

Alternancia de cultivos en la producción de algodón: su efecto sobre propiedades físicas y químicas de un Haplustol bajo riego del semiárido en Santiago del Estero

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias del Suelo

Patricio Savino

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Santiago del Estero - 2012

Lugar de trabajo: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA – Santiago del Estero



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de Tesis

Mario Guillermo Castiglioni

Ing. Agr. (Universidad Nacional de Buenos Aires)
Doctor en Ingeniería (Universidad Nacional de Rosario)

Co-director de Tesis

Marcelo Germán Wilson

Ing. Agr. (Universidad Nacional de Entre Ríos)
Doctor en Ciencias de la Tierra y el Ambiente (Universidad de La Coruña, España)

Consejero de Estudios

Filipe Behrends Kraemer

Ing. Agr. (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Buenos Aires)

JURADO DE TESIS

JURADO

Ana Beatriz Wingeyer

Ing. Agr. (Universidad Nacional de Mar del Plata)
Doctora en Ciencias del Suelo (University of Nebraska)

JURADO

Luis Alberto Lozano

Ing. Agr. (Universidad Nacional de La Plata)
Doctor en Ciencias Agrarias y Forestales (Universidad Nacional de La Plata)

JURADO

Romina Fernández

Ing. Agr. (Universidad Nacional de La Pampa)
Doctora en Agronomía (Universidad Nacional del Sur)

Fecha de defensa de la tesis: 21 de abril de 2021

DEDICATORIA

Para mis amores Helena y Cecilia.

AGRADECIMIENTOS

A mi Director, Mario, gracias por la oportunidad, guiarme y acompañarme incondicionalmente en este camino.

A mi comité, Marcelo y Filipe. Gracias por las correcciones y por el apoyo constante.

A mis jurados Ana B. Wingeyer, Luis A. Lozano y Romina Fernández por enriquecer sensiblemente esta tesis.

Al INTA Santiago del Estero por la infraestructura y la colaboración de su personal, en especial A María Cristina Sánchez, Emilio Abel Azar y Néstor A. Gómez por la ayuda y compañía todos estos años y otros compañeros de INTA como Agustín López, Olegario Hernández y los ayudantes técnicos del grupo RRNN (Ramiro, Juan Carlos, Mario y César) por su ayuda.

Al Ing. Forestal Cristian D. Savino por sus consejos para realizar la redacción y exposición de la tesis.

A mi hija Helena por darme la fuerza para sobreponerme a las adversidades que aparecieron a lo largo de este camino y a Cecilia Alejandra Lami, por acompañarme a superar juntos esas adversidades.

Declaración

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

ÍNDICE DE TEMAS

ÍNDICE DE TABLAS.....	- VIII -
ÍNDICE DE FIGURAS.....	- X -
Lista de abreviaturas.....	- XIII -
Resumen.....	- XV -
Abstract.....	- XVI -
Capítulo 1: Introducción.....	- 1 -
1.1 Introducción general:	- 2 -
1.1.2 Objetivos	- 12 -
1.2 Materiales y métodos	- 13 -
1.2.1 Ubicación del área de estudio.....	- 13 -
1.2.2 Clima	- 13 -
1.2.3 Suelo.....	- 15 -
1.2.4 Vegetación natural.....	- 18 -
1.2.5 Ubicación y características del ensayo	- 18 -
1.2.5.1 Riegos.....	- 19 -
1.2.5.2 Características granulométricas.....	- 21 -
1.3 Muestreo y propiedades analizadas	- 22 -
1.3.1 Muestreo	- 22 -
1.3.2 Variables analizadas	- 23 -
1.3.2.1 Carbono orgánico	- 23 -
1.3.2.2 Estabilidad de la estructura	- 24 -
1.3.2.3 Densidad aparente (DAP):	- 27 -
1.3.2.4 Resistencia mecánica a la penetración (RMP):	- 27 -
1.3.2.5 Conductividad hidráulica	- 28 -
1.3.2.5.1 Conductividad hidráulica saturada determinada en laboratorio (Ks)... ..	- 29 -
1.3.2.5.2 Conductividad hidráulica estimada a campo (Kh).....	- 29 -
1.3.2.6 Humedad gravimétrica del suelo (HG):	- 30 -
1.3.3 Variables del cultivo.....	- 31 -
1.3.3.1 Rendimiento en fibra seca del algodón (FS)	- 31 -
1.3.3.3 Índice de intensificación de la secuencia de cultivos (ISI)	- 31 -

1.4 Análisis estadístico	32 -
 Capítulo 2: Efecto de las distintas secuencias de cultivos sobre algunas propiedades	
físicas y químicas edáficas y sobre el rendimiento en fibra del algodón	34 -
 2.1 Introducción	35 -
2.1 Objetivos e hipótesis	36 -
2.1.1 Objetivo general	36 -
2.1.2 Objetivos específicos.....	36 -
2.1.2.1 Hipótesis.....	37 -
2.2 Materiales y métodos	37 -
2.2.1 Análisis estadísticos	37 -
2.3 Resultados y discusión	39 -
2.3.1 Variación estacional, interanual y entre tratamientos del carbono orgánico total (COT), asociado (COA) y particulado (COP).....	42 -
2.3.1.1 Stock de carbono en la capa de 0 a 5 cm.....	43 -
2.3.1.2 Stock de carbono en la capa de 5 a 20 cm.....	47 -
2.3.2 Variación estacional, interanual y entre tratamientos de la densidad aparente (DAP) para ambas profundidades	49 -
2.3.2.1 Densidad aparente en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm.....	50 -
2.3.2.2 Densidad aparente en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm.....	51 -
2.3.3 Variación de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) entre los tratamientos, estaciones del año y años evaluados.....	54 -
2.3.3.1 RMP en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm.....	55 -
2.3.3.2 RMP en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm.....	58 -
2.3.4 Variación de la estabilidad estructural entre los tratamientos y años evaluados.....	60 -
2.3.4.1 Pretratamiento de Humedecimiento rápido (DMP _{hr}).	60 -
2.3.4.1.1 DMP _{hr} en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm	60 -
2.3.4.1.2 DMP _{hr} en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm	62 -
2.3.4.2 Pretratamiento de disgregación mecánica (DMP _{dm}).....	65 -
2.3.4.2.1 DMP _{dm} en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm	65 -
2.3.4.2.2 DMP _{dm} en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm.....	67 -
2.3.4.3 Pretratamiento de humedecimiento lento (DMP _{hl}).....	69 -
2.3.4.3.1 DMP _{hl} en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm.....	69 -
2.3.4.3.2 DMP _{hl} en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm.....	71 -
2.3.4.4 Diámetro medio ponderado promedio (DMP _{med}):.....	72 -
2.3.4.4.1 DMP _{med} en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm	72 -

2.3.4.4.2 DMP _{med} en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm.	- 75 -
2.3.5 Variación de la conductividad hidráulica (Ks) entre los años y tratamientos evaluados.	- 77 -
2.3.5.1 Ks en la capa de suelo entre 0 a 5 cm.....	- 77 -
2.3.5.2 Ks en la capa de suelo entre 5 a 20 cm.....	- 79 -
2.3.6 Efecto de los tratamientos y la fecha de muestreo sobre la conductividad hidráulica superficial estimada a distintas tensiones.	- 81 -
2.3.6.1 Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 0 cm (Kh _{0cm}).....	- 81 -
2.3.6.2 Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 1,5 cm (Kh _{1,5cm}).....	- 83 -
2.3.6.2 Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 3 cm (Kh _{3cm}).....	- 85 -
2.3.7 Rendimiento de fibra seca (FS) durante la campaña 2015-2016, para los tratamientos evaluados.	- 87 -
2.4 Conclusiones.....	- 89 -
 <i>Capítulo 3: Respuesta de distintas propiedades edáficas al incorporar un Haplustol torriorténtico degradado a la producción bajo riego de cultivos agrícolas o de alfalfa para corte.....</i>	
3.1 Introducción.....	- 94 -
3.2 Objetivos e hipótesis.....	- 95 -
3.2.1 Objetivo general.....	- 95 -
3.2.2 Objetivos específicos.....	- 95 -
3.2.2.1 Hipótesis.....	- 95 -
3.3 Materiales y métodos.....	- 96 -
3.3.1 Propiedades analizadas.....	- 96 -
3.3.2 Análisis estadístico.....	- 96 -
3.4 Resultados y discusión.....	- 97 -
3.4.1. Resultados del carbono orgánico total (COT), asociado (COA) y particulado (COP), obtenidos por los distintos usos de la tierra (agricultura, pastura para corte y monte).....	- 98 -
3.4.1.1. COP, COA y COT en ambas capas de suelo.....	- 98 -
3.4.2. Resultados de densidad aparente (DAP) para los distintos usos de la tierra (agrícola, pastura para corte y monte).	- 104 -
3.4.2.1. DAP en ambas capas de suelo.....	- 104 -
3.4.3. Resultados de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) para los distintos usos de la tierra (agricultura, pastura para corte, monte).....	- 107 -
3.4.3.1. RMP en ambas capas de suelo.....	- 107 -

3.3.4. Resultados de estabilidad estructural según los distintos usos de la tierra..	- 110
-	
3.4.4.1. Pretratamiento de humedecimiento rápido (DMP_{hr}).	- 110 -
3.4.4.1.1. DMP_{hr} en ambas capas de suelo.....	- 110 -
3.3.4.2. Pretratamiento de disgregación mecánica (DMP_{dm}).	- 112 -
3.3.4.2.1. DMP_{dm} en ambas capas de suelo.....	- 112 -
3.3.4.3. Pretratamiento de humedecimiento lento (DMP_{hl}).	- 114 -
3.3.4.3.1. DMP_{hl} en ambas capas de suelo	- 114 -
3.3.4.4. Diámetro medio ponderado promedio (DMP_{med}).	- 116 -
3.3.4.4.1. DMP_{med} de ambas profundidades.....	- 116 -
3.3.5. Resultados de conductividad hidráulica superficial estimada a distintas tensiones, para los distintos usos de la tierra estudiados.	- 118 -
3.3.5.1. Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 0 cm (Kh_{0cm}).....	- 118 -
3.3.5.2. Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 1,5 cm ($Kh_{1,5cm}$).....	- 121 -
3.3.5.3. Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 3 cm (Kh_{3cm}).....	- 122 -
3.5. Conclusiones	- 124 -
<i>Capítulo 4: Consideraciones finales.....</i>	- 128 -
<i>Bibliografía.....</i>	- 134 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Datos analíticos correspondientes a la Serie La María.	- 16 -
Tabla 1.2. Descripción del perfil correspondiente al suelo agrícola.	- 17 -
Tabla 1.3. Secuencias de cultivos correspondientes a los distintos tratamientos del ensayo.	- 19 -
Tabla 1.4. Proporciones relativas de los distintos tamaños de partículas presentes en los sitios de evaluación	- 21 -
Tabla 1.5. Escala de “Clases de estabilidad” propuesta por Le Bissonnais (1996) ..	- 25 -
Tabla 2.1. Resultados del análisis de los modelos lineales, generales y mixtos, correspondiente a las distintas propiedades analizadas en el estrato superficial del suelo en dos años sucesivos para las distintas secuencias de cultivos.	- 40 -
Tabla 2.2. Resultados del análisis de modelos lineales, generales y mixtos, correspondiente a las distintas propiedades analizadas en el estrato de 5 a 20 cm de profundidad en dos años sucesivos para las distintas secuencias de cultivos.	- 41 -
Tabla 2.3. Análisis de los efectos de las secuencias de cultivos, fecha de muestreo e interacción –secuencia-fecha en el stock de COT, COA y COP para las dos profundidades analizadas.	- 42 -
Tabla 2.4. Análisis de los efectos de las secuencias de cultivos, fecha de muestreo e interacción secuencia-fecha en la densidad aparente para las dos profundidades analizadas.	- 50 -
Tabla 2.5. Análisis de varianza de la humedad gravimétrica del suelo (%) para la profundidad de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm.	- 54 -
Tabla 2.6. Análisis de los efectos de las secuencias de cultivos, fecha de muestreo e interacción secuencia-fecha en la RMP para las dos profundidades analizadas. ..	- 55 -
Tabla 2.7. Relación entre los resultados obtenidos por cada variable en cada tratamiento respecto al determinado en el monocultivo de algodón en el estrato de 0 a 5 cm.	- 91 -
Tabla 2.8. Relación entre los resultados obtenidos por cada variable en cada tratamiento respecto al determinado en el monocultivo de algodón en el estrato de 5 a 20 cm.	- 91 -

Tabla 3.1. Análisis de varianza del efecto de dos usos de la tierra contrastantes (agricultura y pastura para corte) y de una situación de referencia (monte), sobre distintas propiedades edáficas, correspondientes a dos profundidades (0 a 5 y 5 a 20 cm).....	- 98 -
Tabla 3.2. Análisis de varianza de la humedad gravimétrica entre los distintos usos de la tierra y para las profundidades de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm.	- 107 -
Tabla 3.3. Relación entre los resultados obtenidos por cada variable en cada tratamiento respecto a los determinados en el monte para los estratos de 0 a 5 cm y 5 a 20 cm	- 125 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación geográfica del Gran Chaco Sudamericano.....	- 3 -
Figura 1.2. Ubicación geográfica del área de estudio	- 13 -
Figura 1.3. Temperaturas medias mensuales y precipitaciones mensuales para el período comprendido entre noviembre de 2015 a noviembre de 2017, junto con las temperaturas medias mensuales y precipitaciones mensuales históricas	- 14 -
Figura 1.4. Registro de temperaturas medias mensuales del suelo de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm para el período noviembre de 2015 - noviembre de 2017	- 15 -
Figura 1.5. Lámina de agua recibida por el ensayo en concepto de precipitación y riego, evapotranspiración potencial y momentos de siembra y de muestreo. Evapotranspiración potencial mensual promedio estimada.	- 20 -
Figura 2.1. Resultados del stock de COT, COA y COP entre los 0 y 5 cm de profundidad para las cuatro fechas de muestreo: junio 2016, noviembre 2016, junio 2017, noviembre 2017	- 44 -
Figura 2.2. Resultados del stock de COT, COA y COP entre los 5 y 20 cm de profundidad para las cuatro fechas de muestreo: junio 2016, noviembre 2016, junio 2017, noviembre 2017.....	- 48 -
Figura 2.3. a) Resultados de DAP entre los 5 y 20 cm de profundidad en las cuatro fechas de muestreo: junio 2016, noviembre 2016, junio 2017, noviembre 2017. b) Resultados de DAP entre los 5 y 20 cm de profundidad correspondientes a los cinco tratamientos evaluados.	- 52 -
Figura 2.4 Resultados de RMP entre los 0 y 5 cm de profundidad correspondientes a los cinco tratamientos evaluados. a) fecha 1 (jun-16), b) fecha 2 (nov-16), c) fecha 3 (jun-17), d) fecha 4 (nov-17).....	- 57 -
Figura 2.5. a) Resultados de RMP entre 5 y 20 cm de profundidad para los cinco tratamientos evaluados. b) Resultados de RMP entre 5 y 20 cm de profundidad para las cuatro fechas de muestreo realizadas.	- 59 -
Figura 2.6. Resultados del pretratamiento humedecimiento rápido (DMPhr) (0 a 5 cm): a) para los cinco tratamientos evaluados, b)_ para los dos años de muestreo.....	- 61 -

- Figura 2.7.** Resultados del pretratamiento de humedecimiento rápido (DMP_{hr}) (5 a 20 cm) para los cinco tratamientos. a) fecha 1 (jun-16). b) fecha 3 (jun-17)..... - 64 -
- Figura 2.8.** Resultados del pretratamiento disgregación mecánica (DMP_{dm}) (0 a 5 cm) a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos años de muestreo..... - 66 -
- Figura 2.9.** Resultados del pretratamiento de disgregación mecánica para determinar estabilidad estructural (DMP_{dm}) (5 a 20 cm): a) para los cinco tratamientos evaluados, b)_ para los dos años de muestreo..... - 67 -
- Figura 2.10.** Resultados del pretratamiento humedecimiento lento (DMP_{hl}) (0 a 5 cm) a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos años de muestreo..... - 70 -
- Figura 2.11.** Resultados del pretratamiento humedecimiento lento (DMP_{hl}) (5 a 20 cm) para los cinco tratamientos: a). fecha 1 (jun-16). b). fecha 3 (jun-17)..... - 71 -
- Figura 2.12.** Resultados del promedio de los tres pretratamientos de estabilidad estructural (DMP_{med}) (0 a 5 cm): a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos años de muestreo..... - 73 -
- Figura 2.13.** Resultados del promedio de los tres pretratamientos de estabilidad estructural (DMP_{med}) (5 a 20 cm): a) para los cinco tratamientos evaluados, b) Para los dos muestreos realizados - 76 -
- Figura 2.14.** Resultados del $\log_{10} K_s$ para los cinco tratamientos evaluados en: a) profundidad de 0 a 5 cm, b) profundidad de 5 a 20 cm..... - 78 -
- Figura 2.15.** Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 0 cm ($Kh_{0cm.}$) para los cinco tratamientos evaluados..... - 82 -
- Figura 2.16.** Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 1,5 cm ($Kh_{1,5cm.}$): a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos muestreos anuales realizados .. - 85 -
- Figura 2.17.** Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 3 cm ($Kh_{3cm.}$) para los cinco tratamientos evaluados: a) durante el muestreo de junio de 2016, b) durante el muestreo de junio de 2017..... - 86 -
- Figura 2.18.** Rendimiento de Fibra seca de algodón (Fs.) determinada en la campaña 2015-2016, para los cinco tratamientos evaluados..... - 88 -
- Figura 2.19.** Relación entre el rendimiento en fibra seca del cultivo de algodón obtenido por cada uno de los tratamientos con las diferencias relativas en los resultados de las distintas propiedades evaluadas en ambas profundidades del suelo. - 92 -

Figura 3.1. Resultados del stock de COT, COA y COP entre los 0 y 5 cm de profundidad para los distintos usos de la tierra evaluados.....	- 99 -
Figura 3.2. Resultados del stock de COT, COA y COP entre los 5 a 20 cm de profundidad para los distintos usos de la tierra evaluados.....	- 102 -
Figura 3.3. Resultados de DAP entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los distintos usos de la tierra evaluados..	- 105 -
Figura 3.4. Resultados de RMP entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad para los distintos usos de la tierra.	- 108 -
Figura 3.5. Resultados del pretratamiento humedecimiento rápido (DMP_{hr}) entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los diferentes usos de la tierra.....	- 111 -
Figura 3.6. Resultados del pretratamiento disgregación mecánica (DMP_{dm}) entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los diferentes usos de la tierra.....	- 113 -
Figura 3.7. Resultados del pretratamiento humedecimiento lento (DMP_{hl}) entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los diferentes usos de la tierra.....	- 115 -
Figura 3.8. Resultados del promedio de los tres pretratamientos de estabilidad estructural (DMP_{med}) entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los diferentes usos de la tierra.....	- 117 -
Figura 3.9. Resultados de conductividad hidráulica superficial estimada a una tensión de 0 cm (Kh_{0cm}) para los diferentes usos de la tierra.	- 119 -
Figura 3.10. Resultados de conductividad hidráulica superficial estimada a una tensión de 1,5 cm ($Kh_{1,5cm}$) para los diferentes usos de la tierra.....	- 121 -
Figura 3.11. Resultados de conductividad hidráulica superficial estimada a una tensión de 3cm (Kh_{3cm}) para los diferentes usos de la tierra.....	- 123 -

Lista de abreviaturas

alg: Algodón

ARD: Área de riego del Río Dulce

CIC: Capacidad de intercambio catiónico

COA: Carbono orgánico asociado

COP: Carbono orgánico particulado

COS: Carbono orgánico del suelo

COT: Carbono orgánico total

DAP: Densidad aparente

DMP_{dm}: Diámetro medio ponderado del pretratamiento de disgregación mecánica

DMP_{hl}: Diámetro medio ponderado del pretratamiento de humedecimiento lento

DMP_{hr}: Diámetro medio ponderado del pretratamiento de humedecimiento rápido

DMP_{med}: Diámetro medio ponderado promedio

F1: Primer muestreo

F2: Segundo muestreo

F3: Tercer muestre

F4: Cuarto muestreo

FS: Rendimiento de Fibra seca de algodón

ICC: Índice de intensificación de secuencia agrícola con cereales

ISI: Índice de intensificación de secuencia agrícola

Kh_{0cm}: Conductividad hidráulica estimada a campo sin tención de columna de agua

Kh_{1,5cm}: Conductividad hidráulica estimada a campo con tención de 1,5 cm de columna de agua

Kh_{3cm}: Conductividad hidráulica estimada a campo con tención de 3 cm de columna de agua.

Ks: Conductividad hidráulica saturada en laboratorio

MS: Materia Seca

mz: Maíz

RMP: Resistencia mecánica a la penetración

SD: Siembra directa

sj: Soja

T1: Sucesión de cultivos agrícolas alg-alg-alg-alg

T2: Sucesión de cultivos agrícolas mz-alg-alg-sj

T3: Sucesión de cultivos agrícolas mz-sj-alg-alg
T4: Sucesión de cultivos agrícolas mz-alg-alg-mz
T5: Sucesión de cultivos agrícolas mz-tr/alg-tr/alg-tr/sj
T6: Sitio de monte cuasi prístino
T7: Cultivo de alfalfa para corte
tr: Trigo

Resumen

El área de riego del Río Dulce de Santiago del Estero, ha sufrido la pérdida en la fertilidad física y química de sus suelos como resultado de un uso inapropiado. Esto promovió el desarrollo y la investigación de nuevas estrategias de manejo regionales, para mitigar los procesos de degradación de tierras observado en esta área. El objetivo de la presente tesis fue, analizar la respuesta de diferentes propiedades físicas y químicas de un Haplustol torriorténtico degradado de la región semiárida de Santiago del Estero, al tercer y cuarto año de iniciado un ensayo con diferentes sucesiones de cultivo y monocultivo de algodón bajo siembra directa (SD) y riego por manto. Durante las campañas 2015/2016 y 2016/2017 se recolectaron muestras de suelo a dos profundidades (0 a 5 cm y 5 a 20 cm), de un ensayo con cinco sucesiones de cultivos: (T1) algodón-algodón- algodón-algodón; (T2) maíz-algodón-algodón-soja; (T3) maíz-soja-algodón-algodón; (T4) maíz-algodón- algodón-maíz; (T5) maíz/trigo-algodón/trigo-algodón/trigo-soja/trigo. En 2016/17, también se tomaron muestras de suelo de un monte y de un ensayo con cultivo de alfalfa para corte. De las sucesiones de cultivo evaluadas, las que obtuvieron un mejor comportamiento de las variables estudiadas respecto al monocultivo de algodón fueron T2, T4 y T5 en superficie y T4 y T5 en profundidad. Las propiedades con menores cambios relativos respecto al monocultivo fueron las vinculadas al carbono, mientras que las de mayores contrastes fueron las ligadas a la estabilidad estructural y al movimiento de agua. Estas diferencias redundaron en una producción superior de fibra de algodón en T5. Los resultados promedio de las variables correspondientes a los estratos superficial y subsuperficial de T5, fueron el 72 % y 77 % respectivamente de los experimentados por el monte, mientras que para la alfalfa dichas proporciones fueron 59 % y 76 %. El mejor comportamiento en superficie de los suelos bajo agricultura respecto a la pastura, se debió fundamentalmente a lo sucedido con la resistencia a la penetración y con la conductividad hidráulica determinada a bajas tensiones.

