 Temporal variation of soil sorptivity under conventional and no-till systems determined  
772 by a simple laboratory method. Soil and Tillage Research, 168: 92-98.

773 **Villarreal, R.** 2018. Variación temporal de las propiedades físicas del suelo y su  
774 impacto en la dinámica del glifosato en suelos bajo siembra directa y labranza  
775 convencional. Tesis. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata,  
776 Argentina. 219 pp.

777 **Villarreal, R., Lozano, L.A., Salazar, M.P, Bellora, G.L., Melani, E.M., Polich, N.G.,**  
778 **C.G. Soracco.** 2020. Pore system configuration and hydraulic properties. Temporal  
779 variation during the crop cycle in different soil types of Argentinean Pampas Region.  
780 Soil & Tillage Research, 198.

781 **Wahl, N.A., O. Bens, U. Buczko, E. Hangen, R.F. Hüttl.** 2004. Effects Of  
782 Conventional And Conservation Tillage On Soil Hydraulic Properties Of A Silty- Loamy  
783 Soil. Physics And Chemistry Of The Earth 29: 821-829.

784 **Walkley, A. & I.A. Black,** 1934. An examination of the degtjareff method for  
785 determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid  
786 titration method, Soil Sci., 37(1): 29-38.

787 **Watson K.W. & R.J. Luxmoore.** 1986. Estimating macroporosity in a forest  
788 watershed by use of a tension infiltrometer. Soil Science Society of America Journal,  
789 50(3): 578-582.

- 790 **Wheeler, W.A & D.D. Hill.** 1957. Southern grasses. P. 544-561. In grassland seeds. D.
- 791 Van nostrand company, inc. Princeton, New Jersey.
- 792 **Wooding, R. A.** 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water resources
- 793 research, 4(6): 1259-1273.