Palabras clave: secuencias de cultivo, estabilidad estructural, carbono orgánico del suelo, compactación del suelo, siembra directa, riego por inundación

Abstract

The irrigated area of the Río Dulce river in Santiago del Estero suffered the loss of physical and chemical fertility, as a consequence of soil misuse. This has promoted the investigation and development of new regional management strategies to reduce soil degradation processes observed in this area. The objective of this thesis was to analyze the response of different physic and chemical properties of a degraded Torriorthentic Haplustoll located in the semiarid region of Santiago del Estero, at the third and fourth years from the start of a trial with different crop sequences with cotton and a cotton monoculture under no tillage and flood irrigation. During 2015/2016 and 2016/2017 soil samples were collected from two depths (0 to 5 cm and 5 to 20 cm), from a trial with five crop rotations: (T1) cotton-cotton-cotton-cotton; (T2) maize-cotton-cotton-soybean; (T3) maize-soybean-cotton-cotton; (T4) maize-cotton-maize-cotton; (T5) maize/wheat-cotton/wheat-cotton/wheat-soybean/wheat. In 2016/17, soil samples were also taken from a forest site and from a site with lucerne. Compared to the cotton monoculture, T2, T4 and T5 in surface soil and T4 and T5 in subsurface soil, were the crop rotations that obtained the best results. Soil properties with smaller relative changes with respect to cotton monoculture were those related to carbon content, whereas the properties with major contrasts were those related to soil structural stability and hydraulic conductivity. These differences contributed to a larger fiber production of cotton under T5. In average, results of soil variables for T5 were 72 % and 77 % for surface and subsurface soil layers, respectively, compared to the forest soil, while for Lucerne the same comparisons averaged 59% and 76%, respectively. The better soil surface behavior under agriculture with respect to pasture was mainly explained by the penetration resistance and the hydraulic conductivity determined at low tensions.

Key words: cultivation successions, soil structural stability, soil organic carbon, soil compaction, no till, flood irrigation

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción general:

En la República Argentina, el complejo agroalimentario es un importante generador de recursos económicos, representando aproximadamente el 38% del Producto Bruto Interno (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2010). En los últimos 40 años la producción agrícola de Argentina se ha incrementado, como consecuencia de un proceso de expansión basado en desmontes y cambios en el uso de la tierra. En este sentido, entre 1976 y 1997, los bosques semiáridos de las provincias del noroeste fueron habilitados para la agricultura a un ritmo de 84.000 ha por año (Lombardo y Pescio 2006; Volante et al. 2009). Entre los años 2000 y 2007 se desmontaron en Argentina 1.750.000 ha, siendo Salta y Santiago del Estero las provincias con mayor superficie afectada (92% del área total afectada del país) (Volante et al. 2009). Por su parte, con el ingreso en el país de la soja transgénica a partir de 1997, la tasa en el cambio de uso de la tierra se incrementó a 234.000 ha por año (Slutzky 2003).

El proceso de desmonte en Santiago del Estero comenzó a incrementarse en el año 1980, con el consecuente aumento en la producción agrícola-ganadera (Monti et al. 2012; Angella 2016). Esta provincia forma parte del Gran Chaco Sudamericano (Figura 1.1), correspondiendo el 75% de su superficie a ambientes áridos y semiáridos, por lo que el cambio de uso de la tierra se realizó mayoritariamente sobre dicha área, poniendo en riesgo su sustentabilidad. Entre 1998 y 2002, la tasa de deforestación en Santiago del Estero llegó a ser cuatro veces superior a la observada a nivel mundial (Moscuza et al. 2003; Moscuza et al. 2005; Lombardo y Pescio 2006). Tan solo entre 2000-2012 la provincia presentó una tasa de transformación de la cobertura vegetal natural por cultivos y pasturas, 13 veces superior a la de los bosques tropicales, 39 veces superior a la de los subtropicales y 45 veces superior a la de los bosques templados de todo el mundo (Vallejos et al. 2015). Esta característica determinó que, en 2013, la producción primaria fuera responsable del 18,7 % del Producto Bruto Geográfico de Santiago del Estero, participando el complejo cerealero con el 61,5 %, el oleaginoso con el 24,2 % y el algodónero con el 2,4 % (Ministerio de Economía y Finanzas Públicas 2014).



Figura 1.1. Ubicación geográfica del Gran Chaco Sudamericano. (Sánchez y Arrigo 2006)

Sólo el 3 % del territorio de la provincia de Santiago del Estero presenta infraestructura y disponibilidad de agua de calidad para riego (Sánchez y Arrigo 2006). Las zonas de regadío provinciales abarcan parte del departamento Banda, Capital, Loreto, Robles, San Martín y Silípica, dominados por el río Dulce (área de riego del Río Duce), y Figueroa, Avellaneda y General Taboada, dominadas por el río Salado. Como consecuencia de la posibilidad de ser regadas, estas superficies sufrieron grandes cambios en lo referente al uso de la tierra, tanto por la habilitación de nuevas áreas para la producción agrícola, como por el cambio en la intensidad de uso y por los cultivos utilizados (Galizzi et al. 2014).

El área de riego del Río Dulce (ARD) es la de mayor importancia en la provincia de Santiago del Estero, contando con una superficie total de 275.365 ha. Se ubica entre los 27°25' y 28°30' de Latitud Sur y entre los 64°20' y 63°45' de Longitud Oeste. Los suelos son de origen aluvial y loésico, con alta proporción de limo, sometidos históricamente a un sistema de labranza convencional, riego por manto y escasa rotación de cultivos (Galizzi et al. 2014). Actualmente hay un claro predominio del minifundio (Angella 2016), presentando el 59,5 % de los productores un bajo nivel de tecnificación (Coronel de Renolfi y Ortuño 2004). Dentro de dicha área se encuentran los centros urbanos más grandes de la provincia, que sumado al potencial productivo de las tierras por sus condiciones climáticas favorables, la aptitud de los suelos presentes y la calidad

del agua para riego, hacen de esta región la más importante de Santiago del Estero (Angella 2016).

El ARD concentra casi la totalidad de la producción agrícola bajo riego de la provincia (Radrizzani 2000), la cual está basada en cultivos de alfalfa, maíz, hortalizas y algodón (Coronel de Renolfi y Ortuño 2004; Angella 2016), siendo este último cultivo el de mayor importancia. En la campaña 2016-2017 fueron sembradas en la provincia 115.300 ha con algodón, de las cuales 42.820 ha lo hicieron en los departamentos que conforman el ARD (Ministerio de Modernización, Presidencia de la Nación 2018). La zona cuenta con mano de obra capacitada, industria asociada al cultivo de algodón y un parque de maquinaria agrícola específico para su desarrollo (Angella 2016). Sin embargo, las prácticas agrícolas implementadas son poco sustentables, poniendo en riesgo la productividad de los suelos (Oneto et al. 2005a; Galizzi et al. 2015).

Las tierras del sector semiárido santiagueño y entre ellos el ARD, son muy susceptibles a sufrir procesos de degradación. Entre los factores edáficos que contribuyen al riesgo de degradación física de los suelos de esta área, se encuentra el alto porcentaje de limo presente en el horizonte superficial (Moscuza et al. 2003; Lorenz 2005; Oneto et al. 2005a; Galizzi et al. 2015). Dicha fracción mineral, le otorga a los agregados una baja estabilidad estructural, debido a su reducida capacidad de intercambio catiónica (CIC), baja superficie específica, nula plasticidad y una reducida afinidad por otros tamaños de partícula (Taboada y Álvarez 2008). En este sentido, Lorenz (1995) al describir un suelo característico de esta área, menciona que por la escasez de agentes que favorecen la agregación (arcilla y humus) y la presencia de una textura predominantemente limosa, la estabilidad estructural es baja, lo que resulta en una alta susceptibilidad de estos suelos a los procesos erosivos. Por su parte, la condición semiárida del régimen climático, determina que la producción de biomasa y por ello la incorporación de materia orgánica en el suelo es muy escasa, lo que se demuestra por el color relativamente claro del horizonte superficial de los suelos presentes en el área (Lorenz 1995). En este tipo de suelos, el contenido de materia orgánica cumple una función importante, ya que entre otras cosas favorece el grado de adherencia entre las partículas primarias, lo que determina a su vez el grado de estabilidad de los agregados (Blanco-Canqui y Lal 2004; Novelli 2013).

Distintos autores (Ramsperguer 1992, Roldán et al. 2000; Galizzi et al. 2012) observaron en suelos de la provincia de Santiago del Estero, que al pasar del monte a la producción agropecuaria se generaba una disminución en la estabilidad estructural y en

el carbono orgánico del suelo (COS), también llamado carbono organico total (COT). Gran parte de este cambio en la calidad edáfica superficial, es el resultado de alteraciones morfológicas, físicas y bioquímicas producidas por la labranza (Ramsperguer 1992) y por la acelerada actividad microbiana generada por las altas temperaturas (Álvarez y Álvarez 2000; Conant et al. 2000). Nazar (2018) observó en la región semiárida de Santiago del Estero luego de 30 años de labranza convencional, una reducción de aproximadamente el 65% en el COS a la profundidad de 0 a 10 cm. De esta manera, el COS cae abruptamente cuando un suelo no disturbado pasa a ser laboreado, quedando esta propiedad estabilizada a un valor mucho más bajo que el originario. Bowman et al. (1990) (citado por Casanobas et al. 1995), especificaron para suelos franco arcillosos, que esta pérdida es muy elevada durante los primeros años de agricultura convencional. Por su parte, Quiroga et al. (2001) determinaron en los primeros 3 años de cultivo, que la pérdida del carbono lábil podía llegar al 80%, debido a la descomposición de residuos orgánicos frescos, como consecuencia de la mayor aireación del suelo generada por la labranza (Banegas et al. 2007).

El ARD tiene la particularidad de que el riego es aplicado por manto, lo que afecta negativamente la estructura del suelo debido al estallido de los agregados por un ingreso rápido del agua en ellos. También produce compactación y densificación, debido a la presión ejercida por las sucesivas laminas de riego aplicadas sobre la superficie del suelo (Gibbs y Reid 1988 y Galizzi et al. 2014). Oneto et al. (2005 a) y Oneto et al. (2005 b) concluyeron para suelos de la ARD bajo labranza convencional y reducida, que el riego por manto es un factor que favorece la densificación del suelo, reduciendo como consecuencia su tasa de infiltración.

Con la intención de mitigar el proceso de degradación de las tierras, en el ARD se incentivó la incorporación de la siembra directa (SD) como sistema de implantación de cultivos (Galizzi et al. 2014). Este sistema de labranza junto a la alternancia de los cultivos, son dos herramientas de manejo del suelo que pueden contribuir a hacer más sustentables los sistemas productivos (Álvarez 2006; Sanzano et al. 2012; Galizzi et al. 2014). La SD modifica distintos parámetros edáficos físicos como la densidad aparente, la estabilidad estructural, la infiltración, la conductividad hidráulica saturada, la retención hídrica y la resistencia mecánica a la penetración, propiedades que pueden ser utilizadas como indicadores de procesos físicos de degradación del suelo. Estos parámetros a su vez, están íntimamente influenciados por el COS (Quiroga et al. 2001; Díaz-Zorita et al. 2004; Barraco et al. 2004; Taboada y Álvarez 2008).

La SD ha demostrado generar beneficios en algunas propiedades edáficas. Álvarez y Steinbach (2009) mostraron a partir de una revisión de estudios realizados en la Región Pampeana, que la SD genera incrementos en la estabilidad estructural, siendo esta en promedio un 70% mayor respecto a la de los suelos labrados, haciéndose más evidente este contraste de resultados cuando la condición estructural del suelo es pobre. De la misma manera, dichos autores señalaron bajo SD incrementos en la tasa de infiltración, lo mismo que este sistema de implantación de cultivos generaría un incremento promedio en el carbono orgánico de aproximadamente $4,35 \text{ Tn ha}^{-1}$ en los primeros 20 cm de profundidad, siendo este mayor luego de transcurridos entre 4 y 9 años desde la incorporación de la SD (Steinbach y Álvarez 2005). Novelli (2013) determinó que el COS es un agente de agregación importante en Molisoles hasta llegar a los $30 \text{ g de COS kg}^{-1}$ de suelo, sin incrementos apreciables en la estabilidad de los agregados a partir de valores mayores al mencionado. Por su parte, Nazar (2018) trabajando en un lote degradado del ARD con historia previa bajo labranza convencional, observó luego de cuatro años de SD, una reducción significativa en los valores de densidad aparente en la profundidad de 10 a 20 cm, una mejora del 1,2 % en el COS de los primeros 10 cm y una mayor estabilidad de agregados entre los 0 y 15 cm de profundidad.

Sin embargo, es abundante la bibliografía donde se menciona que la implementación de la SD genera un proceso de compactación de los suelos (Álvarez et al. 2012). Sasal (2012) reportó que el cambio de un sistema agrícola labrado a otro bajo SD, incrementa la cohesión del suelo por el mayor contacto partícula a partícula y por su cementación. También se afirmó que la reversión de este proceso de densificación, puede lograrse a partir del incremento de la porosidad generada por el aumento en la actividad biológica de raíces y fauna edáfica y por las fisuras producidas por el congelamiento-descongelamiento y/o por el humedecimiento-secado del suelo (Voorhees 1983; Samouelian et al. 2003). Por lo tanto, los suelos que no presentan arcillas expansibles y que como consecuencia tienen bajo potencial para formar fisuras y reestructurarse, serían menos adecuados para la implementación de la SD (Stengel et al. 1984; Stengel y Bourlet 1987).

Álvarez y Steinbach (2009) reportaron para la Pradera Pampeana, que la compactación en SD se da fundamentalmente en suelos con una densidad aparente inicial menor a $1,3 \text{ g cm}^{-3}$, sin haber efectos sobre dicha propiedad cuando los valores de inicio superan dicho umbral. Estos autores mencionaron a partir de un análisis de estudios

previos, un incremento promedio del 4% en la densificación del suelo como consecuencia de la SD, no teniendo relación con el tiempo transcurrido desde el inicio del experimento, el tipo de suelo o la rotación de cultivos. Este proceso es generado en gran parte por el tránsito de la maquinaria en el lote y por la falta de remoción del suelo (Botta et al. 2002). Wilson et al. (2006) al contrastar el valor de la densidad aparente de un suelo de monte respecto al mismo en agricultura bajo SD, encontraron en esta última situación una densificación y reducción del espacio poroso en profundidad. No obstante, estos autores no encontraron diferencias entre ambos usos de la tierra al evaluar la resistencia mecánica a la penetración en la capa de 0 a 5 cm. Contrariamente, Álvarez y Steinbach (2009) mencionaron que si bien la bibliografía puede ser contradictoria respecto al efecto de la SD sobre la densidad aparente, los resultados de resistencia a la penetración son más consistentes, mostrando esta propiedad un aumento generalizado en el estrato superficial de los suelos bajo SD.

La compactación del suelo puede tener un efecto importante en el desarrollo y rendimiento del cultivo de algodón, provocando una reducción en la longitud de las raíces de hasta un 40 %, una disminución en el índice de área foliar del 26 % y mermas de hasta un 28 % en el rendimiento de semilla (Coelho et al. 2000). Estos resultados son como consecuencia de un menor ingreso de agua en el perfil y de una disminución en la capacidad de exploración radicular por parte del cultivo de algodón, lo que podría ser mitigado mediante la incorporación de otros cultivos en la rotación con mayor capacidad en sus raíces para atravesar capas compactadas (Coelho et al. 2000).

Las mejoras generadas por la SD en algunos parámetros físicos del suelo, pueden ser incrementadas a partir de la implementación de una alternancia de cultivos adecuada. En este sentido, la distinta relación carbono/nitrógeno de los residuos de cosecha, puede incidir sobre la agregación del suelo. Una baja relación entre estos elementos favorece una rápida descomposición de los rastrojos, lo que facilita temporariamente la formación de agregados (Blanco-Canqui y Lal 2004). Por otro lado, los residuos que se descomponen más lentamente, presentan un gradual pero persistente efecto sobre la estructura (Blanco-Canqui y Lal 2004). Los residuos de cosecha de maíz son ricos en fenoles que incrementan la agregación, mientras que con los de soja sucede lo contrario dado su menor volumen y su baja concentración de fenoles (Bronick y Lal 2005). A su vez, el patrón de crecimiento, fisiología y funcionamiento de las raíces de las distintas especies vegetales, pueden modificar la estructura edáfica de manera diferente (Amezketta 1999). Generalmente, las raíces fibrosas y extensas producen un mayor nivel

de macroagregados. Por su parte, las raíces de las leguminosas están asociadas a una mayor biomasa microbiana, incrementando como consecuencia la estabilidad estructural, mientras que en aquellas especies que no son leguminosas, esta propiedad está más favorecida por la masa total de raíces (Bronick y Lal 2005).

Los cultivos de cobertura (cc), son especies vegetales de las cuales no se obtiene una cosecha de su grano o forraje, quedando dichos cultivos en el suelo para lograr mejoras en su fertilidad física y química, controlar malezas y plagas, e incrementar la biodiversidad en sistemas de producción agroecológicos (Lu et al, 2000). Estos logran una mayor intensificación agrícola, pudiendo reduciendo los efectos negativos del tránsito sobre el suelo cuando se trabaja en siembra directa (Kraemer 2015). Castiglioni y Kraemer (2019) comprobaron luego del secado de distintos cultivos de cobertura, el efecto favorable a corto plazo sobre la estabilidad de agregados generado por las raíces de las distintas especies utilizadas, como también el obtenido a un plazo un poco mayor, resultante de la descomposición lenta del material vegetal aéreo. Sin embargo, Restovich et al. (2011) al evaluar el efecto de distintos cultivos de cobertura en un Argiudol de Pergamino, encontraron que solo la avena mejoró la estabilidad de agregados, efecto que no persistió a la cosecha del cultivo de verano. Chagas et al. (1995) pudieron determinar en el largo plazo efectos negativos del monocultivo de soja sobre la estabilidad de la estructura superficial de un Argiudol típico con alto contenido de limo, respecto a lo sucedido en un monocultivo de maíz. A su vez y de acuerdo a lo comprobado por diferentes investigadores (Novelli 2013; Kraemer 2015), una mayor intensificación en la secuencia de cultivos produce mejoras en la estabilidad de los agregados.

Distintos autores (Abril et al. 2005; Nazar 2018) observaron en ambientes semiáridos de Argentina, que es posible lograr mejoras en la calidad de los suelos degradados, con la introducción de determinadas prácticas, como la utilización de cultivos de cobertura y la intercalación de pasturas dentro del ciclo agrícola. Rojas et al. (2015) concluyeron que las sucesiones de cultivo con mayor aporte de cobertura, superior presencia de gramíneas y más frecuencia de cultivos por año, generaban mayor contenido de carbono orgánico particulado (COP) en los primeros 10 cm de profundidad, respecto al monocultivo de algodón. Por el contrario, otros investigadores (Galizzi et al. 2012; Tissera 2016; Nazar 2018) trabajando con la misma serie de suelos bajo SD, no encontraron diferencias significativas en el contenido de COS entre sucesiones de cultivo que incluían al algodón como monocultivo y otras en las que esta especie era intercalada con otros cultivos. Por su parte, Tejedor et al. (2015) al evaluar en el ARD distintas

secuencias de cultivo que contemplaban al maíz, algodón y alfalfa bajo SD, tampoco encontraron entre los diferentes tratamientos diferencias en el contenido de COS de los primeros 20 cm de suelo.

La estabilidad de la estructura y el carbono del suelo son propiedades edáficas muy dinámicas, siendo estas muy sensibles a los cambios en el uso de la tierra (Blanco-Canqui y Lal 2004). Los procedimientos para determinar la estabilidad de agregados son variados, difiriendo principalmente en la energía que cada uno de ellos aplica al suelo (generalmente agregados) (Amezketta 1999). En este sentido, Castiglioni y Kraemer (2019) como también Gabioud et al. (2011) probaron que el método aportado por Le Bissonnais (1996), es más consistente que otros para determinar las modificaciones estructurales producidas por cambios en el uso de la tierra. Kraemer (2015) encontró que la estabilidad estructural determinada por el método de Le Bissonnais (1996), fue uno de los parámetros más sensibles para discriminar el efecto de secuencias de cultivos agrícolas diversificadas, respecto al generado por otras menos balanceadas en cuanto a gramíneas y leguminosas. Novelli (2013) encontró para un Molisol de la región Pampeana, diferencias en esta propiedad determinada por el método de Le Bissonnais (1996), al comparar distintos manejos agrícolas. Por otro lado, trabajos recientes realizados sobre un Argiudol ubicado en San Antonio de Areco (Buenos Aires), han evidenciado una respuesta adecuada de esta metodología en separar el efecto de distintos cultivos de cobertura sobre la estabilidad estructural en sólo un ciclo de cultivo (Castiglioni et al. 2016).

El COS participa activamente en la formación de la estructura del suelo (Haynes y Swift 1990; Vázquez et al. 1990; De Nobili y Maggioni 1993), modificando a su vez la distribución del espacio poroso, la actividad de los microorganismos (Van Veen y Kuikman, 1990), la resistencia del suelo a la compactación (Soane 1990; Quiroga et al. 1999), la susceptibilidad a la erosión eólica o hídrica (Cannell y Hawes, 1994), la estabilidad de los macroagregados (Chan 1997; Ciarlo et al. 2004), así como la dinámica hídrica y la retención del agua (Galantini 2008). Todas estas propiedades definen la calidad y el nivel de productividad del suelo (Gasparoni 2008), siendo por lo tanto el COS, un elemento clave para el funcionamiento de los sistemas naturales y cultivados (Galantini 2008).

El comportamiento del COS es extremadamente heterogéneo, debido a que su composición abarca tanto azúcares muy simples y por lo tanto muy fácilmente mineralizables, como productos recalcitrantes producto de las transformaciones

microbianas (Irizar 2010). Los procesos degradatorios de esta propiedad son favorecidos con las altas temperaturas, las que promueven la actividad microbiana (Stevenson 1986). Algunos estudios indican que la temperatura influye en la descomposición del COS sólo cuando el suelo presenta una adecuada condición de humedad (Álvarez y Álvarez 2000; Conant et al. 2000), mientras que otros advierten que en la zona semiárida existe una compleja interrelación clima-suelo-planta, la que actúa en los procesos de transformación del COS en forma más importante que el factor temperatura (Apezteguía y Sereno 2002). Por su parte, Hevia et al. (2003) publicaron que, si bien existe una asociación entre el COS y el contenido de arcilla del suelo, esta relación no se verifica en aquellos ambientes donde la temperatura media anual supera los 17 °C.

La dinámica del COS se ha utilizado para evaluar los efectos de las prácticas agronómicas sobre la calidad del suelo en el largo plazo, dado que las fracciones orgánicas más abundantes son de reciclado lento, las cuales se encuentran significativamente asociadas con la fracción fina del suelo (Buschiazzi et al. 1991; Quiroga et al. 1996; Galantini et al. 2004). Es por ello que en general se necesita gran cantidad de años para observar diferencias en esta propiedad a partir de distintos usos de la tierra (Tan et al. 2007). Debido a ello, se recomienda que la investigación se centre en cuantificar a aquellas fracciones lábiles del carbono (Christensen 2001) que guarden relación con la productividad del suelo y que respondan rápidamente a los cambios en el uso de la tierra (Irizar 2010). Dentro de las fracciones lábiles del COS se encuentra el carbono orgánico particulado (COP), que está compuesto por restos de plantas recientemente incorporados y desechos de la fauna edáfica y microbianos, con un tiempo de reciclado menor a una década (Trumbore 1993; Buyanovsky et al. 1994). En suelos cultivados, el COP puede representar menos del 10% del COS del estrato superficial (Christensen 2001). El COP tiene un reciclado más rápido que el COS (Desjardins et al. 2006), siendo muy sensible a descomponerse cuando los sistemas son disturbados (Galantini y Suñer 2008), motivo por el cual se lo utiliza como un indicador temprano y de corto plazo de los efectos de las prácticas agronómicas sobre la calidad del suelo (Haynes 2000; Six et al. 2002a; Six et al. 2002b) y del reciclado de nutrientes (Galantini y Suñer 2008).

Las distintas especies vegetales interactúan con el suelo estableciendo una dinámica particular del COS, generando diferencias en la cantidad, naturaleza y periodicidad de los residuos aportados y creando ambientes rizosféricos específicos que condicionan la actividad microbiológica (Vázquez 2008). En este sentido, Silberman et

al. (2015) encontraron que los residuos de distintas especies vegetales, contribuían de manera diferencial a las diferentes fracciones de la materia orgánica del suelo, lo que implica que los cambios edáficos por el uso de la tierra no sólo surgen ante modificaciones del sistema de labranza aplicado, sino que la secuencia de cultivos y sus rendimientos también pueden incidir en el comportamiento del COS (Díaz-Zorita et al. 2004). En este sentido, la composición química de los rastrojos remanentes de cada cultivo interviniente dentro de una secuencia, y la proporción en que estos rastrojos contribuyen al carbono del suelo, son factores de mucho peso (Sánchez y Arrigo 2006). Álvarez (2007) estimó para la Pampa Ondulada los aportes de carbono al suelo por tn de MS producida por distintos cultivos, determinando que el cultivo de soja contribuye un 8 % menos que el trigo y un 57 % menos que el maíz. Gramajo (2012) indicó para el ARD, que el aporte de carbono al suelo por cada tn de MS de soja, es un 26 % menor que el del algodón. A su vez, el patrón de crecimiento, fisiología y funcionamiento de las raíces de las distintas especies vegetales, pueden modificar la estructura y porosidad edáfica de manera diferente (Amézketa 1999). Generalmente, las raíces fibrosas y extensas de las gramíneas producen un mayor nivel de macroagregados, mientras que las raíces de leguminosas están asociadas a una mayor biomasa microbiana (Bronick y Lal 2005). Es así como las distintas especies vegetales o sucesiones de cultivos generan modificaciones en la curva de retención hídrica, la tasa de infiltración superficial y el flujo de agua en profundidad (Dexter et al. 2001; Sasal et al. 2006).

El índice de intensificación de la secuencia agrícola (ISI) (Sasal et al. 2010), ha demostrado ser un parámetro que vincula significativamente el efecto de la alternancia de cultivos con el comportamiento de algunas propiedades edáficas. En este sentido, Echeverría et al. (2012) encontraron una relación positiva entre el índice de estabilidad estructural de un suelo de la Pcia. de Bs. As. con un parámetro similar al ISI. Por otro lado, Sasal (2012) encontró que la presencia de estructura laminar estaba inversamente vinculada con valores altos de ISI, y directamente relacionada con altos niveles de limo de los suelos. Castiglioni et al. (2013) encontraron una relación positiva entre este índice y el carbono orgánico, estabilidad estructural y la macroporosidad. La cantidad, calidad de los rastrojos aportados y características de los cultivos como el tipo y distribución de su sistema radical son en gran parte sintetizados por el ISI (Sasal et al. 2006), haciéndolo un indicador interesante a tener en cuenta cuando se combinan cultivos bajo un mismo sistema de labranza.

La implementación en el ARD de la siembra directa, combinada con sucesiones de cultivos entre los cuales el algodón es una producción de interés económico, genera incertidumbre sobre sus efectos en las propiedades edáficas. Esto se debe a que como se dijo previamente, las mencionadas prácticas se realizan sobre suelos con elevada fragilidad a la degradación física, debido a su alto porcentaje de limo y bajo a moderado contenido de carbono orgánico, presentando a su vez los suelos una historia de más de 10 años de agricultura continua en labranza convencional. El clima semiárido de esta región genera una menor producción de materia seca, sus altas temperaturas favorecen una rápida descomposición de los rastrojos al acelerar las reacciones biológicas, provocando también una mayor tasa de descomposición del carbono edáfico. A esta problemática se le debe agregar que el riego se realiza por inundación, pudiendo todos estos factores incrementar los procesos de deterioro físico de los suelos (Galizzi et al. 2014).

Es por ello que en la EEA INTA Santiago del Estero, se implementó un ensayo con distintas sucesiones de cultivos y monocultivo de algodón, dispuesto en un lote con más de 20 años de uso agrícola, con la finalidad de estudiar la evolución de algunas propiedades edáficas en diferentes lapsos de tiempo. Los cultivos utilizados en el mismo son algodón (*Gossypium hirsutum*), maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*) y soja (*Glycine max*), en diferentes combinaciones de rotación bajo SD y riego por inundación.

1.1.2 Objetivos

1. Analizar la respuesta de diferentes propiedades físicas y químicas de un Haplustol torriorténtico degradado de la Región Semiárida de Santiago del Estero, al tercer y cuarto año de iniciado un ensayo con diferentes sucesiones de cultivo y monocultivo de algodón bajo siembra directa y riego por manto.
2. Comparar la respuesta de distintas propiedades edáficas de un Haplustol torriorténtico de la región semiárida de Santiago del Estero, al cuarto año de haber iniciado dos sistemas de producción contrastantes bajo riego: alfalfa para corte y agricultura bajo siembra directa, confrontando a su vez con los resultados obtenidos de una situación *cuasi-prístina*.

1.2 Materiales y métodos

1.2.1 Ubicación del área de estudio

El ensayo se emplazó en el campo Experimental “Ing. Agr. Francisco Cantos” de la Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, correspondiente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (La Abrita, departamento Silípica), situado en la zona IV del área de riego del proyecto Río Dulce (Latitud sur 28° 01’ y Longitud oeste 64° 17’) (Figura 1.2).

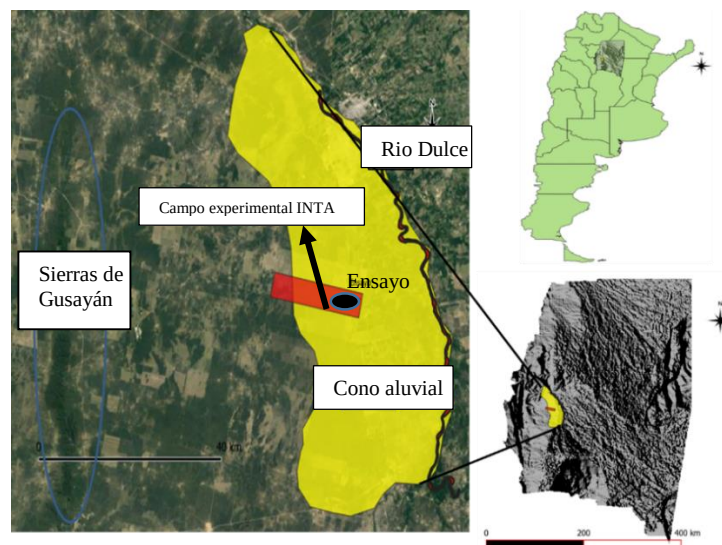


Figura 1.2. Ubicación geográfica del área de estudio

Esta zona se encuentra geomorfológicamente en una planicie de transición desde la planicie pedemontana de las Sierras de Gusayán a la llanura aluvial del Río Dulce, con una altura promedio de 190 msnm (Lorenz 1995). Tiene un suave gradiente topográfico, con relieve monótono que solo es alterado por inflexiones de la pendiente regional en dirección NS. Esta pendiente influye en el escurrimiento superficial, originando mesodepresiones generalmente cubiertas de pastizal (Sayago 1977).

1.2.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite y Mather, el clima corresponde al tipo DB'4da' (semiárido, con nulo o pequeño exceso de agua, mesotermal), caracterizado por periodos secos y lluvias de gran intensidad distribuidas en forma irregular, muy variables e inciertas. La temperatura media anual es de 21 °C, con máximas absolutas que llegan a

los 45 °C y mínimas a los -6 °C. La precipitación anual es de 550 mm promedio, concentrada en la estación cálida. Se destaca la alta evaporación, con un promedio de 1054 mm anuales, superando en todos los meses a la precipitación, generando un balance hídrico negativo todo el año (Boletta et al. 1989).

En la Figura 1.3 se muestran los valores de temperatura media mensual y precipitaciones mensuales, registrados en el Campo Experimental Ing. Agr. Francisco Cantos para el período comprendido entre noviembre de 2015 y noviembre de 2017. En la misma también se detallan los valores históricos de ambos parámetros.

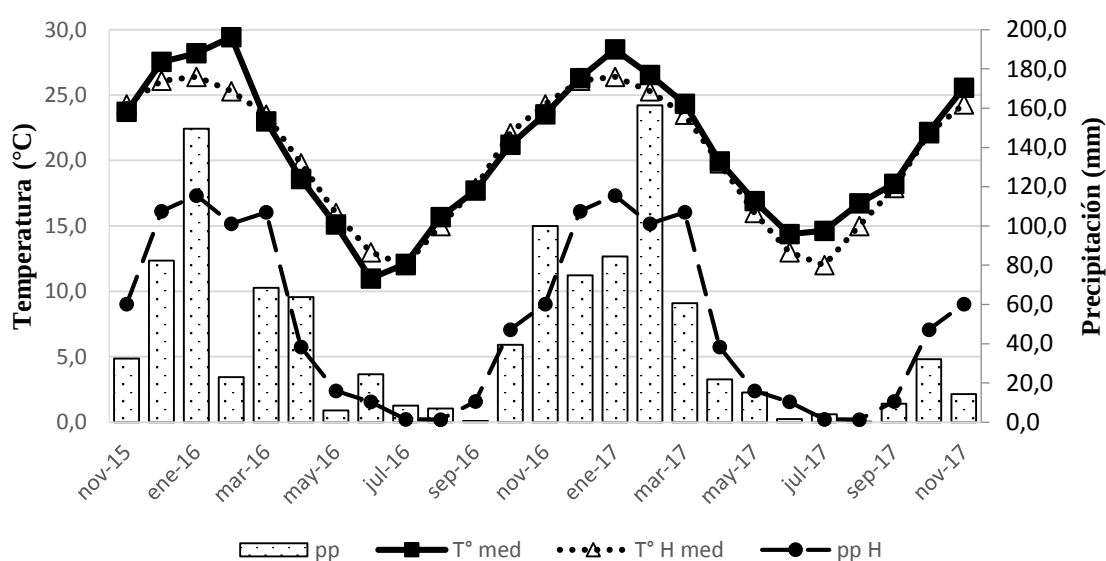


Figura 1.3. Temperatura media mensual y precipitación mensual para el período comprendido entre noviembre de 2015 a noviembre de 2017, junto con la temperatura media mensual y precipitación mensual histórica (registros de la estación agrometeorológica automática del INTA Santiago del Estero). Temperatura media mensual desde noviembre de 2015 a noviembre de 2017 (T° med); temperatura media mensual histórica (T° H med); precipitación mensual histórica (pp H); precipitación mensual desde noviembre de 2015 a noviembre de 2017 (pp).

De su análisis se desprende que la tendencia general de las precipitaciones durante el período estudiado fue similar al histórico. Sin embargo, desde noviembre de 2015 a junio de 2016 (período que abarca el desarrollo de los cultivos de verano), las lluvias registradas fueron 105,8 mm menores a las históricas. Se observó que entre julio de 2016 y noviembre de 2016, las precipitaciones registradas estuvieron 4,8 mm por debajo de las históricas, repitiéndose este comportamiento al año siguiente. No obstante, la precipitación acumulada entre noviembre de 2015 y octubre de 2016 fue de 505,9 mm, un 11,9 % menor a la acumulada en el mismo periodo correspondiente a los años 2016-2017.

Las temperaturas medias para los períodos noviembre 2015 - junio 2016 y julio 2016 – noviembre 2016 fueron 22,1 y 18,0 °C, respectivamente. Por su parte, para los períodos noviembre 2016 - junio 2017 y julio 2017 – noviembre 2017 fueron 22,6 y 19,5 °C, respectivamente. Por otro lado, la temperatura histórica de los períodos noviembre-junio y julio-noviembre son de 21,8 y 18,3 °C respectivamente, mostrándose así que las temperaturas fueron levemente más bajas en los dos primeros periodos evaluados y mayores a la histórica en el tercer y cuarto periodo evaluado (Figura 1.3).

En la Figura 1.4 se observa que la temperatura del suelo a la profundidad de 0 a 5 cm fue mayor que la registrada en el estrato de 5 a 20 cm durante los meses de agosto hasta febrero del intervalo de tiempo evaluado. Luego de este período, la temperatura de la superficie se asemejó a la temperatura media registrada entre los 5 y 20 cm. Por otro lado, se comprobó que las temperaturas medias mensuales registradas en el suelo fueron superiores a las temperaturas medias mensuales registradas en el aire durante todo el año.

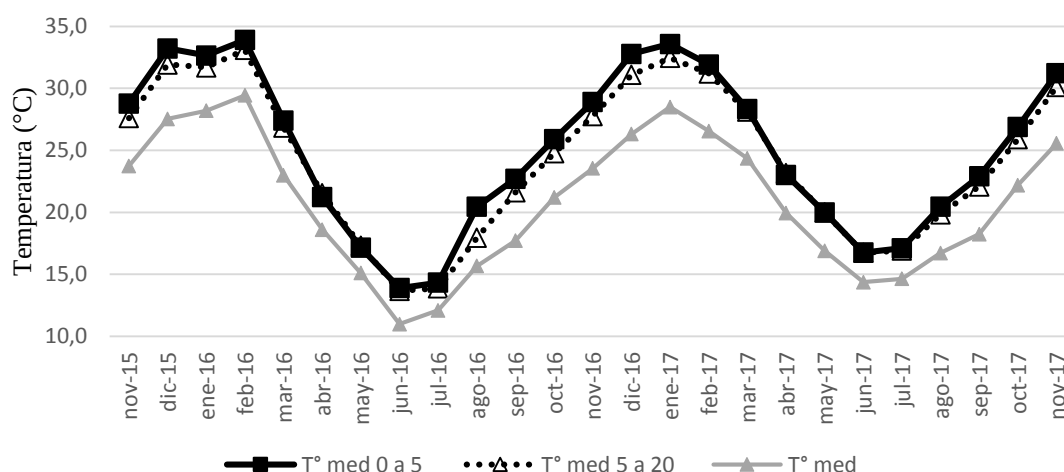


Figura 1.4. Temperatura media mensual del suelo de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm para el período noviembre de 2015 - noviembre de 2017. Temperatura media mensual (T° med); Temperatura media mensual de suelo en la profundidad de 0 a 5 cm, expresada en °C (T° med 0 a 5); Temperatura media mensual de suelo en la profundidad de 5 a 20 cm, expresada en °C (T° med 5 a 20). (Registros de estación agrometeorológica automática del INTA Santiago del Estero).

1.2.3 Suelo

El suelo está clasificado como un Haplustol torriorténtico, Serie La María (Angueira y Zamora 2007). El mismo es franco-grueso, mixto, hipertérmico, de escaso desarrollo, presentando la siguiente secuencia de horizontes: A1p (0-20 cm) - AC (20 – 52 cm) - C1k (52 – 87 cm) – C2k (+ 87 cm). El material originario es loess, con una

composición mineralógica de feldespatos, cuarzo, micas y cenizas volcánicas y un contenido de carbonatos de alrededor del 2 % (Lorenz 2005). El horizonte superficial tiene una textura franco limosa (9 % arcilla y 57% de limo) (Galizzi et al. 2015). Los datos analíticos detallados en la Tabla 1.1 corresponden a un perfil típico de este suelo (Sánchez y Arrigo 2006).

Tabla 1.1: Datos analíticos correspondientes a la Serie La María.

Horizonte	A	AC	C1	C2
Prof. (cm)	0 a 20	20 a 52	52 a 87	+ 87
Arena (%)	24	28	31	34
Limo (%)	64	62	58	60
Arcilla (%)	12	10	11	6
Textura (%)	Franco-limosa	Franco-limosa	Franco-limosa	Franco-limoso
Ph (pasta)	6,3	7,2	7,8	7,9
CE(dSm ⁻¹)	0,5	0,2	0,9	3,5
CaCo3 (%)	0,0	0,0	0,9	1,8
C total (g kg ⁻¹)	13,9	7,0	3,1	6,1
MO (g kg ⁻¹)	23,9	11,4	5,3	11,6
N total (%)	0,13	0,11	0,09	0,09
C/N	10	6	4	7
P(mg kg ⁻¹)	14	15	12	12
Na (cmol _c kg ⁻¹)	0,4	0,4	1,1	1,6
K (cmol _c kg ⁻¹)	2,10	1,18	1,50	1,80
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	13,2	11,4	11,1	n.d.
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	2,4	3,0	3,2	n.d.
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	16,8	14,8	12,0	12,9
PSI (%)	2,4	2,7	9,2	12,4
CI sol.(meq/l)	< 5	< 5	< 5	< 20
CI sol. (ppm)	< 20	< 20	< 20	< 20

Potencial hidrógeno determinado en extracto de la pasta saturada (pH); conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE); carbonato de calcio (CaCO3); carbono total (C total); materia orgánica (M O); capacidad de intercambio catiónico (CIC); porcentaje de sodio intercambiable (PSI); cloruro como sal soluble en extracto de saturación (Cl. Sol.); nitrógeno total (N total); relación carbono total /nitrógeno total (C/N); fósforo extractable por Bray y Kurtz (P); sodio intercambiable (Na); potasio intercambiable (K); calcio intercambiable (Ca), magnesio intercambiable (Mg).

En la Tabla 1.2 se describen las características de un suelo ubicado dentro del sector agrícola de la EEA Santiago del Estero (Duffau et al. 2013), dispuesto a escasos metros del lugar del ensayo de rotaciones (28° 05' Latitud Sur, 64° 05' Longitud Oeste).

Tabla 1.2 Descripción del perfil correspondiente al suelo agrícola.

Horizonte	Prof. (cm)	Descripción
A _{1p}	0 a 8	Pardo rosado oscuro 7,5YR 3/2 (húmedo), rosado 7,5YR 7/4 (seco); franco limoso; bloques subangulares medios a finos débiles; consistencia en seco blando; no adhesivo y no plástico; abundantes raíces; seco; no reacciona al HCl; límite suave y claro.
A _{2p}	8 a 18	Pardo rosado oscuro 7,5YR 3/2 (húmedo), gris rosado 7,5YR 7/2 (seco); franco a franco limoso; bloques subangulares medios a grandes débiles; fuerte resistencia a la penetración (piso de arado); abundantes raíces; consistencia en seco blando; no adhesivo y no plástico; no reacciona al HCl; fresco; límite suave y claro.
AC ₁	18 a 31	Pardo rosado oscuro 7,5YR 3/2 (húmedo), gris rosado 7,5YR 7/2 (seco); franco a franco limoso; estructura masiva (coherente); muy escasas raíces; consistencia (fresco) ligeramente duro; no adhesivo y no plástico; escasas concreciones calcáreas; reacción al HCl (+), mayor por sectores y en toda la masa; fresco; límite suave y gradual.
AC ₂	31 a 43	Gris rosado oscuro 7,5YR 4/2 (húmedo), blanco rosado 7,5YR 8/2 (seco); franco a franco arenoso; estructura masiva (coherente); no hay raíces; consistencia (húmedo) friable; no adhesivo y no plástico; reacción al HCl (+); escasos durinódulos; húmedo; límite suave y gradual
C _{1K}	43 a 90	Gris rosado oscuro 7,5YR 4/2 (húmedo), blanco rosado 7,5YR 8/2 (seco); franco a franco limoso; masivo y muy coherente; durinódulos angulares grandes, consistencia (húmedo) friable; frecuentes concreciones de carbonato de calcio nítidas y definidas; reacción al HCl (++); frecuentes durinódulos; húmedo; límite gradual y suave.
C _{2K}	> 90	Pardo rojizo oscuro 7,5YR 3/4 (en húmedo), gris rosado 7,5YR 8/2 (en seco); franco limoso; masivo y muy coherente; abundantes durinódulos angulares grandes, friable (húmedo); frecuentes nódulos rojos y negros; concreciones calcáreas en disposición horizontal ; reacción al HCl en la toda masa del horizonte y concentrada por sectores

1.2.4 Vegetación natural

La vegetación natural en la zona de estudio es la típica que presenta el Parque Chaqueño seco, compuesto por 3 – 4 estratos de especies. El primer estrato está dominado por los quebrachos blanco y colorado (*Aspidosperma quebracho-blanco* y *Schinopsis quebracho colorado*, respectivamente) y el algarrobo blanco (*Prosopis alba*). Un segundo estrato compuesto por especies arbóreas de menor porte como el mistol (*Ziziphus mistol*), tala (*Celtis tala*), chañar (*Geoffroea decorticans*) entre otros y un tercer estrato de especies herbáceas latifoliadas y gramíneas. En ciertos casos puede no estar presente el estrato arbóreo dominante, reemplazándolo especies arbóreas de menor tamaño y arbustivas, en cuyo caso se lo denomina monte degradado (fachinal) (Duffau et al. 2013).

1.2.5 Ubicación y características del ensayo

El campo experimental “Ing. Agr. Francisco Cantos” perteneciente a la Estación Experimental Agropecuaria (E.E.A.) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en la provincia de Santiago del Estero, tiene una extensión de 7000 ha, de las cuales actualmente sólo 350 ha poseen riego. Los primeros lotes para agricultura fueron habilitados en 1982, mediante sucesivas quemas del monte nativo y posterior eliminación mecánica de las leñosas. Dichos lotes fueron destinados a producción e investigación sobre las características edáficas y productivas del área de riego del Río Dulce.

El ensayo de rotaciones en el cultivo de algodón se lleva a cabo en el Lote “1” del campo experimental, siendo las coordenadas 28°01'31" Latitud Sur y 64°14'04" Longitud Oeste. Desde su habilitación en el año 1982, este lote fue sometido a riego por inundación. Hasta 1991 se realizaron cultivos hortícolas como cebolla, sandía, melón y zapallo. Entre 1992 y 2010 el sistema de producción se basó en el cultivo de algodón alternado con gramíneas bajo labranza convencional. En el año 1998 se realizó la nivelación del terreno y se continuó produciendo monocultivo de algodón con sistema de labranza convencional. A partir de 2010 se incorporó el sistema de implantación de cultivos siembra directa, con soja en la campaña 2011, maíz en la de 2012 y algodón en la de 2013. En la campaña 2013/2014, con más de 30 años de agricultura en el lote y con la finalidad de estudiar la evolución de algunas propiedades edáficas en diferentes lapsos de tiempo, se inició el ensayo con distinta sucesión de cultivos.

El diseño experimental del mismo es en bloques completos al azar, con cinco bloques y cinco tratamientos que consisten en diferentes secuencias de cultivos, presentándose estas en la Tabla 1.3. El tamaño de cada parcela donde está instalado cada tratamiento es de 25 m x 20 m (500 m²). Los tratamientos no se fertilizan y la implantación de los cultivos se realiza bajo siembra directa, el control de plagas y malezas es químico.

Tabla 1.3 Secuencias de cultivos correspondientes a los distintos tratamientos del ensayo.

	2013 - 14	2014 - 15	2015 - 16	2016 - 17	2017 - 18	2018 - 19	2019 - 20	2020 - 21
Tratamientos	1 Año	2 Año	3 Año	4 Año	5 Año	6 Año	7 Año	8 Año
T1	alg.	alg.	alg.	alg.	alg.	alg.	alg.	alg.
T2	mz.	alg.	alg.	sj.	alg.	alg.	mz.	alg.
T3	mz.	sj.	alg.	alg.	mz.	sj.	alg.	alg.
T4	mz.	alg.	alg.	mz.	alg.	alg.	mz.	alg.
T5	tr.-mz.	tr.-alg.	tr.-alg.	tr.-Sj.	tr.-alg.	tr.-alg.	tr.-Mz.	tr.-alg.

alg: Algodón; sj: Soja; mz: Maíz; tr: Trigo

1.2.5.1 Riegos

Los riegos estivales fueron similares para todos los tratamientos. Estos se realizaron a tiempo fijo y contemplando solo los períodos críticos del cultivo de algodón. En cada riego se aplicó una lámina de agua de 90 mm:

- Riego 1: realizado 7 días antes de la fecha de siembra del cultivo de algodón.
- Riego 2: 40 días después del “Riego 1”
- Riego 3: 70 días después del “Riego 1”
- Riego 4: 90 días después del “Riego 1”

Los riegos invernales se aplicaron a todos los tratamientos por igual, contemplando una lámina de 90 mm y de acuerdo a la disponibilidad de agua en el sistema de riego de la zona. Dichos riegos fueron:

- Riego 5: en el mes de junio
- Riego 6: en el mes de julio

En base al criterio de clasificación de aguas para riego de la FAO, el agua del sistema de riego del Río Dulce, se califica como “sin problemas para el riego” ya que su conductividad eléctrica se encuentra entre 0,56 y 0,68 dS.m⁻¹ (Angella 2016).

En la Figura 1.5 se muestra la lámina de agua incorporada al ensayo por precipitaciones y por riego, además de los valores medios de evapotranspiración

potencial estimados según registros de la estación agrometeorológica automática del INTA Santiago del Estero, obtenidos desde el año 2007 al 2017. En la misma también se marcan los momentos en que se realizó la siembra de los cultivos y el muestreo de suelo.

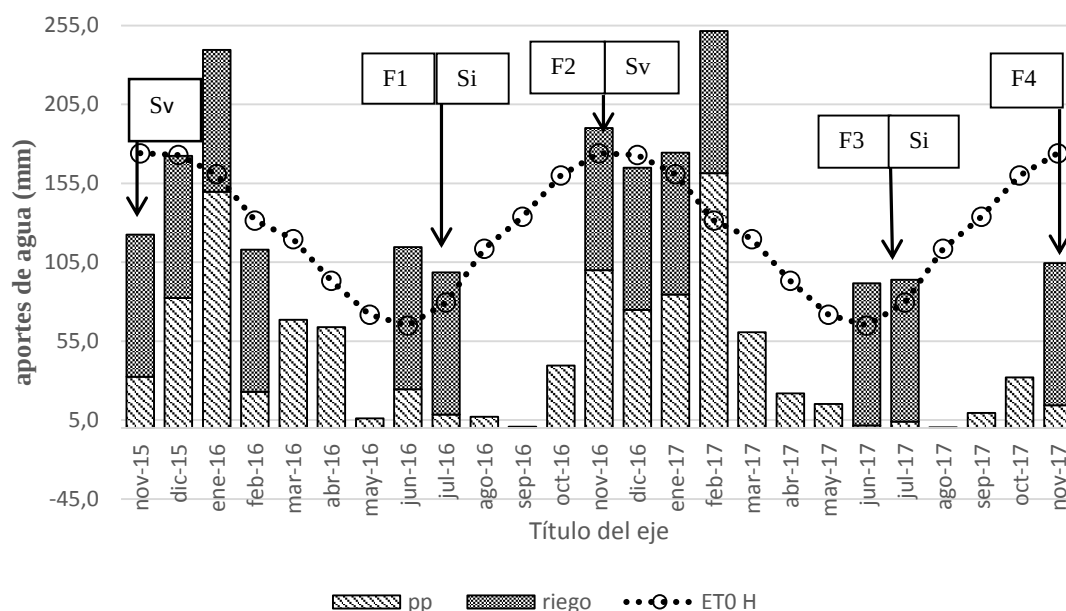


Figura 1.5. Lámina de agua recibida por el ensayo en concepto de precipitación y riego, evapotranspiración potencial y momentos de siembra y de muestreo. Evapotranspiración potencial mensual promedio estimada en base a registros de la estación agrometeorológica automática del INTA Santiago del Estero (años 2007 a 2017) (ET0 H); precipitación media mensual (pp); riego aplicado (riego); siembra de cultivos de verano (Sv); siembra de cultivo de invierno (Si); primer muestreo (F1); segundo muestreo (F2); tercer muestreo (F3); cuarto muestreo (F4).

La lámina de agua aportada por el riego durante cada uno de los ciclos agrícolas que se evaluaron (noviembre 2015 a octubre 2016 y noviembre 2016 a octubre 2017) fue de 540,0 mm. Si a dicho valor se suma el aporte correspondiente a las precipitaciones (dato obtenido de la de la estación agrometeorológica automática del INTA Santiago del Estero), se totalizan 1045,9 mm para la campaña 2015/2016 y 1120,4 mm para la de 2016/2017. Sin embargo, la evapotranspiración potencial no pudo ser satisfecha en ninguno de los dos períodos, ya que esta fue estimada en 1475,9 mm. De esta forma, el déficit hídrico para cada período fue de alrededor de 400 mm.

Desde la siembra de los cultivos de verano en 2015 hasta F1, la lámina de agua aportada (riego + pp) fue 88,8 mm menos que la evapotranspiración potencial, mientras que entre F2 y F3 este déficit hídrico fue de 18,9 mm. En los períodos comprendidos

entre F1 a F2 y F3 a F4 encontramos un déficit hídrico de 341 mm para el primero y 351 mm para el segundo período.

1.2.5.2 Características granulométricas

En la Tabla 1.4, se muestran los porcentajes de arcilla, arena, limo fino y limo grueso, determinados en cada uno de los sitios donde se realizaron las evaluaciones de los parámetros analizados de la presente tesis. Cabe aclarar que las clases texturales de los diferentes sitios fueron iguales, y que las diferentes proporciones de limos (limo fino y limo grueso) no evidencian diferencias entre sitios y profundidades desde un punto de vista agronómico.

Tabla 1.4: Proporciones relativas de los distintos tamaños de partículas presentes en los sitios de evaluación

Sitio	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo fino (%)	Limo grueso (%)	Clase textural
Monte	0 a 5	15,1	27,7	45,2	12,1	Franco limoso
Monte	5 a 20	14,9	28,7	45,4	11,1	Franco limoso
Alfalfa	0 a 5	15,4	27,4	47,3	9,9	Franco limoso
Alfalfa	5 a 20	15,1	29,9	44,7	10,4	Franco limoso
Ensayo Agrícola	0 a 5	15,8	28,0	44,8	11,3	Franco limoso
Ensayo Agrícola	5 a 20	16,7	26,5	47,4	9,4	Franco limoso

1.3 Muestreo y propiedades analizadas

1.3.1 Muestreo

El muestreo de suelos y las determinaciones a campo de todas las parcelas se realizaron en los siguientes momentos:

1^{er} Muestreo (F1): 10 junio del año 2016, al tercer año de iniciado el ensayo y luego de que en todos los tratamientos (T1 a T5) se cosechó el algodón de la campaña 2015 – 2016.

2^{do} Muestreo (F2): 1 de noviembre 2016, al tercer año de iniciado el ensayo y previo a la siembra del próximo cultivo de verano de la campaña 2016 - 2017.

3^{er} muestreo (F3): 10 junio del año 2017, al cuarto año de iniciado el ensayo y en forma posterior a la cosecha de los cultivos de verano de la campaña 2016 - 2017. En esta fecha el muestreo de los tratamientos T1 y T3 se hizo después de la cosecha de algodón, en T2 y T5 luego de la cosecha de soja y en T4 posteriormente a la cosecha del maíz. En esta misma fecha y con el propósito de obtener valores de referencia de las distintas propiedades edáficas evaluadas en el ensayo, pero bajo otros usos de la tierra, se realizó un muestreo similar en una situación cuasi-prístina ubicada en la EEA INTA Santiago del Estero (T6) y en un ensayo de alfalfa para corte, con 4 años desde implantado y un stand de plantas con capacidad de lograr una producción superior a los 1500 kg MS⁻¹ por corte y (T7). En ambos casos, las condiciones ambientales son similares a las correspondientes donde se desarrolla el ensayo bajo estudio.

La situación cuasi-prístina consiste en un bosque xerofítico con predominancia de quebracho colorado (*Schinopsis quebracho-colorado*) y quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) sobre el cual no se realiza riego. Por la influencia antrópica, posee la fisonomía de un bosque bajo, con un estrato arbustivo bien desarrollado. En dicho sitio se identificaron cinco sectores bajo la influencia de la copa de los árboles y sin signos de perturbación en la superficie. En estos sectores se realizó la toma de muestras y determinaciones a campo de la misma manera que en el ensayo de sucesión de cultivos. El ensayo de alfalfa fue sembrado sobre una parcela de 75 metros de largo x 50 metros de ancho en marzo del 2013. Previo a la siembra del cultivo de alfalfa, esta parcela compartió gran parte de su historia de uso agrícola con la del ensayo de sucesiones de cultivo. Durante los 4 años posteriores a su siembra, al cultivo de alfalfa se le realizaron 6 cortes anuales (2 en invierno y 4 en verano) con moto-guadaña,

extrayéndose la totalidad de su biomasa aérea. En forma posterior a cada corte se realizó un riego por manto. El mencionado ensayo se encuentra dividido en 5 parcelas (repeticiones), y sobre cada una de ellas se tomaron las muestras de suelo en los estratos de 0 a 5 cm y 5 a 20 cm, para hacer las determinaciones correspondientes. Se contempló el análisis de este ensayo, debido a la importancia regional que tiene el manejo del cultivo de alfalfa con destino a fardos.

4^{to} Muestreo (F4): 1 de noviembre 2017, al cuarto año de iniciado el ensayo y previo a la siembra del cultivo de verano de la campaña 2017 - 2018.

Los muestreos de la F1 y F2 forman en su conjunto el del año 2016, mientras que los de F3 y F4 forman el del año 2017. En el caso de que la variable se haya medido una sola vez en el año, se consideró a este único muestreo (ya sea F1 o F3) como el muestreo del año 2016 o 2017, según corresponda.

En todas las fechas se analizaron los estratos de suelo de 0-5 cm y 5-20 cm, realizándose distintas determinaciones físicas y químicas, para las cuales se tomaron muestras compuestas de cuatro submuestras por cada parcela y profundidad.

1.3.2 Variables analizadas

1.3.2.1 Carbono orgánico

Para estudiar esta variable, las muestras de las capas de suelo de 0 a 5 cm y 5 a 20 cm se recolectaron en F1, F2, F3 y F4. La determinación en laboratorio del carbono orgánico total (COT), se realizó de acuerdo a la metodología de Walkley y Black (1934), modificada a escala semi-micro por Norma IRAM- SAGPyA 29571-2 (2009), mientras que en la determinación del carbono orgánico particulado (COP) y carbono orgánico asociado (COA) se siguió el protocolo detallado por Cambardella y Elliot (1992), modificado por Lorenz (2005). En el mismo, la fracción particulada se separó mediante un tamiz de malla de 53 μm , previa dispersión del suelo en una solución de hexametafosfato de sodio con una concentración de 5 g L⁻¹. La determinación del COP (en g kg⁻¹) se realizó por diferencia entre el COT y el COA (en g kg⁻¹), siendo este último el asociado a la fracción más fina del suelo. Su cuantificación se realizó de acuerdo a la metodología de Walkley y Black (1934).

Con los resultados de COT, COA y COP y con el objetivo de hacer comparables los mismos al eliminar las variaciones generadas por diferencias en la densidad aparente

de cada tratamiento, a cada fracción de carbono (% COT, % COA y % COP) y para cada profundidad se realizó una corrección para llevar dichos valores a una masa de suelo equivalente (Lee et al. 2009). Dicha masa de suelo equivalente o también llamada masa de referencia, corresponde al menor peso de capa arable calculado entre todos los tratamientos evaluados dentro de cada profundidad, dando como resultado un valor de COT, COA y COP expresado en kilogramo de carbono por tonelada equivalente de suelo. Para este cálculo se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$SM_{eq(0-5cm)} = (M_{i(0-5cm)} - M_{i,add(0-5cm)}) * \%C_{(0-5cm)}$$

$$SM_{eq(5-20cm)} = (M_{i,add(0-5cm)} * \%C_{(0-5cm)}) + ((M_{i(5-20cm)} - (M_{i,add(5-20cm)})) * \%C_{(5-20cm)})$$

Donde %C es el cociente de la concentración de carbono orgánico (%) dividido 100, SM_{eq} es el stock de Carbono del suelo en masa equivalente ($tn\ ha^{-1}$), M_i es la masa de suelo seca para cada capa ($tn\ ha^{-1}$), obtenida del producto del espesor de la capa (m), la densidad aparente del suelo ($tn\ m^{-3}$) y superficie de 1 ha ($m^2\ ha^{-1}$), y $M_{i,add}$ es la diferencia entre M_i y la masa de referencia.

De aquí en adelante, y en lo referido a esta tesis, las abreviaturas COT, COA y COP hacen referencia a los stocks expresados en la masa equivalente de estas variables.

1.3.2.2 Estabilidad de la estructura

La estabilidad estructural expresa la habilidad del suelo para mantener la distribución y tamaño de agregados, luego de exponerlos a aquellos agentes que producen su degradación. La desagregación del suelo implica un proceso de ruptura de agregados en fragmentos de menor tamaño. Dicho fenómeno puede afectar a distintas escalas de agregados, pero raramente implica la destrucción total de los agregados en sus partículas constituyentes primarias (Díaz-Zorita et al. 2002a). Hasta el momento se han identificado cuatro mecanismos de desagregación que involucran la participación del agua (Le Bissonnais 1996):

- La desagregación por compresión del aire ocluido al entrar agua rápidamente al interior del agregado, lo que origina su ruptura (estallido).
- El microagrietamiento por hinchamiento diferencial de las arcillas.

- La desagregación debida al impacto de las gotas de lluvia.
- La dispersión por procesos físico-químicos.

Le Bissonnais (1996) propuso un método que contempla la aplicación de tres pretratamientos, permitiendo distinguir tres mecanismos diferentes de fragmentación de los agregados. El pretratamiento de humedecimiento rápido (hr), el pretratamiento de humedecimiento lento (hl) y por último el pretratamiento de disgregación mecánica (dm). Posteriormente y mediante un procedimiento desarrollado más adelante, se calculó el diámetro medio ponderado promedio (DMP_{med}). Para ello es necesario calcular previamente los resultados parciales de cada pretratamiento (DMP_{hr} , DMP_{hl} y DMP_{dm}). DMP_{med} resume el comportamiento del suelo en cuanto a su estabilidad contemplando los tres mecanismos de desagregación antes mencionados (Le Bissonnais y Arrouays 1997; Chenu et al. 2000)

Le Bissonnais (1996) planteó una escala de “Clases de estabilidad”, donde los suelos se clasifican desde muy inestables a muy estables en base a los intervalos de los DMP_{med} (Tabla 1.5).

Tabla 1.5: Escala de “Clases de estabilidad” propuesta por Le Bissonnais (1996)

Escala de clases de estabilidad	
DMP (mm)	Estabilidad
<0,4	Muy inestable
0,4 a 0,8	Inestable
0,8 a 1,3	Moderadamente estable
1,3 a 2,0	Estable
>2,0	Muy estable

Mediante esta técnica se puede analizar cómo responden los agregados de un suelo a cada rotación de cultivo y uso del suelo a las condiciones impuestas de velocidad de humectación y de energía de agitación aplicada (Gabioud et al. 2008). En este sentido, se tiene en cuenta la textura, la porosidad, mineralogía de arcillas, el carbono orgánico y la actividad biológica, tanto por su rol en la generación de poros como en la humificación de la materia orgánica (Dexter 2004). Los diferentes pretratamientos aplicados en la metodología manifiestan las condiciones del suelo respecto de las propiedades descriptas.

Para determinar la estabilidad estructural por la metodología propuesta por Le Bissonnais (1996), las muestras de 0 a 5 cm y 5 a 20 cm recolectadas en F1 y F3, fueron

desterronadas manualmente por sus líneas de fractura natural con la humedad de campo, removiendo las raíces y restos vegetales presentes. Posteriormente, las muestras secas se tamizaron con tamices que presentan una abertura de malla de 3 y 5 mm, utilizando dicha fracción de agregados para el análisis de estabilidad estructural, luego de que estos se secaron a 40°C durante 24 horas. Para evaluar por separado los ya mencionados mecanismos de ruptura de agregados, este método involucra tres pre-tratamientos que evalúan de manera separada distintos mecanismos de ruptura de los agregados, utilizando para el desarrollo de cada uno de ellos sub-muestras distintas:

1) humedecimiento rápido (hr): en el cual se evalúa el estallido del agregado por compresión del aire ocluido dentro del mismo. Al no permitir la salida de los gases por la entrada rápida del agua, se provoca su ruptura.

2) desagregación mecánica (dm): que responde a una rotura mecánica de los agregados por agitado, habiendo sido estos previamente humectados. En este caso se evalúa la cohesión mecánica de los agregados, de manera independiente del efecto de estallido analizado mediante el pre-tratamiento de humectación rápida.

3) humedecimiento lento (hl): es un tratamiento de la muestra menos destructivo que la humectación rápida y permite una mejor discriminación en suelos menos estables.

Para llevar a cabo estas determinaciones se utilizaron para cada pre-tratamiento 6 g de agregados, comprendidos dentro de la fracción de 3 y 5 mm. Cabe señalar que cada pre-tratamiento se hizo por duplicado. En el pre-tratamiento de humedecimiento rápido, los agregados secos fueron inmersos en agua destilada por 10 minutos. En el pre-tratamiento de disgregación mecánica, los agregados fueron saturados en etanol por 30 minutos y posteriormente transferidos a un erlenmeyer con agua destilada y agitados 10 veces por medio de giros completos del erlenmeyer. En el pre-tratamiento de humedecimiento lento, los agregados se humedecieron por capilaridad con agua destilada durante 60 minutos.

Posteriormente, los agregados de los distintos pre-tratamientos fueron tamizados sumergidos en etanol, utilizando un tamiz con abertura de malla de 50 μm . Aquellos agregados que quedaron retenidos sobre dicho tamiz se secaron a estufa a 40 °C durante 48 h. Luego estos se tamizaron en seco en una columna de 6 tamices con las siguientes aberturas de malla: 2000 μm , 1000 μm , 500 μm , 200 μm , 100 μm y 50 μm , procediendo posteriormente al pesado de cada fracción de agregados retenida entre tamices adyacentes. Por último, se multiplicó el porcentaje en peso de suelo remanente en cada tamiz por la abertura media de malla de los tamices adyacentes, realizando luego la

sumatoria de estos valores parciales (Ecuación 1) (López y Arrue 1997). De esta manera se obtuvo el diámetro medio ponderado de los agregados para cada pre-tratamiento: DMP_{hr} (humedecimiento rápido), DMP_{dm} (disgregación mecánica), DMP_{hl} (humedecimiento lento).

$$DMP = \sum [(\text{diámetro medio de malla entre dos tamices (mm)}) * ((\% \text{ en peso de cada fracción de agregados retenida entre dos tamices})/100)]$$

1.3.2.3 Densidad aparente (DAP):

Se midió en los momentos F1, F2, F3 y F4 mediante el método del cilindro (Burke et al. 1986). Para ello se utilizó un cilindro metálico de 100 cm³, tomando 1 muestra por cada parcela en las capas de suelo de 0-5 cm y en el centro de la capa de suelo entre 5 y 20cm.

1.3.2.4 Resistencia mecánica a la penetración (RMP):

La resistencia a la penetración se realizó mediante el método de Burke et al. (1986). Se utilizó un penetrómetro de golpe que tiene un cono de 30°, una pesa de 2 kg y un recorrido de la pesa de 0,65 m. Se colocó el penetrómetro en posición perpendicular al suelo, dejando caer la pesa desde el tope superior hasta el inferior. Se determinó el número de golpes necesarios para atravesar un estrato de suelo de 5 cm, multiplicando dicho valor por un coeficiente (0,275) para obtener la resistencia a la penetración en MPa: Las mediciones se realizaron hasta llegar a los 20 cm de profundidad en F1, F2, F3 y F4. Para la obtención de la resistencia a la penetración promedio correspondiente a cada una de las dos profundidades evaluadas (0 a 5 cm y 5 a 20 cm) se realizó el siguiente calculo:

Profundidad 0 a 5 cm:

Nº de golpes (0 a 5cm) *0,275= RMP (0 a 5cm)

Capa de suelo entre 5 a 20 cm:

Nº de golpes (5 a 10cm) *0,275 = RMP (5 a 10cm)

Nº de golpes (10 a 15cm) *0,275 = RMP (10 a 15cm)

Nº de golpes (15 a 20cm) *0,275 = RMP (15 a 20cm)

$$\text{RMP (5 a 20cm)} = (\text{RMP (5 a 10cm)} + \text{RMP (10 * 15cm)} + \text{RMP (15 a 20cm)}) / 3$$

Se realizaron cuatro repeticiones de RMP por parcela y paralelamente a estas mediciones, se tomaron muestras de suelo para establecer su contenido de humedad. Para obtener un contenido hídrico del suelo similar en todas las parcelas, las determinaciones de RMP se realizaron 72 horas después de que estas fueron regadas con una lamina de agua de 90 mm (en el caso del monte, se esperó la ocurrencia de una copiosa precipitación), obteniéndose así humedades de suelo similares en T1, T2, T3, T4, T5 y T7, haciendo comparables entre sí los valores de RMP obtenidos.

Los valores de RMP con los que se trabajó durante este estudio, corresponden al promedio de las cuatro repeticiones realizadas en cada unidad experimental, obteniéndose así un valor por cada parcela y por cada una de las profundidades analizadas (0 a 5 y 5 a 20 cm) en cada uno de los bloques.

1.3.2.5 Conductividad hidráulica

Para evaluar la calidad física de un suelo debemos tener en cuenta la manera en que el suelo retiene y transmite agua. Algunas propiedades hidráulicas como la velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica, determinan la condición de drenaje interno de los suelos, así como el suministro de agua y nutrientes para las plantas (Silva Rossi 2004). La infiltración es la cantidad de agua que ingresa al suelo a través de su superficie, siendo la resultante de la lámina de agua infiltrada en una determinada unidad de tiempo. La velocidad de infiltración decrece con el tiempo, resultando elevada al comenzar el proceso, debido a que en el fenómeno participan otras fuerzas además de la gravitatoria, como por ejemplo las tensiones capilares. En una primera etapa tiene lugar el almacenaje de agua y colmada esta capacidad, el horizonte en cuestión actúa como una capa de conducción, transfiriendo agua a horizontes inferiores. Cuando la velocidad de infiltración se estabiliza y es constante, es denominada infiltración básica y se aproxima entonces a la conductividad hidráulica saturada (Torrán 2007; Quiroga y Bono 2012). Por tal motivo, es frecuente utilizar la infiltración básica como estimador confiable de la conductividad hidráulica saturada (Aoki y Sereno 2004). La conductividad hidráulica saturada de un suelo describe la funcionalidad de su sistema poroso, englobando propiedades como, cantidad, tamaño, morfología, continuidad y orientación de los poros (Ellies et al. 1997). Estos factores geométricos son sensibles a cambios estructurales

debidos al manejo del suelo. Por lo tanto, es un buen parámetro para evaluar la calidad física edáfica (Dörner y Dec 2007). En Argentina, varios autores toman a esta variable como indicador sensible para detectar efectos del manejo sobre la calidad de suelos (Sasal et al. 2010; Castiglioni et al. 2016)

1.3.2.5.1 Conductividad hidráulica saturada determinada en laboratorio (Ks).

En la presente tesis, la conductividad hidráulica saturada determinada en laboratorio se midió a la cosecha del cultivo de verano en los años 2016 y 2017 (F1 y F3), tomando una muestra por parcela con un cilindro metálico a dos profundidades: 0-5 y 5-20 cm. En laboratorio se aplicó el método de la carga de agua variable establecido por Klute y Dirsken (1986).

Esta propiedad fue la única para la cual no se recolectaron muestras de suelo en el sitio de monte (T6) y pastura de alfalfa para corte (T7) durante la F3.

1.3.2.5.2 Conductividad hidráulica estimada a campo (Kh)

Es posible medir la infiltración y por consiguiente estimar la conductividad hidráulica por medio de métodos desarrollados a campo, con anillos de infiltración o infiltrómetros de presión o tensión (Lozano, 2014). El infiltrómetro de disco a tensión es una herramienta útil para medir el movimiento de agua a través del suelo cerca de su saturación y por lo tanto para estudiar el efecto de las prácticas de manejo sobre las propiedades hidráulicas superficiales (Moret y Arrúe 2007).

Sobre el suelo superficial y mediante un permeámetro de disco a tensión (Perroux y White 1988) con un diámetro de disco de 12,5 cm, se realizaron ensayos de infiltración. Este equipo permite controlar las tensiones sobre la placa porosa y de esta forma estimar la velocidad del flujo de agua en determinados tamaños de poro. Se colocó una capa de 5 mm de arena sobre la superficie del suelo, para asegurar un contacto adecuado con el disco, realizando tres repeticiones por parcela y aplicando en cada una de ellas tres tensiones (0 cm, 1,5 cm y 3 cm) hasta llegar a un volumen infiltrado de agua similar en 3 intervalos de tiempo iguales, estimando así la infiltración de equilibrio para cada una de ellas. La tensión generada por una columna de 3 cm de agua, permite que en el proceso de infiltración actúen los poros con diámetro menor a 1040 μm , con una tensión de 1,5

cm los poros en actividad serán aquellos con un diámetro menor a 2080 μm , mientras que cuando no se aplica tensión alguna (0 cm) el flujo de agua se lleva a cabo sobre la totalidad de los poros del suelo.

Las determinaciones se realizaron en los años 2016 y 2017 a la cosecha del cultivo de verano (F1 y F3). Con esta información y a partir del procedimiento propuesto por Ankeny et al. (1991), se estimó la conductividad hidráulica (K_h) (mm h^{-1}) para cada una de las tensiones aplicadas, obteniéndose así:

- $K_{h0\text{cm}}$ = conductividad hidráulica estimada con tensión de 0 cm de columna de agua
- $K_{h1,5\text{cm}}$ = conductividad hidráulica estimada con tensión de 1,5cm de columna de agua
- $K_{h3\text{cm}}$ = conductividad hidráulica estimada con tensión de 3 cm de columna de agua

1.3.2.6 Humedad gravimétrica del suelo (HG):

La medición de esta propiedad se realizó en todos los momentos (F1; F2; F3 y F4), de forma paralela con la medición de RMP, en todas las parcelas y 72 horas después de un riego (en el caso del monte, se esperó una copiosa precipitación).

Los valores de HG con los que se trabajó durante este estudio, corresponden al promedio de cuatro repeticiones realizadas en cada unidad experimental, obteniéndose así un valor por cada parcela y por cada una de las profundidades analizadas (0 a 5 y 5 a 20 cm).

La HG se expresó en porcentaje de peso (gr de agua/100 gr de suelo seco) y su determinación consistió en relacionar la cantidad de agua que posee una cantidad de suelo, con el peso seco del mismo. Cada muestra fue pesada inmediatamente después de ser extraída del campo (peso húmedo), luego fue colocada en estufa a 105 °C durante 48 h y posteriormente pesada (peso seco).

1.3.3 Variables del cultivo

1.3.3.1 Rendimiento en fibra seca del algodón (FS)

El muestreo de material vegetal se realizó el 15 de mayo del 2016, momento en el cual el cultivo estaba en condiciones agronómicas de ser cosechado. Para ello se cosechó manualmente la fibra de algodón de todos los capullos presentes en 1 m² de cada parcela, siendo luego esta secada en estufa a 60 °C hasta llegar a peso constante. De esta manera se obtuvieron los Kg de MS de FS presente en 1 m² (MS_(fibra)). Mediante el siguiente cálculo se determinó el rendimiento final de FS en Kg ha⁻¹:

$$FS \text{ (Kg ha}^{-1}\text{)} = MS_{(fibra)} * 10000 \text{ m}^2$$

1.3.3.3 Índice de intensificación de la secuencia de cultivos (ISI)

El ISI es la relación entre los días en que el suelo es ocupado por cultivos en desarrollo respecto al total de días de todos los años evaluados (Sasal et al. 2010). Se realizó una adaptación del ISI para la obtención de otro índice denominado índice de intensificación de secuencias agrícolas con cereales ICC (Novelli 2013). Este relaciona el tiempo en que el suelo estuvo ocupado solo por cultivos de gramíneas en desarrollo respecto al total de los años analizados, al que llamaremos

Teniendo en cuenta estas definiciones y considerando el número de días que los distintos cultivos ocupan el suelo (Soja=160 días, Maíz: 150 días, Algodón: 170 días, Trigo: 130 días), se calcularon los distintos índices para dos períodos (P1 y P2):

P1: desde la siembra del primer cultivo del ensayo en noviembre de 2013, hasta el final del cultivo de verano en junio de 2016 = 957 días

P2: desde la siembra del primer cultivo del ensayo en noviembre de 2013, hasta el final del cultivo de verano en junio de 2017 = 1307 días.

A continuación, se detalla el cálculo de los índices (ISI y ICC) para cada tratamiento de acuerdo a los dos períodos mencionados (P1 y P2):

$$ISI_{P1T1} = (\text{Alg} + \text{Alg} + \text{Alg}) / 957 \text{ días} = (170 \text{ días} + 170 \text{ días} + 170 \text{ días}) / 957 \text{ días} = 0,53$$

$$ISI_{P1T2} = (\text{Mz} + \text{Alg} + \text{Alg}) / 957 \text{ días} = (150 \text{ días} + 170 \text{ días} + 170 \text{ días}) / 957 \text{ días} = 0,51$$

$$\begin{aligned} \text{ISI}_{P1T3} &= (\text{Mz} + \text{Sj} + \text{Alg}) / 957 \text{ días} = (150 \text{ días} + 160 \text{ días} + 170 \text{ días}) / 957 \text{ días} = 0,50 \\ \text{ISI}_{P1T4} &= (\text{Mz} + \text{Alg} + \text{Alg}) / 957 \text{ días} = (150 \text{ días} + 170 \text{ días} + 170 \text{ días}) / 957 \text{ días} = 0,51 \\ \text{ISI}_{P1T5} &= (\text{Mz} + \text{Tr} + \text{Alg} + \text{Tr} + \text{Alg}) / 957 \text{ días} = (150 + 130 + 170 + 130 + 170 \text{ días}) / 957 \text{ días} = 0,78 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ICC}_{P1T1} &= (\text{No hay cultivo de gramíneas}) / 957 \text{ días} = (0) / 957 \text{ días} = 0 \\ \text{ICC}_{P1T2} &= (\text{Mz}) / 957 \text{ días} = (150) / 957 \text{ días} = 0,16 \\ \text{ICC}_{P1T3} &= (\text{Mz}) / 957 \text{ días} = (150) / 957 \text{ días} = 0,16 \\ \text{ICC}_{P1T4} &= (\text{Mz}) / 957 \text{ días} = (150) / 957 \text{ días} = 0,16 \\ \text{ICC}_{P1T5} &= (\text{Mz} + \text{Tr} + \text{Tr}) / 957 \text{ días} = (150 + 130 + 130) / 957 \text{ días} = 0,42 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ISI}_{P2T1} &= (\text{Alg} + \text{Alg} + \text{Alg} + \text{Alg}) / 1307 \text{ días} = (170 + 170 + 170 + 170 \text{ días}) / 1307 \text{ días} = 0,52 \\ \text{ISI}_{P2T2} &= (\text{Mz} + \text{Alg} + \text{Alg} + \text{Sj}) / 1307 \text{ días} = (150 + 170 + 170 + 160 \text{ días}) / 1307 \text{ días} = 0,50 \\ \text{ISI}_{P2T3} &= (\text{Mz} + \text{Sj} + \text{Alg} + \text{Alg}) / 1307 \text{ días} = (150 + 160 + 170 + 170 \text{ días}) / 1307 \text{ días} = 0,50 \\ \text{ISI}_{P2T4} &= (\text{Mz} + \text{Alg} + \text{Alg} + \text{Mz}) / 1307 \text{ días} = (150 + 170 + 170 + 150 \text{ días}) / 1307 \text{ días} = 0,49 \\ \text{ISI}_{P2T5} &= (\text{Mz} + \text{Tr} + \text{Alg} + \text{Tr} + \text{Alg} + \text{Tr} + \text{Sj}) / 1307 \text{ días} = (150 + 130 + 170 + 130 + 170 + 130 + 160) / 1307 = 0,8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ICC}_{P2T1} &= (\text{No hay cultivo de gramíneas}) / 1307 \text{ días} = (0) / 1307 \text{ días} = 0 \\ \text{ICC}_{P2T2} &= (\text{Mz}) / 1307 \text{ días} = (150) / 1307 \text{ días} = 0,11 \\ \text{ICC}_{P2T3} &= (\text{Mz}) / 1307 \text{ días} = (150) / 1307 \text{ días} = 0,11 \\ \text{ICC}_{P2T4} &= (\text{Mz} + \text{Mz}) / 1307 \text{ días} = (150 + 150) / 1307 \text{ días} = 0,22 \\ \text{ICC}_{P2T5} &= (\text{Mz} + \text{Tr} + \text{Tr} + \text{Tr}) / 1307 \text{ días} = (150 + 130 + 130 + 130) / 1307 \text{ días} = 0,41 \end{aligned}$$

1.4 Análisis estadístico

Previo al análisis se verificó que los resultados cumplan con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza requeridos para el mismo. El análisis de los resultados se realizó a través de modelos lineales generales y mixtos, con la finalidad de comprobar la existencia de diferencias significativas en los distintos parámetros debidas a los diferentes tratamientos. Los detalles metodológicos se expresan en cada capítulo, dependiendo de los contrastes establecidos. Posteriormente, para la comparación de

medias se utilizó la prueba de diferencia de medias significativas de Fisher (DMS) con $p < 0,05$. También se hicieron análisis de correlación y regresión lineal simple, con el objetivo de observar si hay vinculaciones significativas entre los diferentes parámetros estudiados (Di Rienzo et al. 2009). El procesamiento de datos se realizó mediante el software Infostat (Di Rienzo et al. 2015).

Capítulo 2: *Efecto de las distintas secuencias de cultivos sobre algunas propiedades físicas y químicas edáficas y sobre el rendimiento en fibra del algodón*

2.1 Introducción

El área de riego del Río Dulce (ARD) está ubicada en el centro-oeste de la provincia de Santiago del Estero. En la misma se encuentran suelos de origen aluvial y loésico, poco desarrollados y con texturas limosas (Duffau et al. 2000). La presencia de altos porcentajes de limo en estos suelos, le confiere un gran riesgo a la ocurrencia del proceso de degradación física, dependiendo del contenido de materia orgánica presente para que el mismo se exprese (Stengel et al. 1984; Oades 1993; Alakukku 1998; Topp et al. 2002; Sasal 2012). Lo hasta aquí mencionado, sumado a las altas temperaturas de la región que favorecen la rápida mineralización del carbono, y la historia previa de estos suelos con un sistema de labranza convencional, riego por manto y monocultivo de algodón, ponen en evidencia la necesidad de buscar alternativas de manejo más sostenibles (Galizzi et al. 2014).

Los factores antes descriptos generaron la degradación de gran parte de los suelos del ARD y están llevando al productor a replantearse la forma de producir en la región. Es por ello que una reducción en las labranzas junto con la alternancia de diferentes cultivos pareciera ser una opción para mejorar la calidad de los suelos. La SD comprende una serie de prácticas agronómicas que permiten un manejo del suelo con una menor perturbación respecto a los sistemas tradicionales (European Conservation Agriculture Federation 1999). Por otra parte, la cobertura de rastrojos generada por la SD, produce una mejora en los niveles del carbono orgánico superficial, incrementa la conservación del agua del perfil al reducir las tasas de evapotranspiración, aumenta la infiltración del suelo y genera una menor incidencia de los rayos solares directos sobre la superficie del suelo (European Conservation Agriculture Federation 1999). A su vez, en este sistema de labranza, los residuos de los cultivos se descomponen a una velocidad menor que en los sistemas convencionales de laboreo de la tierra (Blanco-Canqui y Lal 2004).

La alternancia de cultivos dentro de una rotación agrícola, presenta ventajas respecto al monocultivo. En este sentido, el diferente desarrollo radicular, la distinta estructura y funcionamiento de la comunidad microbiana generada, los cambios en las fechas de siembra y cubrimiento del suelo, la distinta cantidad y calidad de los rastrojos aportados, como también el diferente consumo de agua y nutrientes por los distintos cultivos, son factores que mejoran la calidad del suelo (Amézketa, 1999; Bronick y Lal 2005; Wickings et al. 2012)

Por lo tanto, la implementación de la siembra directa en el ARD combinada con la alternancia de distintos cultivos donde el algodón es el de mayor interés económico, es un área de la investigación que presenta un atractivo regional en vistas del mejoramiento de la calidad edáfica.

2.1 Objetivos e hipótesis

2.1.1 Objetivo general

Analizar la respuesta de distintas propiedades físicas y químicas en un Haplustol torriorténtico degradado de la región semiárida de Santiago del Estero, al tercer y cuarto año de iniciado un ensayo con diferentes sucesiones de cultivos y monocultivo de algodón bajo siembra directa y riego por manto.

2.1.2 Objetivos específicos

1. Analizar el comportamiento de distintas fracciones del carbono orgánico, estabilidad estructural, densidad aparente, resistencia a la penetración y conductividad hidráulica a dos profundidades (0 a 5 cm y 5 a 20 cm) en un Haplustol de la provincia de Santiago de Estero con distintas secuencias de cultivos y monocultivo de algodón al tercer y cuarto año de iniciado el ensayo.
2. Identificar entre las variables estudiadas, aquellas que resulten modificadas en forma significativas a partir del efecto de los distintos tratamientos analizados.
3. Relacionar los resultados de las distintas propiedades edáficas analizadas, con diferentes indicadores que informen acerca de la intensidad en la secuencia de cultivos de cada tratamiento.
4. Analizar la respuesta en el rendimiento de fibra seca del algodón, de acuerdo a los diferentes tratamientos estudiados.
5. Establecer aquellas secuencias de cultivos que generen un sistema productivo más sostenible.

2.1.2.1 Hipótesis

Hipótesis 1: El tratamiento con doble cultivo anual (trigo/cultivo de verano) aporta las mayores diferencias en los resultados de las propiedades físicas y químicas del Haplustol analizado, respecto a los obtenidos por el monocultivo.

Hipótesis 2: El carbono orgánico particulado y la estabilidad estructural son las dos propiedades que logran evolucionar más favorablemente a partir de la implementación de secuencias de cultivos más diversificadas.

Hipótesis 3: A pesar de las mejoras producidas por el doble cultivo anual en algunas de las propiedades edáficas, este tratamiento es el que experimenta la mayor densificación del suelo debido al mayor tránsito de la maquinaria.

Hipótesis 4: La mejora en algunos parámetros físicos y químicos edáficos generados por el doble cultivo anual (trigo/cultivo de verano), favorece una mayor productividad en fibra del cultivo de algodón

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Análisis estadísticos

El análisis de resultados se realizó con el procedimiento de modelos lineales, generales y mixtos, a través de la interfaz de R con el paquete estadístico Infostat 2015 (Di Rienzo et al., 2015). Para el análisis de los resultados de ambos años, en cada una de las profundidades (0 a 5 cm y 5 a 20 cm) correspondientes a las variables COT, COA, COP, DMP_{hr}, DMP_{dm}, DMP_{hl}, DMP_{med}, RMP, DAP, Ks, Kh_{0cm}, Kh_{1,5cm} y Kh_{3cm}, se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + t_j + B_k + (T_i \times t_j) + \varepsilon_{ijk}$$

Donde Y es la variable dependiente de la secuencia de cultivo i y el año j, μ es la media global, T es el efecto fijo de la secuencia de cultivo i, t es el efecto fijo del año j,

B es el efecto aleatorio del bloque k, $(T_i \times t_j)$ es el efecto fijo de la interacción entre la secuencia de cultivo i con el año j, y ε_{ijk} es el error experimental.

En el caso de las variables para las que se tienen 4 fechas de muestreo (COT, contenido de humedad, COA, COP, RMP y DAP), se utilizó los muestreos de forma separada y aplicó el antes mencionado diseño completamente aleatorizado con modelos lineales, generales y mixtos a través de la interfaz de R con el paquete estadístico Infostat, donde el modelo estadístico fue:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + F_j + B_k + (T_i \times F_j) + \varepsilon_{ijk}$$

Donde Y es la variable dependiente de la secuencia de cultivo i y el año j, μ es la media global, T es el efecto fijo del tratamiento i, F es el efecto fijo de la fecha de muestreo j, B es el efecto aleatorio del bloque k, $(T_i \times F_j)$ es el efecto fijo de la interacción entre la secuencia de cultivo i con la fecha de muestreo j, y ε_{ijk} es el error experimental.

En el caso particular de las propiedades COP, RMP, DMP_{Phr}, DMP_dm, DMP_{Phl}, DMP_{med}, Kh_{0cm}, Kh_{1,5cm} y Kh_{3cm} se modelizó el efecto de la secuencia de cultivo en la heterostacidad de la varianza (Varldent). En el caso particular de Ks, este parámetro debió ser transformado ($\log_{10}$), ya que sus resultados no se distribuyeron de acuerdo a una distribución normal (Shapiro Wilkis, $p < 0,05$) y al $\log_{10}$ Ks se le modelizó el efecto del tratamiento en la heterostacidad (Varldent) de la varianza. Las propiedades COT, COA y DAP cumplieron con los supuestos del ANVA sin necesidad de que fuesen modelizarlas por Varldent y/o transformarlas.

En los casos que se obtuvieron resultados con interacción significativa fecha de muestreo-secuencia de cultivos, se procedió a analizar los datos mediante un diseño en bloques al azar con el procedimiento de modelos lineales, generales y mixtos a través de la interfaz de R con el paquete estadístico Infostat, en donde se compararon todas las secuencias de cultivos en cada fecha de muestreo por separado. El modelo incluyó como efectos fijos a los tratamientos (T_i) y el efecto aleatorio los Bloques (B_j)

$$Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde Y_{ij} es la variable dependiente, μ es la media global, T es el efecto fijo de la secuencia de cultivo i, B es el efecto aleatorio del bloque j y ε_i es el error experimental.

La comparación de medias se realizó mediante la prueba de diferencias mínimas significativas de LSD de Fisher ($P < 0,05$) protegida por el test F de la ANVA.

Respecto a la evaluación efectuada sobre el rendimiento en fibra seca del algodón, donde solo se tienen los datos de la campaña 2015/2016 (momento en el cual todos los tratamientos presentaron dicho cultivo), se realizó un análisis de la varianza estándar utilizando el paquete estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2015). El modelo incluyó como efectos a las distintas secuencias de cultivo y los Bloques

$$Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde Y_{ij} es la variable dependiente, μ es la media global, T es el efecto de la secuencia de cultivo i , B es el efecto del bloque j y ε_i es el error experimental. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de diferencias mínimas significativas de LSD de Fisher ($P < 0,05$) protegida por el test F de la ANVA. Se usaron contrastes polinomiales para evaluar el patrón de respuesta a los distintos tratamientos.

Paralelamente a los análisis ya mencionados, se buscó mediante correlaciones de Pearson el grado de vinculación entre el ISI_{P1} e ICC_{P1} y los valores promedio de los tratamientos del resto de las variables (COT, COA, COP, DMP_{hr} , DMP_{dm} , DMP_{hl} , DMP_{med} , RMP, DAP, $\log_{10}Ks$, FS, Kh_{0cm} , $Kh_{1,5cm}$ y Kh_{3cm}), para cada profundidad en la campaña 2015/16. De la misma forma se procedió con el ISI_{P2} e ICC_{P2} , pero esta vez con el promedio del resto de las variables (COT, COA, COP, DMP_{hr} , DMP_{dm} , DMP_{hl} , DMP_{med} , RMP, DAP, $\log_{10}Ks$, FS, Kh_{0cm} , $Kh_{1,5cm}$ y Kh_{3cm}) de cada secuencia de cultivo y de cada profundidad en la campaña 2016/17.

2.3 Resultados y discusión

En las Tablas 2.1 y 2.2 se presentan los resultados del análisis de la varianza, realizado para estudiar el efecto generado sobre las variables estudiadas por las distintas secuencias de cultivos, la fecha de muestreo y la interacción fecha-rotación. Respecto al rendimiento en fibra seca del algodón, correspondiente a la campaña 2015/16, se observó un efecto de los tratamientos (p -valor=0,0168).

En los primeros 5 cm de profundidad (Tabla 2.1), se comprobó que hubo cambios significativos entre años de muestreo para el COP, COA, $Kh_{1,5cm}$, DMP_{hr} , DMP_{dm} , DMP_{hl}

y DMP_{med} , mientras que el efecto de la distinta sucesión de cultivos se generó sobre todas las variables asociadas a la estabilidad estructural, como también sobre aquellas relacionadas con el movimiento de agua (con la excepción de Kh_{3cm}). Por su parte, solo se comprobó interacción año-tratamiento para los resultados de esta última variable y para RMP.

Tabla 2.1 Resultados del análisis de los modelos lineales, generales y mixtos, correspondiente a las distintas propiedades analizadas en el estrato superficial del suelo en dos años sucesivos para las distintas secuencias de cultivos.

Variable	Profundidad de 0 a 5 (cm)					
	Efecto					
	Año		Secuencia		Secuencia*Año	
	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor
COT (tn ha ⁻¹)	0,11	0,7426	0,54	0,7087	1,41	0,2385
COP (tn ha ⁻¹)	8,93	0,0037*	0,54	0,7085	1,34	0,2629
COA (tn ha ⁻¹)	19,71	<0,0001*	1,45	0,2242	0,95	0,4381
DMP _{hr} (mm)	17,53	0,0002 *	8,08	<0,0001 *	0,73	0,5756
DMP _{dm} (mm)	44,32	<0,0001 *	9,16	<0,0001 *	0,55	0,7003
DMP _{hl} (mm)	5,16	0,0292 *	19,89	<0,0001 *	0,54	0,7089
DMP _{med} (mm)	57,92	<0,0001 *	27,18	<0,0001 *	0,51	0,7258
RMP (MPa)	74	<0,0001	4,64	0,0019	3,21	0,0165*
DAP (gr cm ⁻³)	2,06	0,1551	1,28	0,2847	1,21	0,3121
Log ₁₀ Ks (mm h ⁻¹)	0,25	0,6184	7,53	0,0002*	1,66	0,1814
Kh _{0cm} (mm h ⁻¹)	3,1	0,0955	4,24	0,0137*	0,5	0,7389
Kh _{1,5cm} (mm h ⁻¹)	6,37	0,0212*	3,52	0,0272*	1,68	0,1982
Kh _{3cm} (mm h ⁻¹)	5,61	0,0293	3,05	0,0442	5,23	0,0056*

(*): diferencias estadísticas significativas (p -valor < 0,05); COT: Stock de carbono orgánico total; COP: Stock de carbono orgánico particulado; COA: Stock de carbono orgánico asociado; DMP_{hr}: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento rápido; DMP_{dm}: diámetro medio ponderado correspondiente a la disgregación mecánica; DMP_{hl}: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento lento; DMP_{med}: diámetro medio ponderado promedio; RMP: resistencia mecánica a la penetración; DAP: densidad aparente; Log₁₀Ks: logaritmo en base 10 de la conductividad hidráulica saturada determinada en laboratorio; Kh_{0cm}: conductividad hidráulica a 0 cm de tensión; Kh_{1,5cm}: conductividad hidráulica a 1,5 cm de tensión; Kh_{3cm}: conductividad hidráulica a 3 cm de tensión.

A mayor profundidad (5 a 20 cm) se comprobó que entre años de muestreo hubo diferencias significativas en el COT, COP, COA, DMP_{dm} y DMP_{med} (Tabla 2.2). A su vez, las distintas sucesiones de cultivos evaluadas generaron diferencias significativas en el DMP_{dm}, DMP_{med}, RPM, DAP y Log₁₀ Ks, existiendo interacción año-tratamiento en DMP_{hr} y DMP_{hl}.

Tabla 2.2: Resultados del análisis de modelos lineales, generales y mixtos, correspondiente a las distintas propiedades analizadas en el estrato de 5 a 20 cm de profundidad en dos años sucesivos para las distintas secuencias de cultivos.

Variable	Profundidad de 5 a 20 (cm)					
	Efecto					
	Año		Secuencia		Secuencia * Año	
	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor
COT (t ha ⁻¹)	17,92	<0,0001*	0,83	0,5108	0,62	0,6516
COP (t ha ⁻¹)	11,12	0,0013*	0,45	0,7723	0,2	0,9379
COA (t ha ⁻¹)	6,59	0,0120*	1,33	0,2661	0,56	0,6920
DMP _{hr} (mm)	76,57	<0,0001	12,46	<0,0001	10,98	<0,0001*
DMP _{dm} (mm)	247,18	<0,0001 *	8,25	<0,0001 *	1,9	0,1316
DMP _{hl} (mm)	23,32	<0,0001	2,3	0,0778	6,52	0,0005*
DMP _{med} (mm)	79,88	<0,0001 *	6,6	0,0004 *	1,13	0,3588
RMP (MPa)	1,12	0,2924	9,28	<0,0001*	2,01	0,1006
DAP (gr cm ⁻³)	0,04	0,8481	4,1	0,0044*	2,47	0,0504
Log ₁₀ Ks (mm h ⁻¹)	3,23	0,0806	4,1	0,0077*	3,84	0,0584

(*): diferencias estadísticas significativas (p -valor < 0,05); COT: stock de carbono orgánico total; COP: stock de carbono orgánico particulado; COA: stock de carbono orgánico asociado; DMP_{hr}: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento rápido; DMP_{dm}: diámetro medio ponderado correspondiente a la disgregación mecánica; DMP_{hl}: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento lento; DMP_{med}: diámetro medio ponderado promedio; RMP: resistencia mecánica a la penetración; DAP: densidad aparente; Log₁₀Ks: logaritmo en base 10 de la conductividad hidráulica saturada determinada en laboratorio.

De acuerdo con estos resultados e independientemente de la profundidad considerada, las distintas fracciones del carbono no fueron afectadas por los diferentes tratamientos evaluados, mientras que todos los pretratamientos utilizados para el análisis de estabilidad estructural del estrato superficial y algunos de ellos en el más profundo, mostraron cambios debidos a las distintas rotaciones del ensayo estudiado. A su vez, el movimiento de agua a flujo saturado determinado en laboratorio, evidenció en ambos estratos el efecto de la distinta sucesión de cultivos. Por su parte, en superficie y con tensiones aplicadas de 1,5 y 0 cm, hubo efectos de los distintos tratamientos sobre el ingreso de agua al suelo. De 5 a 20 cm, se registraron además diferencias significativas entre los tratamientos para la RMP y DAP, mientras que esto no sucedió en superficie.

El factor tiempo también influyó significativamente sobre las propiedades evaluadas. En este sentido, se generaron cambios temporales en el contenido de carbono y la estabilidad estructural de ambos estratos y en el movimiento de agua superficial cercano a saturación.

A continuación, se realiza un análisis más detallado de las diferencias antes mencionadas.

2.3.1 Variación estacional, interanual y entre tratamientos del carbono orgánico total (COT), asociado (COA) y particulado (COP).

Las fracciones lábiles del carbono orgánico del suelo son altamente dependientes del tipo, cantidad y calidad de los residuos, como así también de las condiciones climáticas que inciden en su descomposición. El carbono orgánico particulado (COP) es considerado una fracción activa del pool de carbono orgánico total (COT) del suelo, ya que como consecuencia de su rápida descomposición libera una parte de los nutrientes necesarios para el desarrollo de la vegetación. Por su parte, el carbono orgánico asociado (COA) es la fracción menos lábil y más ligada a la fracción mineral del suelo. Ambas fracciones (COP y COA) conforman el COT (Cambardella y Elliott 1992).

Los stocks de carbono fueron evaluados durante los dos años y en estaciones contrastantes (otoño-invierno y primavera-verano). En la Tabla 2.3 se presentan los resultados del análisis de la varianza correspondiente a la comparación de todas las fechas de muestreo para ambas profundidades, observando que existió un efecto del momento de muestreo sobre los resultados obtenidos. En este sentido, se comprobó que el stock de COT, COA y COP fue distinto entre algunas de las fechas evaluadas, tanto en superficie como en profundidad, al mismo tiempo que no hubo efecto de los tratamientos ni interacción fecha-tratamiento sobre estas variables.

Tabla 2.3: Análisis de los efectos de las secuencias de cultivos, fecha de muestreo e interacción –secuencia-fecha en el stock de COT, COA y COP para las dos profundidades analizadas.

Profundidad	Variable	Fecha		Secuencia		Secuencia*Fecha	
		F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor
0 a 5 cm.	COT (tn ha ⁻¹)	8,89	<0,0001*	0,71	0,5858	1,59	0,1134
	COP (tn ha ⁻¹)	9,62	<0,0001*	0,68	0,6108	1,47	0,1529
	COA (tn ha ⁻¹)	13,29	<0,0001*	1,66	0,1676	0,8	0,6537
5 a 20 cm.	COT (tn ha ⁻¹)	8,8	<0,0001*	0,85	0,4999	0,07	0,8873
	COP (tn ha ⁻¹)	6,57	0,0005*	0,44	0,7770	0,35	0,9774
	COA (tn ha ⁻¹)	6,26	0,0007*	1,45	0,2264	0,72	0,7274

(*): diferencias estadísticas significativas ($p\text{-valor} < 0,05$); COT: carbono orgánico total; COP: carbono orgánico particulado; COA: carbono orgánico asociado.

Para el mismo sitio geográfico y luego de 5 años de iniciado un ensayo con tres secuencias de cultivo, Sánchez y Arrigo (2006) registraron diferencias en el COT y COA de los primeros 10 cm de profundidad de un Haplustol torriorténtico. Estos autores encontraron los mayores valores de COT y COA en la alternancia de cultivos algodón-

maíz y algodón-maíz-alfalfa, respecto a la situación con tres años de alfalfa seguida de dos años con agricultura. Sin embargo, el COP no fue una variable sensible a los tratamientos evaluados. Por su parte y de manera similar a lo determinado en el presente trabajo, Nazar (2018) al cabo de cuatro años de evaluación de un ensayo implementado sobre un Haplustol de la zona de riego de Santiago del Estero bajo SD y con sucesiones de cultivos iguales a las de esta tesis, no registró diferencias en los primeros 10 cm de profundidad en el COT de los distintos tratamientos estudiados.

Tanto los resultados aportados por Nazar (2018) como los determinados en la presente tesis, muestran que bajo las condiciones ambientales en las que se han desarrollado estos ensayos, sumado al efecto de la historia de uso previo de estos suelos, condicionaron una respuesta rápida del COT, COA y COP, requiriendo probablemente de más tiempo para que se pueda expresar el efecto de los tratamientos analizados sobre alguna de dichas propiedades.

2.3.1.1 Stock de carbono en la capa de 0 a 5 cm

En la Figura 2.1 se muestran los stocks de las diferentes fracciones del carbono orgánico entre los 0 y 5 cm, determinados en diferentes fechas de muestreo, expresados en t ha^{-1} y referenciados a una masa equivalente de 588 t ha^{-1} .

Los valores del COT superficial no registraron variaciones interanuales, mientras que el COP fue mayor en el primer año y el COA en el segundo (Figura 2.1). Dicho comportamiento resultó a partir de un incremento en el COA durante 2017 de $0,22 \text{ t ha}^{-1}$, representado este valor una variación interanual del 5,6 %, y de una reducción en el COP para el mismo año de $0,26 \text{ t ha}^{-1}$, que representó una disminución del 26 % interanual.

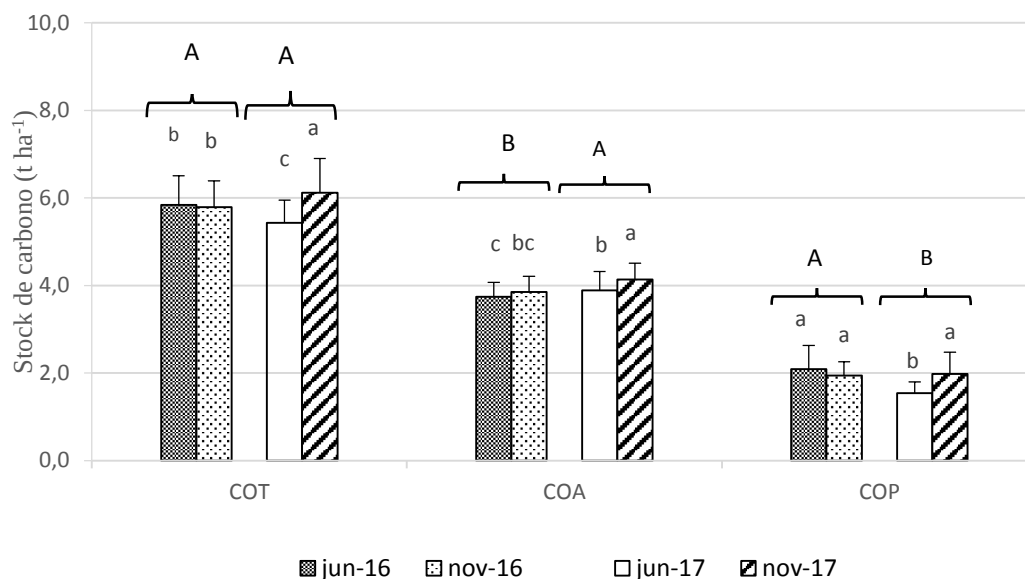


Figura 2.1. stock de COT, COA y COP entre los 0 y 5 cm de profundidad para las cuatro fechas de muestreo: junio 2016 (jun-16), noviembre 2016 (nov-16), junio 2017 (jun-17), noviembre 2017 (nov-17). Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre los años 2016 y 2017. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre fechas de muestreo para una misma variable.

Nazar (2018) para esta misma área de estudio, no registró cambios temporales significativos en el COT luego de cuatro años de iniciado un ensayo con distintas secuencias de cultivos. Sin embargo, en dicho trabajo se comprobó la existencia de una tendencia en la mejora de esta propiedad, registrando incrementos promedio anuales del 0,3 % durante las cuatro campañas. Studdert et al. (2017), en un estudio realizado sobre un Molisol de la provincia de Buenos Aires sometido a distintas secuencias de cultivos en SD, registraron en los primeros 5 cm de suelo oscilaciones interanuales en los contenidos de COP, COA y COT, siendo los máximos porcentajes de variación 33,3%, 3,8 % y 20,0 %, respectivamente.

Sánchez y Arrigo (2006), Studdert et al. (2017) y Nazar (2018), señalaron que los principales factores que influyen sobre la variación del COT y de sus fracciones son su tasa de mineralización y la cantidad y continuidad de restos vegetales aportados. A su vez, estos factores son afectados por la calidad de los residuos de las distintas secuencias de cultivos, por la temperatura y humedad del suelo y de acuerdo al grado de remoción del suelo generado por el sistema de labranza implementado.

Al analizar el comportamiento estacional de estas propiedades entre los 0 y 5 cm, se observa en la Figura 2.1 que el stock del COA aumentó en forma sostenida desde junio de 2016 hasta noviembre de 2017, mostrando diferencias significativas entre estaciones

en el último año. Por su parte, el COP mostró un significativo y menor valor en junio de 2017, oscilando en las restantes fechas en torno a un valor de $2,0 \text{ t ha}^{-1}$. A su vez, si bien el COT estuvo siempre cerca de las 6 t ha^{-1} , mostró un descenso significativo de $0,36 \text{ t ha}^{-1}$ entre noviembre de 2016 y junio de 2017, condicionado por la disminución en el COP para igual período, con un aumento significativo posterior de $0,69 \text{ t ha}^{-1}$, asociado a los incrementos en el COA y COP. De esta manera, los cambios significativos en el carbono fueron durante 2017. En dicho año hubo una recuperación significativa en el mes de noviembre respecto al de junio, siendo esta del 6,4% para el COA y del 28,6% para el COP, generando como consecuencia un incremento significativo en el COT del 13,4 %.

Studdert et al. (2015) también registraron variaciones estacionales superficiales del 7,6 % en el COA, al trabajar sobre Molisoles de Balcarce (Prov. de Bs. As.) con una secuencia de cultivos maíz-girasol-trigo, sin encontrar modificaciones en el COT y COP.

Diversos autores atribuyen los cambios sobre la fracción más estable de carbono del suelo a la temperatura (Slepetiene y Slepetys 2005; Galantini 2008), a la humedad del suelo (Hevia et al. 2003; Casado-Murillo y Abril et al. 2013) y a la calidad del rastrojo. En este último sentido, Sánchez y Arrigo (2006) mencionaron que las variaciones en el COA y COT podían estar influenciadas por el predominio de residuos mayormente lignificados, como por ejemplo los provenientes de los tallos del algodón. La composición polifenólica de los residuos de algodón y su amplio rango en la relación C/N (de 72 a 110), determinarían una mineralización lenta pero constante de estos rastrojos, aunque dicho proceso es aún poco conocido (Wright y Hons 2005).

En el presente trabajo, las variaciones estacionales en el contenido de carbono edáfico estarían asociadas además de a la distinta calidad y cantidad de rastrojos aportados por cada cultivo, a cambios en la tasa de mineralización generados por el distinto aporte de agua al suelo y a las diferentes temperaturas registradas durante los dos años del estudio. En 2015/2016 se recibieron un total de 1045,9 mm, mientras que en el año posterior se aportaron 1120,4 mm entre la lluvia mas el agua de riego. Esta diferencia de aporte se registró principalmente entre noviembre y junio (Figura 1.5). Por su parte, los registros de temperatura del aire y de los primeros centímetros del suelo mostraron que en la campaña 2016/2017 hubo valores superiores a los de 2015/2016, con incrementos de aproximadamente 1°C (Figuras 1.3 y 1.4). De la misma manera, si solo se comparan las temperaturas promedio del período noviembre 2015 - junio 2016 con las de noviembre 2016 - junio 2017, se evidencia que durante el segundo año hubo un

aumento de 0,5 °C en el aire y de 0,9 °C en los primeros 5 cm de suelo. Un comportamiento similar es observado cuando se comparan los intervalos de tiempo julio 2016 – noviembre 2016 y julio 2017 – noviembre 2017, registrándose en el segundo período una temperatura 1,5°C superior en el aire y 1 °C mayor en el suelo. Este diferente comportamiento climático, permite suponer que el proceso de descomposición de los residuos de cosecha fue más intenso durante el intervalo de tiempo previo al muestreo de 2017. A su vez, esta mayor tasa de mineralización de los restos de cosecha y de las raíces, pudo generar variaciones en las distintas fracciones del carbono entre los muestreos de 2017.

El COP promedio de los primeros 5 cm de suelo representó respectivamente en 2016 y 2017, el 34,6 % y 30,5 % del COT. Similares porcentajes fueron encontrados por Albanesi et al. (2003), Nazar (2018) y Galizzi et al. (2018), trabajando en suelos agrícolas de los departamentos Belgrano, Taboada y Capital de la provincia de Santiago del Estero. A su vez, en el presente trabajo el COP superficial mostró una correlación significativa con el COT (p-valor < 0,0001, coeficiente de correlación=0,68), lo que se corrobora al observar la Figura 2.1, donde se comprueba que ambos parámetros presentaron una similar tendencia estacional. Mientras tanto, el COA tuvo un comportamiento en el primer año del estudio algo distinto al de las otras dos variables (Figura 2.1), pese a lo cual hubo una correlación lineal y significativa entre el COT y el COA (p-valor < 0,0001, coeficiente de correlación=0,57). Similares resultados fueron reportados por Sánchez y Arrigo (2006), quienes en un suelo de iguales características al del presente estudio y también situado en la provincia de Santiago del Estero, encontraron una relación lineal entre el COP y el COT ($R^2=0,90$) y entre el COT y el COA ($R^2=0,56$).

Durante el corto período de evaluación del presente estudio, el incremento superficial del COT entre nov-16 y nov-17 dependió del constante incremento que presentó el COA, mientras que la reducción en los stocks del carbono total entre jun-16 y jun-17, serían atribuibles al descenso del COP obtenido en dichas fechas. Es de destacar que el COP presentó una disminución durante jun-16, nov-16 y jun-17, revirtiendo dicha tendencia en nov-17. Las modificaciones sufridas por el COP, coinciden con lo mencionado por Janzen et al. (1998), Carter (2002) y Álvarez y Álvarez (2000), quienes indicaron que el COP es la fracción del carbono con mayor capacidad de mostrar variaciones en cortos lapsos de tiempo y que es sensible a cambios frente a distintos tipos de manejo. Esta respuesta del COP ante las modificaciones en el uso de la tierra, quedó demostrada a partir de la correlación significativa registrada entre el valor de dicha

propiedad obtenida en el último año evaluado y el ISI_{p2} (p -valor=0,0478; coeficiente de correlación=0,86). Por lo tanto, una mayor intensificación en la secuencia de cultivos, favoreció el incremento en el COP y como consecuencia en el COT. Pese a ello y como se dijo anteriormente, en los primeros 5 cm de suelo no se registraron diferencias en las distintas fracciones del carbono edáfico entre los tratamientos analizados (Tabla 2.3), por lo que habría que contemplar una ventana de tiempo de análisis mayor desde el inicio del ensayo, para verificar si las correlaciones observadas se expresan en diferencias significativas entre los tratamientos.

2.3.1.2 Stock de carbono en la capa de 5 a 20 cm

En la Figura 2.2 se muestran los valores de stock de COT, COP y COA (5 a 20 cm) para las diferentes fechas de muestreo, expresados en $t\ ha^{-1}$ y referenciados a una masa equivalente de $1764\ t\ ha^{-1}$. En la misma se observa un comportamiento anual diferente al detallado en la Figura 2.1 para el estrato superficial.

A esta profundidad, el stock de COT, COA y COP fueron significativamente mayores en el segundo año de muestreo, siendo estas diferencias de $1,03\ t\ ha^{-1}$, $0,48\ t\ ha^{-1}$ y $0,55\ t\ ha^{-1}$, respectivamente.

Studdert et al. (2015) trabajando a igual profundidad en un ensayo de rotaciones implementado sobre Molisoles de la provincia de Buenos Aires, no encontraron diferencias entre dos años sucesivos al estudiar el comportamiento de estas mismas variables. Sin embargo, a los cinco años de efectos acumulados, registraron caídas interanuales de hasta $0,3$ y $0,2\ t\ ha^{-1}$ para el COT y COP respectivamente. Por su parte, Albanesi et al. (2003) en lotes agrícolas del este y sudeste de la provincia de Santiago del Estero, encontraron que luego de 20 años de realizada la habilitación agrícola, la caída del COP en el estrato de 0 a 20 cm estuvo en el orden del 35,5% y 11,8 % dependiendo de la posición topográfica. Gómez et al. (2018) analizando los primeros 20 cm de un Haplustol con 30 años de agricultura, registró luego de 3 campañas agrícolas bajo SD y con rotaciones que combinaban algodón, maíz, soja y trigo bajo riego, un incremento medio del COT cercano al 20%. En ese mismo ensayo, Gomez et al. (2019) señalaron que a partir de la cuarta campaña los valores de COT se habrían estabilizado en torno a las $20\ t\ ha^{-1}$.

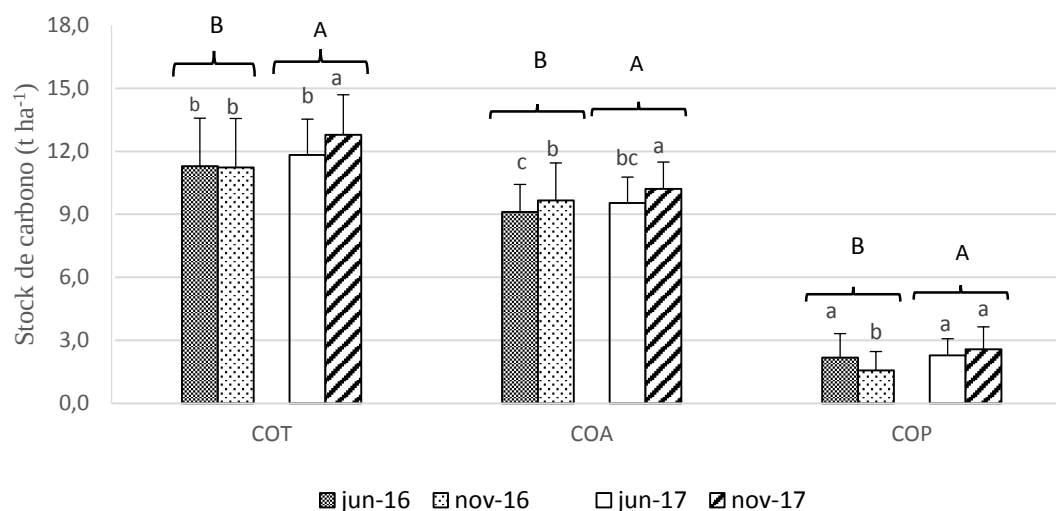


Figura 2.2. Stock de COT, COA y COP entre los 5 y 20 cm de profundidad para las cuatro fechas de muestreo: junio 2016 (jun-16), noviembre 2016 (nov-16), junio 2017 (jun-17), noviembre 2017 (nov-17). Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre los años 2016 y 2017. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre fechas de muestreo para una misma variable.

Como ya se menciona en párrafos anteriores de esta sección (2.3.1.2), las variaciones interanuales en estas propiedades fueron distintas en este estrato respecto al superficial. No obstante, y salvo algunas excepciones, la tendencia estacional (intra-anual) observada fue en general similar a lo detallado anteriormente para la superficie del suelo. Las diferencias subsuperficiales registradas en 2016 para el COA y COP fueron significativas, algo que no había ocurrido en superficie, aumentando en noviembre $0,50 \text{ t ha}^{-1}$ (5,9 %) para el caso del COA, mientras que el COP al mismo tiempo registró una caída de $0,60 \text{ t ha}^{-1}$ (27,6 %). En 2017, el COT y COA mostraron diferencias intra-anales significativas, al aumentar en noviembre respecto a junio $0,97 \text{ t ha}^{-1}$ (8,2 %) y $0,67 \text{ t ha}^{-1}$ (7,0 %), respectivamente, mientras que el COP no mostró cambios significativos entre fechas de muestreo de ese mismo año, algo que si había sido observado en superficie. Studdert et al. (2015) a los nueve años de iniciado un ensayo de rotaciones de cultivos bajo SD, implementado sobre un Molisol de la provincia de Buenos Aires, encontraron en el estrato de 5 a 20 cm incrementos estacionales para el COT y COA del 5,9 % y 4,4 %, respectivamente y una caída en el COP del 23,1 %. Estas diferencias porcentuales son muy similares a las encontradas en la presente tesis.

De acuerdo con los resultados obtenidos, las distintas fracciones del carbono fueron suficientemente dinámicas como para registrar modificaciones entre años. No obstante y de la misma manera que en superficie, estas variables no generaron diferencias

entre los distintos tratamientos luego de cuatro años de iniciado el ensayo. Sin embargo, entre los 5 y 20 cm de profundidad, el índice de intensificación de cultivos agrícolas para gramíneas calculado para el periodo 2014-2016 (ICC_{P1}), obtuvo un coeficiente de correlación significativo con el COT (p -valor=0,0077, coeficiente de correlación=0,97) y con el COA (p -valor=0,0451, coeficiente de correlación=0,89) registrados en junio de 2016. A su vez, en junio de 2017 el COP obtuvo un coeficiente de correlación significativo con el índice de intensificación de la secuencia agrícola calculado para el período 2014-2017 (ISI_{P2}) (p -valor=0,0440, coeficiente de correlación=0,89). Al analizar el estrato superficial, se comprobó un comportamiento similar en esta última relación, por lo que el incremento en la intensificación de la secuencia de cultivos generó al cuarto año de iniciado el ensayo, un aumento en el stock de COP para los 20 cm de profundidad.

En línea con estos resultados, Castiglioni et al. (2013) trabajando sobre tres suelos con características composicionales y taxonómicas contrastantes ubicados en Pergamino (Buenos Aires), Bengolea (Córdoba) y Viale (Entre Ríos), determinaron para los primeros 10 cm de profundidad una correlación significativa entre el ISI y el COP. Estos autores concluyeron que el mayor tiempo de ocupación del terreno por cultivos en estado de desarrollo, provocaron efectos favorables sobre el incremento del carbono lábil del suelo.

Distintos trabajos han indicado que la intensificación en la sucesión de cultivos agrícolas junto con la incorporación de gramíneas, aumentan tanto la calidad como la cantidad de los residuos que son incorporados al suelo (Sánchez y Arrigo 2006; Caviglia y Andrade 2010), lo que lleva a incrementos en algunas de las fracciones del carbono orgánico, sobre todo las más lábiles. Por lo tanto, habría que continuar durante más tiempo evaluando el comportamiento del carbono en el ensayo bajo estudio, de manera de establecer si se consolidan o no las tendencias observadas a partir del análisis de correlación.

2.3.2 Variación estacional, interanual y entre tratamientos de la densidad aparente (DAP) para ambas profundidades

En la Tabla 2.4 se muestran los resultados del análisis de varianza de esta propiedad para los dos años de muestreo y para ambas profundidades., En ambos estratos no hubo interacción entre los efectos de los tratamientos y las fechas de muestreo. Entre los 5 y 20 cm de profundidad se determinó un efecto sobre la DAP, tanto del momento

de muestreo como de la distinta sucesión de cultivos implementada, mientras que esto no ocurrió en superficie.

Tabla 2.4 Análisis de los efectos de las secuencias de cultivos, fecha de muestreo e interacción secuencia-fecha en la densidad aparente para las dos profundidades analizadas.

Profundidad	Variable	Fecha		Secuencia		Secuencia*Fecha	
		F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor
0 a 5 cm.	DAP (gr cm^{-3})	0,9	0,4458	1,18	0,3284	0,53	0,8871
5 a 20 cm.	DAP (gr cm^{-3})	5,83	0,0012*	4,68	0,002*	1,35	0,2082

(*): diferencias estadísticas significativas ($p\text{-valor} < 0,05$); DAP: Densidad aparente

2.3.2.1 Densidad aparente en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm

En el estrato de 0 a 5 cm, los valores promedios de la DAP variaron entre 1,35 gr cm^{-3} y 1,33 gr cm^{-3} , sin registrarse diferencias entre los distintos tratamientos ni entre fechas de muestreo. Esto último, es coincidente con los resultados obtenidos por Nazar y Galizzi (2018), quienes no registraron diferencias en la DAP en los primeros 10 cm de suelo luego de cuatro años de iniciado un ensayo de rotaciones con cultivo de algodón, trigo, soja y maíz, en un Haplustol torriorténtico del área de riego de Santiago del Estero bajo SD. A su vez, Galizzi et al. (2014) trabajando en otro ensayo de rotaciones situado en una región geográfica y suelo similar, tampoco obtuvieron diferencias en la DAP de los primeros 10 cm de profundidad de distintas sucesiones de cultivos, registrando una densidad del suelo de 1,25 gr cm^{-3} luego de 6 años de implementar los tratamientos. Oneto et al. (2005a), especificaron que los suelos agrícolas del campo experimental del INTA Santiago del Estero, presentan densidades aparentes que varían entre 1,17 a 1,33 gr cm^{-3} para los primeros 10 cm de suelo, dependiendo estos resultados de los años bajo agricultura y del manejo implementado. Los valores de DAP determinados en la presente tesis, se encuentran en el margen superior del intervalo de valores mencionado por estos autores.

Al evaluar el efecto que las distintas sucesiones de cultivos generaron sobre la DAP, se encontró en los primeros 5 cm de profundidad que los valores de esta propiedad correspondientes al año 2016, obtuvieron un coeficiente de correlación significativo con el ICC_{P1} ($p\text{-valor}=0,0472$, coeficiente de correlación=0,88), mientras que dicho comportamiento no se volvió a corroborar en 2017 con el ICC_{P2}. Lo antes mencionado indica que, hasta el tercer año del ensayo, la densidad aparente se incrementó en el

tratamiento con una mayor frecuencia de cultivos en el año, llegando a un valor que no se modificó al siguiente año a pesar de mantener la condición de mayor tránsito de maquinaria. Contrariamente, Kraemer (2015) registró una correlación negativa entre el ISI y la DAP de los primeros 5 cm de profundidad. Sin embargo, dicho autor reportó que este resultado es como consecuencia de haber incorporado los valores de DAP del suelo prístino dentro de conjunto de datos.

2.3.2.2 Densidad aparente en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm

En la Figura 2.3.a se muestran los valores de DAP determinados a la capa de suelo comprendida entre los 5 a 20 cm de profundidad para las cuatro fechas de muestreo. De la misma se desprende que no hubo diferencias entre años para esta propiedad, aunque si existió una variación significativa intra-anual en 2016. En noviembre de dicho año (cinco meses posteriores a la cosecha de algodón), la DAP sufrió una caída del 5 % respecto a junio de 2016, obteniéndose un valor de $1,31 \text{ gr cm}^{-3}$. Por su parte, durante 2017 se registró una nueva densificación significativa del suelo, estabilizándose los valores de DAP alrededor de $1,35 \text{ gr cm}^{-3}$. Comparando estos valores con los encontrados en superficie, se comprueba el grado de densificación desarrollado por estos suelos en los primeros centímetros, ya que normalmente bajo SD el estrato subsuperficial es el que se encuentra más compactado (Imbellone y Álvarez 2018).

Díaz-Zorita et al. (2004), mencionaron que algunos de los factores que influyen sobre la DAP son el contenido de materia orgánica aportada por los sistemas radiculares, la secuencia de cultivos con sus respectivos patrones de crecimientos radicular y el manejo del tránsito de la maquinaria agrícola. Sin embargo, la evolución de esta propiedad también depende de los años bajo SD, del tipo de suelo y del estado inicial de degradación física que el mismo presente (Castiglioni et al. 2013; Basanta et al. 2014).

En base a lo mencionado, el mayor valor de la DAP registrado en esta tesis, durante junio de 2016, podrían ser resultado de los siguientes factores: Por un lado, a la presencia generalizada (en los cinco tratamientos) de raíces pivotantes de un finalizado cultivo de algodón, cuyo patrón de crecimiento no propician la formación de poros en gran parte de la masa de suelo, sino que lo hacen sólo en el área proximal de la raíz principal. Por otro lado, las características de la maquinaria usada en la cosecha de este cultivo y la ausencia de control de tránsito en el lote.

Galizzi et al. (2014) y Nazar y Galizzi, (2018), analizando ensayos de 6 y 3 años respectivamente, con rotaciones de cultivos en SD y riego por manto en Haplustoles torriorténticos de Santiago del Estero, encontraron que los valores de DAP entre los 5 y 10 cm de profundidad se incrementaban con el transcurso de las campañas agrícolas. Ambos autores señalaron que estos aumentos eran graduales en el tiempo, y que los mismos no superaban el 10 % por cada ciclo de cultivo. El tránsito de la maquinaria para siembra, aplicaciones de agroquímicos y cosecha, sumado al riego por manto, serían los factores que generarían el incremento en la densidad aparente. Esto significa que el aumento en las tareas culturales tiende a densificar este tipo de suelos, contrarrestando el efecto positivo de las raíces de cultivos, que reducen la densidad en la zona rizosférica como es señalado por Morán et al. (2000). Sin embargo, en el estrato de 5 a 20 cm de profundidad de este trabajo de tesis, no se encontró un efecto acumulativo del paso de la maquinaria agrícola sobre la densificación del suelo, encontrando la DAP un valor aparentemente máximo, sin incrementar el mismo con el paso del tiempo.

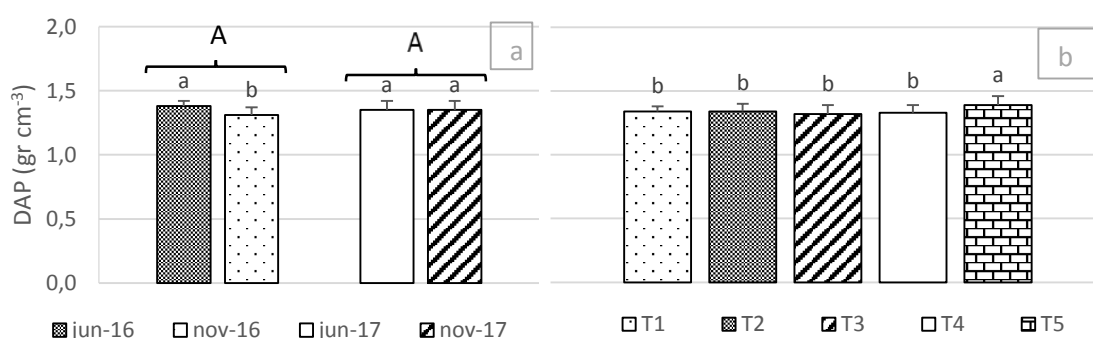


Figura 2.3. a) Resultados de DAP entre los 5 y 20 cm de profundidad en las cuatro fechas de muestreo: junio 2016 (jun-16), noviembre 2016 (nov-16), junio 2017 (jun-17), noviembre 2017 (nov-17). Letras mayúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre los años 2016 y 2017. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre fechas de muestreo. b) Resultados de DAP entre los 5 y 20 cm de profundidad correspondientes a los cinco tratamientos evaluados. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos.

Nazar y Galizzi (2018) en su ensayo de rotaciones que contempló al algodón, soja, maíz y trigo, obtuvieron entre los 10 y 20 cm de profundidad, un valor de DAP de $1,35 \text{ gr cm}^{-3}$ en el inicio del estudio y una reducción promedio del 3,2 % cuatro años después. Por su parte, Basanta et al. (2014) trabajando en un Haplustol de textura franco limosa de la provincia de Córdoba, con 6 años bajo SD y con una sucesión de cultivos soja y maíz, reportaron valores promedio de DAP (5 a 20 cm) de $1,34 \text{ gr cm}^{-3}$, similares

a los registrados en el presente estudio. Galizzi et al. (2014) en un trabajo detallado previamente, encontraron una menor DAP entre los 10 a 20 cm de profundidad ($1,27 \text{ gr cm}^{-3}$) a la registrada en el presente trabajo. Por su parte, Oneto et al. (2005a) citaron que entre los 10 a 20 cm, los valores de DAP en lotes bajo agricultura del campo experimental del INTA Santiago del Estero, estaban entre $1,29$ y $1,50 \text{ gr cm}^{-3}$ y que esos valores eran dependientes de los años de agricultura y tipo de manejo agrícola implementado. De acuerdo con estas referencias, la DAP (5 a 20 cm) determinada en el presente trabajo de tesis fue similar a la registrada por algunos autores para iguales suelos y en algunos casos para el mismo sitio geográfico y manejo agrícola.

Al comparar el efecto de las secuencias de cultivos a esta profundidad (Figura 2.3.b), se determinó que T5 registró un valor de DAP significativamente mayor respecto a los restantes tratamientos que presentaron un solo cultivo por año, los que a su vez no mostraron diferencias entre sí. Nazar y Galizzi (2018) al tercer año de iniciado un ensayo de sucesiones de cultivos, registraron para la profundidad de 10 y 20 cm, diferencias significativas en esta propiedad entre el monocultivo de algodón ($1,37 \text{ gr cm}^{-3}$) y la rotación maíz-algodón-algodón-maíz ($1,29 \text{ gr cm}^{-3}$). Dichos autores explicaron que estas diferencias eran causadas por las particularidades de los distintos sistemas radiculares presentes en cada secuencia. De esta manera la raíz de cada cultivo generaría efectos que se acumulan entre campañas agrícolas, modificando el espacio poroso del estrato sub-superficial y consecuentemente su DAP.

El análisis de correlación efectuado entre la DAP promedio, determinada en el estrato de 5 a 20 cm para cada tratamiento, y el ISI_{P2} fue significativo ($p\text{-valor}=0,002$; coeficiente de correlación= $0,98$). Teniendo en cuenta estos resultados y los mostrados en la Figura 2.3.b, se puede inferir que el mayor valor de esta propiedad registrado en T5, es producto de la mayor intensificación en la sucesión de cultivos, que implica mayor tránsito de maquinaria. El doble cultivo anual genera un mayor tránsito de la maquinaria agrícola, lo que provoca un proceso de densificación a esta profundidad del suelo, siendo este efecto superior a los posibles beneficios que generaría la incorporación de una gramínea invernal en la sucesión de cultivos.

Los resultados de esta propiedad mostraron en superficie un alto nivel de densificación del suelo, por lo cual aparentemente no podrían manifestarse las posibles diferencias generadas por los distintos tratamientos ni tampoco los cambios estacionales debidos al pasaje de la maquinaria, al riego y/o al crecimiento de las raíces de los cultivos. Sin embargo, a mayor profundidad y pese a presentar este estrato un nivel de

densificación similar al superficial, se comprobó una mayor dinámica estacional de esta propiedad, lo mismo que se corroboró que el mayor tránsito de maquinaria resultante de la implementación del doble cultivo anual aumentó la DAP.

2.3.3 Variación de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) entre los tratamientos, estaciones del año y años evaluados.

Oneto y Ferreiro (2011) de manera similar que lo visto en otros suelos, determinaron en Haplustoles torriorténticos de la zona de riego del Rio Dulce, que la RMP de los primeros 20 cm de profundidad variaba en forma inversa con el contenido de humedad, llegando a los 3,1 MPa en suelo húmedo, 4,6 MPa en suelo friable y 5,2 MPa con suelo seco. Por lo tanto, las determinaciones de esta propiedad en el presente estudio fueron realizadas tres días después de un riego, buscando uniformidad en el contenido hídrico de los distintos tratamientos y entre las distintas fechas (Tabla 2.5). Por el mismo motivo, no se registró una correlación significativa entre los valores de humedad y la RMP (p -valor = 0,0933 y 0,2328 para las profundidades de 0 a 5 cm y 5 a 20 cm, respectivamente). El valor medio de la humedad gravimétrica para el estrato superficial fue de 21,3 % registrándose máximos de 21,4 % y mínimos de 20,4 %, mientras que en el estrato más profundo se obtuvo un promedio de 21,4 % con valores máximos de 20,9 % y mínimos de 20,0 %.

Tabla 2.5: Análisis de varianza de la humedad gravimétrica del suelo (% p/p) para la profundidad de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm.

Efecto	Humedad gravimétrica del suelo (% p/p)			
	Profundidad de 0 a 5 (cm)		Profundidad de 5 a 20 (cm)	
	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor
Secuencia	0,86	0,53090	1,4	0,2220
Tiempo	1,94	0,12950	1,52	0,2160
Tiempo*Secuencia	1,26	0,25900	0,43	0,9485

(*): diferencias estadísticas significativas (p -valor < 0,05).

En la Tabla 2.6 se presentan los resultados del análisis de varianza de la RMP para ambas profundidades estudiadas. En ella se observa, de la misma forma que con la DAP, que existió entre los 5 y 20 cm de profundidad un efecto del momento de muestreo y de la sucesión de cultivos. Por su parte y de manera diferente al comportamiento de la

DAP, esta variable mostró en los primeros 5 cm una interacción significativa fecha*rotación.

Tabla 2.6: Análisis de los efectos de las secuencias de cultivos, fecha de muestreo e interacción secuencia-fecha en la RMP para las dos profundidades analizadas.

Profundidad	Variable	Fecha		Secuencia		Secuencia*Fecha	
		F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor
0 a 5 cm.	RMP (MPa)	45,54	<0,0001	7,21	0,0001	3,36	0,0006*
5 a 20 cm.	RMP (MPa)	9,66	<0,0001*	11,74	<0,0001*	1,11	0,3617

p-valor < 0,05 muestra diferencia significativa (); RMP: Resistencia mecánica a la penetración.*

2.3.3.1 RMP en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm

En el año 2016 no hubo diferencias en superficie entre tratamientos, independientemente del momento en que se realizaron las mediciones (Figuras 2.4.a y 2.4.b). Por su parte, T2 y T5 presentaron en junio de 2017 valores 32,9 % y 27,8 % menores ($p < 0,05$), respecto a T3 (Figura 2.4.c). Un comportamiento similar ocurrió en noviembre de 2017, ya que los valores de RMP correspondientes a T2 y T5 fueron, en esta ocasión, significativamente menores a los restantes tratamientos (Figura 2.4.d).

De acuerdo con la bibliografía (Cáceres Días et al. 2008; Wilson et al. 2010; Galizzi et al. 2014), este comportamiento podría estar asociado a la incorporación del cultivo de soja, cuyas raíces pivotantes de rápida degradación junto con los exudados de dicha biodegradación, habrían generado la reducción de la RMP a fines de 2016 en las rotaciones T2 y T5. Por su parte, en la misma fecha antes mencionada, el T1 y T3 recibieron algodón y en T4 hubo maíz, cuyos restos de raíces son mas difíciles de degradar que los del cultivo de soja. Wilson et al. (2010) trabajando sobre un Argiudol ácuico con 26 % de arcilla en superficie y con 15 años de SD, encontraron entre los 0 y 5 cm de profundidad, que las sucesiones de cultivo donde había soja (monocultivo de soja, trigo/soja, trigo/soja-maíz) mostraban valores de RMP menores al monocultivo de maíz. Cáceres Días et al. (2008) si bien no encontraron diferencias en la RMP superficial de parcelas con distintos abonos verdes, comprobaron que la utilización del cultivo de soja como abono verde e incorporado al suelo previo al cultivo de algodón, tendió a lograr la menor RMP en un Haplustol óxico y un Argiacuol vértico de la provincia del Chaco. Galizzi et al. (2014) al analizar el efecto de 10 secuencias de cultivo bajo SD y riego por manto en un Haplustol torriorténtico de la zona de riego del Rio Dulce de Santiago del

Estero, no lograron detectar diferencias significativas en la RMP superficial de los distintos tratamientos evaluados. Sin embargo, dicho estudio mostró al monocultivo de soja con el valor más bajo de RMP (0,38 MPa), mientras que el monocultivo de algodón obtuvo 0,56 MPa y los tratamientos con doble cultivo anual llegaron hasta los 0,63 MPa. Si las mediciones de RMP son realizadas donde los sistemas radicales son muy densos, las raíces podrían estar influyendo en los resultados al interferir en el paso del cono del penetrómetro (Imbellone y Álvarez 2018). Por lo tanto, el comportamiento registrado en este trabajo, con valores más bajos de RMP en las parcelas con cultivo antecesor soja, podría estar asociado a las características de la raíz de dicho cultivo, que al ser pivotante presentaría una menor ramificación en los primeros 5 cm de suelo respecto a la de los otros cultivos en desarrollo.

En los primeros 5 cm de profundidad se observó un comportamiento temporal de la RMP bastante similar entre tratamientos (Figura 2.4). En el muestreo de noviembre 2016 hubo un decaimiento significativo en los valores de T1, T2 y T5 respecto a lo registrado en junio del mismo año. En junio de 2017 se produjo un incremento significativo del RMP en todas las parcelas cuando se compara con noviembre de 2016 quedando, estos valores constantes durante noviembre de 2017 en T2, T3, T4 y T5, mientras que los de T1 volvieron a aumentar en esta última fecha de muestreo. Si se compara la RMP entre distintos años, pero para igual período, el mes de noviembre registró las mayores diferencias ya que todos los tratamientos en 2017 vieron incrementar significativamente sus valores respecto a los de 2016, mientras que en junio solo el T4 aumentó significativamente entre 2016 y 2017.

A pesar de los cambios estacionales registrados, los valores de RMP en ninguna de las fechas evaluadas superaron el límite crítico mencionado en la bibliografía. En este sentido, Drganc et al. (2000) establecieron a este límite crítico en 2 MPa, por encima del cual se ralentiza el crecimiento radicular. Díaz-Zorita (2004) ubicó al mismo en 2.9 MPa, mientras que Venialgo et al. (2004) propusieron para el cultivo de algodón un valor crítico de 2.5 MPa.

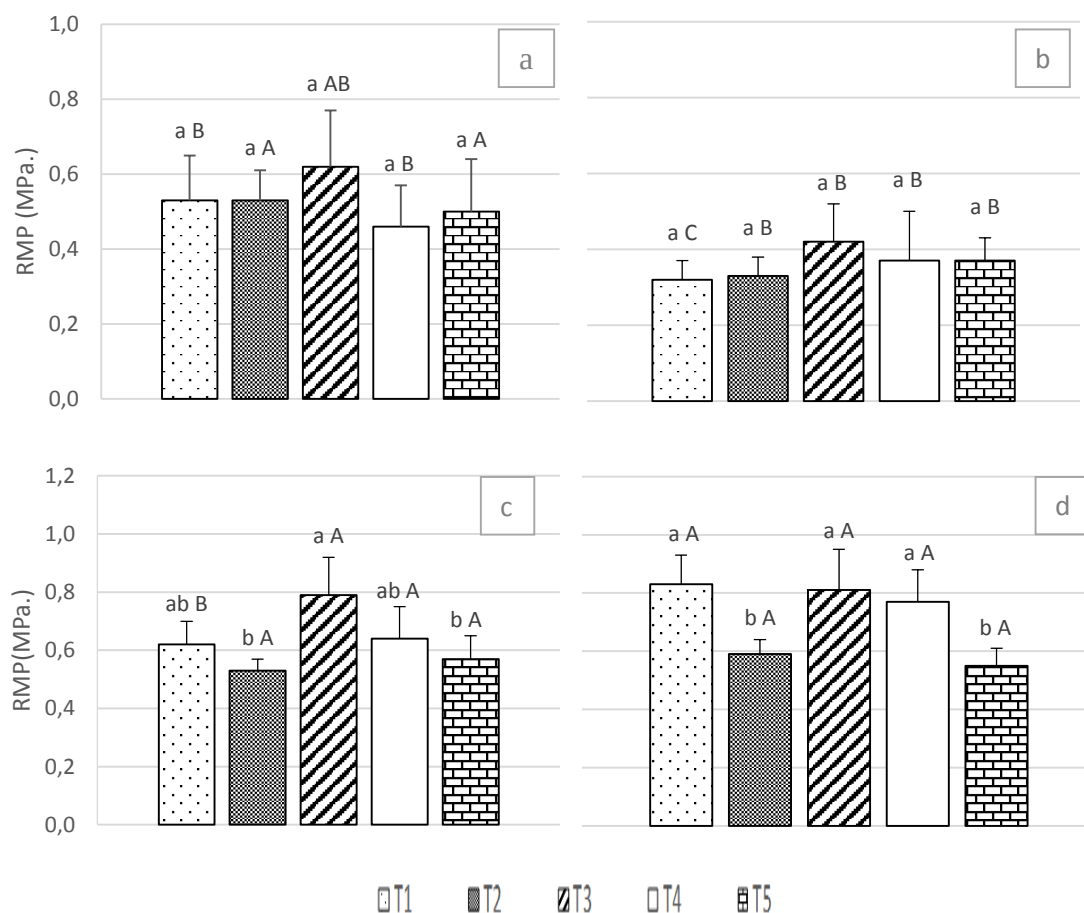


Figura 2.4 Resultados de RMP entre los 0 y 5 cm de profundidad correspondientes a los cinco tratamientos evaluados. a) fecha 1 (jun-16), b) fecha 2 (nov-16), c) fecha 3 (jun-17), d) fecha 4 (nov-17). Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos para cada fecha de muestreo. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre fechas de muestreo para cada tratamiento evaluado.

La RMP de los primeros 5 cm de los distintos tratamientos osciló en promedio entre 0,32 y 0,83 MPa, lo cual no coincide con lo registrado por Moro et al. (2016), quienes determinaron valores superiores de RMP en la superficie del suelo. Los mencionados autores encuentran niveles de compactación que oscilaron entre 0.8 y 2.0 MPa, para un Argiustol údico de textura franco arcillo limosa, con una alta humedad gravimétrica a lo largo del perfil ubicado en la provincia del Chaco, sobre el cual se realizó algodón en rotación con trigo, soja y sorgo bajo SD. Sin embargo, los resultados de esta tesis son coincidentes con los registrados por Nazar (2018) donde se encontró valores de RMP entre 0,65 y 0,85 MPa en los primeros 5 cm de profundidad correspondiendo a una humedad gravimétrica del suelo promedio de 15%. También se asemejan a los obtenidos por Galizzi et al. (2014) con una humedad de suelo de 22,1 %, donde la RMP promedio superficial correspondiente al monocultivo de algodón fue 0,57

MPa, mientras que en el doble cultivo anual obtuvo un resultado promedio de 0,50 MPa. Por su parte, Cáceres Días et al. (2008), sobre un Haplustol óxico y Argiacuol vértico de Las Breñas (Prov. de Chaco), determinaron la RMP sobre el cultivo de algodón en sucesión con sorgo granífero, moha, soja y testigo sin abono verde, registrando valores de 0,86 MPa y 0,35 MPa para una humedad cercana a capacidad de campo. Estos antecedentes están mostrando que los valores determinados en el presente trabajo se encuadran dentro de los esperables para la región, el tipo de manejo agrícola y para la profundidad evaluada. Además, no se estaría generando con estos sistemas de producción un efecto negativo sobre el crecimiento y desarrollo de las raíces.

2.3.3.2 RMP en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm

De manera diferente a lo determinado con la DAP, las parcelas bajo el doble cultivo anual lograron el valor más bajo de RMP diferenciándose de T1, T3 y T4, quienes obtuvieron los mayores valores para esta propiedad (Figura 2.5.a). Contrariamente, Wilson et al. (2010) encontraron que el doble cultivo anual bajo SD generaba los valores más altos entre los 5 y 20 cm, al ser comparados con los aportados por distintas situaciones que presentaban un solo cultivo anual. Por su parte Galizzi et al. (2014) y Nazar y Galizzi (2018), trabajando a igual profundidad y sobre el mismo suelo y zona de estudio que el elegido para la realización de esta tesis, no registraron diferencias en los valores de RMP entre secuencias de cultivo que presentaban uno y dos cultivos anuales. Por lo tanto, el mayor tránsito de la maquinaria en la rotación trigo/cultivo de verano (T5), incidió en los resultados de la DAP (Figura 2.3.b) pero no fue un factor determinante para el incremento de la RMP, sino que por el contrario redujo el valor de esta propiedad. Este comportamiento podría estar asociado a las características del entramado radicular de los cultivos que intervinieron previo a cada muestreo. En este sentido, las parcelas que recibieron soja en la última campaña evaluada (T2 y T5), le permitieron al penetrómetro un desplazamiento más libre entre los 5 a 20 cm del suelo, debido a las características del desarrollo de la raíz de dicho cultivo (pivotante y menos ramificada) y a la facilidad de sus tejidos radiculares para ser degradados. A lo antes mencionado se le sumaría el efecto positivo del cultivo de trigo, que generaría a partir de su sistema radicular un período extra de actividad biológica en el suelo, y que luego de su degradación se generarían bioporos.

El tratamiento con mayor RMP en el estrato subsuperficial fue T3, siendo a su vez el único con un valor superior a los 2 MPa (Figura 2.5.a). Un comportamiento similar fue reportado por Nazar y Galizzi (2018), quienes en un ensayo de rotaciones montado sobre un Haplustol torriorténtico bajo riego, registraron que la combinación soja-algodón-algodón mostró los valores más altos de RMP entre 5 y 20 cm de profundidad, superando también los 2 MPa.

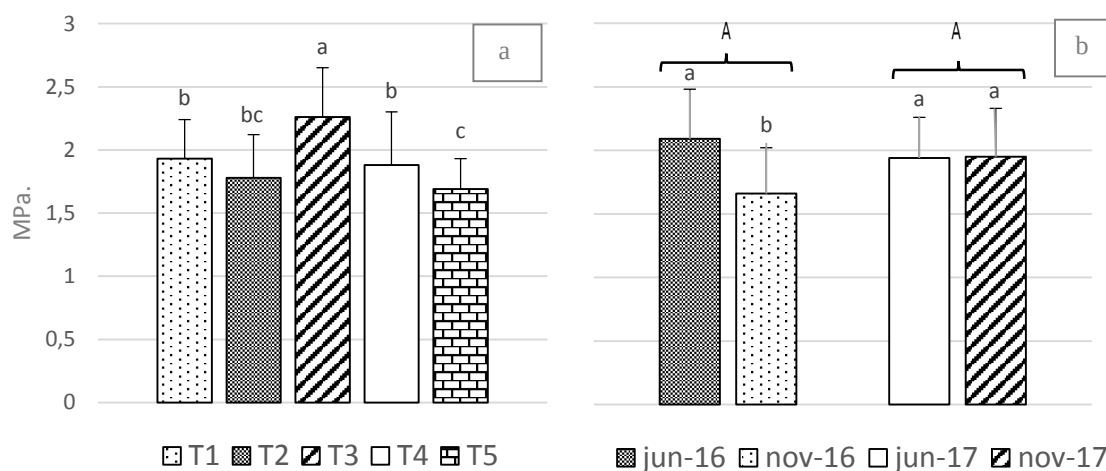


Figura 2.5. a) Resultados de RMP entre 5 y 20 cm de profundidad para los cinco tratamientos evaluados. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos. b) Resultados de RMP entre 5 y 20 cm de profundidad para las cuatro fechas de muestreo realizadas. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre fechas de muestreo. Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre años.

En la bibliografía se menciona que bajo SD existe un proceso de compactación en los primeros centímetros del suelo, producto del paso continuo de la maquinaria agrícola sin remoción del suelo por la labranza (Musso et al. 2004; Botta et al. 2007; Álvarez et al. 2009a; Paladino 2014; Iglesias et al. 2014; Nouri et al. 2019). En el presente trabajo este comportamiento se vio reflejado fundamentalmente en el estrato de 5 a 20 cm, donde se obtuvieron valores de RMP superiores a 1,5 MPa, mientras que en el estrato superficial los mismos estuvieron por debajo de 0,9 MPa (Figuras 2.4 y 2.5). Este proceso de compactación subsuperficial no se acentuó entre los años evaluados (Figura 2.5.b). En este sentido y a pesar de registrarse una reducción significativa del 25.9 % en la RMP entre julio y noviembre de 2016, los valores de 2017 no se diferenciaron de los de junio de 2016. De esta manera, a esta profundidad solo se registró una reducción en esta

propiedad en el muestreo de noviembre de 2016, manteniéndose en las restantes fechas en valores similares (Figura 2.5b).

La RMP mostró en superficie mayor dinámica que la DAP, registrando oscilaciones durante los dos años de muestreo, a pesar de que la humedad del suelo no varió significativamente entre las mencionadas fechas. No obstante, en ningún momento se alcanzaron valores críticos que disminuyeran el crecimiento radicular. Las diferencias registradas de RMP entre tratamientos a dicha profundidad, estuvieron más asociadas al cultivo previo que a la rotación, ya que los menores valores obtenidos en 2017 responderían a la presencia previa del cultivo de soja. A mayor profundidad, si bien se observaron cambios estacionales, se registró una menor dinámica que en superficie. Por su parte, y de manera diferente que lo ocurrido con la DAP, la implementación del doble cultivo anual redujo la RMP subsuperficial, siendo el T3 el único tratamiento a esta profundidad que superó el valor crítico para el crecimiento radicular.

2.3.4 Variación de la estabilidad estructural entre los tratamientos y años evaluados

2.3.4.1 Pretratamiento de Humedecimiento rápido (DMP_{hr}).

2.3.4.1.1 DMP_{hr} en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm

El pretratamiento de humedecimiento rápido permite fundamentalmente evaluar los mecanismos de resistencia del agregado a la presión que ejerce el aire en su interior, además de que un alto contenido de carbono joven y los subproductos de la actividad biológica, permiten una difusión más lenta del agua hacia el interior del agregado, lo que posibilita una salida del aire interno sin destruir el agregado. En el presente trabajo se comprobó que en superficie hubo diferencias significativas en DMP_{hr} generadas por el diferente manejo y por el efecto del tiempo (Tabla 2.1).

En la Figuras 2.6.a y 2.6.b se observa el efecto sobre esta propiedad de las distintas sucesiones de cultivo y del momento de muestreo, respectivamente. De su análisis surge que el tratamiento con mayor resistencia al estallido fue el que presentó el doble cultivo anual, con mayor diversidad de vegetación y permanencia de raíces en crecimiento durante el año (T5). Luego se ubicó T4, con un cultivo de maíz en la campaña

2016/17. Este último tratamiento logró un valor de DMP_{hr} de 0,38 mm, siendo al menos un 7,9 % más resistente que aquellos que recibieron algodón en los dos últimos años de evaluación (T1 y T3). Por su parte, el tratamiento con soja en la campaña 2016/17 (T2), cuyo DMP_{hr} fue 0,37 mm, se diferenció de T5 y T3, siendo un 10,8 % menos resistente que T5 y un 13,5 % más resistente que T3.

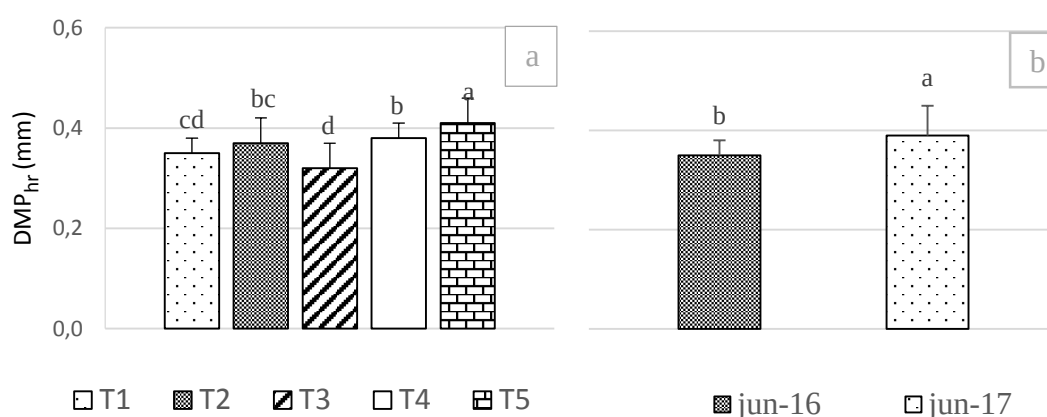


Figura 2.6. Resultados del pretratamiento humedecimiento rápido (DMP_{hr}) (0 a 5 cm): a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos años de muestreo. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos o entre fechas de muestreo.

Por lo expuesto, la presencia de trigo en el doble cultivo anual le da a la secuencia T5 una ventaja en lo que respecta a la resistencia del suelo al efecto estallido de los agregados. Las gramíneas durante su crecimiento desarrollan raíces fibrosas y extensas, con gran capacidad de influir positivamente en la formación y estabilización de los agregados del suelo (Bronick y Lal 2005). La permanencia de raíces vivas durante una mayor parte del año, implica actividad biológica asociada a la rizósfera durante más tiempo, que redunda en una mejor agregación del suelo. Cosentino et al. (2006) en base a la incubación de rastros adicionales al suelo, observaron un incremento en la actividad microbiana que consecuentemente aumentó la estabilidad de los agregados. Estos autores expusieron que dicho comportamiento estaría influenciado por el aumento de la cohesión y la hidrofobicidad de los agregados. La hidrofobicidad logra una disminución en el efecto del estallido por el aire entrampado, a partir de la reducción en la velocidad de mojado del agregado, facilitando de esta manera la salida del aire (Sullivan 1990; Jouany et al. 1992). La materia orgánica es considerada otro de los agentes principales que favorecen la agregación del suelo y que explica parte de las

variaciones observadas en la estabilidad de la estructura (Pinheiro et al. 2004; Six et al. 2004; Agostini et al. 2012). Novelli et al. (2013) la identificaron como el factor determinante en la estabilidad de los agregados en Molisoles. Kraemer (2015) también registró en Molisoles bajo SD de la región chaco-pampeana, una asociación positiva entre el COT, su fracción más lábil (COP) y el DMP_{hr} . Por su parte, Paladino (2014) analizando los primeros 10 cm de Hapludoles de la pampa arenosa bajo distintos usos, expuso que los mayores valores de DMP_{hr} podían ser atribuidos en parte al mayor contenido de carbono orgánico del suelo.

En los primeros 5 cm de suelo del presente trabajo, se encontró un aumento en la resistencia al efecto estallido entre junio 2016/17 (Figura 2.6.b) que se asocia positivamente con el COT y del COA. En este sentido el DMP_{hr} registró una correlación positiva con el COT (p-valor= 0,0354, coeficiente de correlación= 0,90) y con el COA (p-valor= 0,0464, coeficiente de correlación= 0,88), lo que estaría indicando que ante aumentos en los valores del carbono orgánico total y asociado, la resistencia a la desagregación por el efecto de estallido de los agregados del suelo se incrementaría. El mayor retorno al suelo de residuos vegetales favorece la adición de agentes orgánicos de agregación (Tisdall y Oades 1982), pudiendo contribuir al incremento de la estabilidad de agregados (Álvaro-Fuentes et al. 2009), que en consecuencia retroalimenta el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (Wood et al. 1991; Shaver et al. 2003; Sherrod et al. 2003). El efecto del carbono orgánico sobre la disgregación por efecto estallido, se debe a su rol como agente cementante, incrementando la cohesión entre agregados (Tisdall y Oades 1982), disminuyendo la velocidad de entrada de agua a estas estructuras, permitiendo una salida más lenta del aire (Chenu et al. 2000; Cosentino 2006), entre otros mecanismos. A su vez, se comprobó una correlación negativa y significativa entre el DMP_{hr} superficial y la RMP determinada a la misma profundidad (p-valor= 0,0498, coeficiente de correlación= 0,87), por lo que la disminución en la estabilidad de los agregados aumentaría el proceso de compactación o, el endurecimiento de estos suelos.

2.3.4.1.2 DMP_{hr} en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm

El DMP_{hr} para la capa de 5 a 20 cm evidenció una interacción entre el manejo y las fechas de muestreo (Tabla 2.2), por lo que se analizó el efecto de las distintas sucesiones de cultivo en cada fecha por separado.

Al final de la campaña 2015-2016 (Figura 2.7.a), se observó que el valor de estabilidad en T5 fue significativamente superior en un 29,5% respecto a T1 y T3, mientras que T2 y T4 lograron valores intermedios y no se diferenciaron del resto de los tratamientos. Estos resultados podrían estar influenciados por los efectos generados por los cultivos intervinientes en cada rotación hasta la campaña 2015-2016. En este sentido, la presencia de soja dentro de la rotación T3 reduciría la estabilidad de agregados en igual medida que lo hace el monocultivo de algodón en T1. Por su parte, T2 y T4 al haber tenido como T3 un cultivo de maíz, pero sin la presencia de soja en la rotación, no se diferenciaron en esta propiedad de T5. La alta correlación registrada entre el DMP_{hr} y el ISI_{p1} (P valor=0,0346; coeficiente de correlación=0,90), está indicando que la intensificación en la secuencia de cultivos influyó fuertemente sobre la resistencia de los agregados al efecto estallido en esta profundidad. Kraemer (2015) y Novelli (2013) también pudieron determinar una alta correlación entre el ISI y del DMP_{hr} para distintos suelos de la región pampeana. Como ya se mencionó en párrafos anteriores, el tipo, cantidad y tiempo de vida de las raíces favorecen varios procesos que reducen la inestabilidad de los agregados, además de contribuir con el aporte de materia orgánica subsuperficial. En concordancia con estos comentarios, Kraemer (2015) expuso que el aumento en la intensificación del uso del suelo bajo SD, generaría mejoras en la resistencia al efecto estallido de los agregados, principalmente cuando dentro de las rotaciones se contempla al cultivo de maíz y se reduce la presencia del cultivo de soja.

A su vez, se pudo corroborar que al final de la campaña 2015-2016, cuando todos los tratamientos cosecharon el cultivo de algodón, hubo una correlación positiva entre el DMP_{hr} (5 a 20 cm) con el rendimiento de fibra seca de este cultivo (p -valor=0,0466, coeficiente de correlación=0,88), lo que indicaría que mejoras en la estabilidad de agregados a esta profundidad facilitarían el desarrollo de dicho cultivo, probablemente a partir de la generación de un ambiente edáfico más favorable para la proliferación de su sistema radical.

Al segundo año de muestreo, hubo un mayor grado de diferenciación en esta propiedad entre tratamientos, siendo T4 y T5 los que obtuvieron los mayores valores del DMP_{hr} , seguidos por el monocultivo de algodón, que no logró diferenciarse de T3 pero si de T2, siendo este último el que registró el valor más bajo a esta profundidad y fecha de muestreo (Figura 2.7.b). De esta manera, los tratamientos que tuvieron gramíneas entre julio de 2016 y julio de 2017 (T4 y T5) no se diferenciaron entre sí en esta propiedad, pero superaron al resto en más de un 63,4 %. Por su parte, las parcelas que

recibieron solo soja (T2) en el período antes mencionado, tuvieron el menor valor del DMP_{hr} (Figura 2.7.b).

Al analizar la evolución de cada tratamiento entre años de muestreo (Figuras 2.7 a y 2.7 b), se comprobó que T2, tratamiento con soja en la campaña 2016-2017, fue el único que no mejoró su condición estructural en junio de 2017, presentando el resto valores de DMP_{hr} superiores en 2017 respecto a 2016.

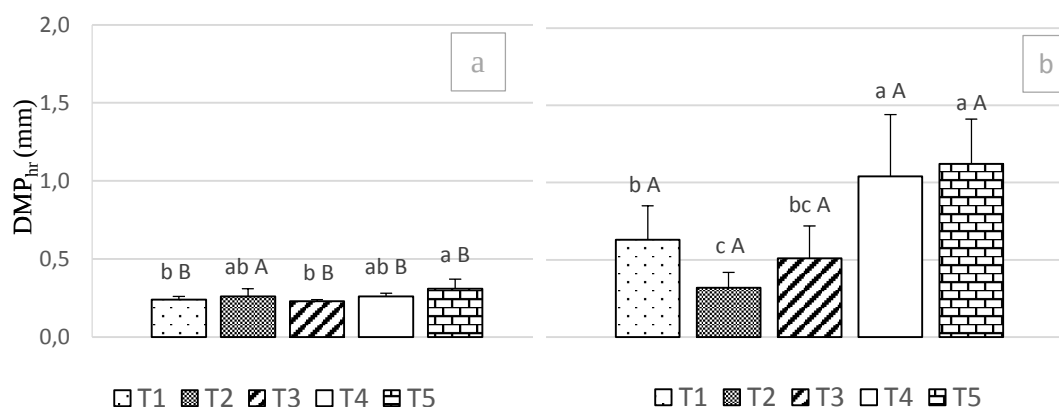


Figura 2.7. Resultados del pretratamiento de humedecimiento rápido (DMP_{hr}) (5 a 20 cm) para los cinco tratamientos. a) fecha 1 (jun-16). b) fecha 3 (jun-17). *Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos para cada fecha. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre fechas de muestreo para cada tratamiento evaluado.*

Estos resultados están en línea con los registrados por Novelli (2013) para los primeros 15 cm de Molisoles bajo distintas secuencias de cultivo. Este autor determinó que la resistencia de los agregados al efecto estallido se reducía ante una mayor presencia del cultivo de soja en la alternancia de cultivos. Chagas et al. (1995) al comparar monocultivos de soja y maíz, realizados durante quince años bajo SD en la serie Marcos Juárez, encontraron que el contenido de carbono y la estabilidad de los agregados de los primeros centímetros de suelo eran menores en las parcelas bajo soja respecto a las de maíz. Bronick y Lal (2005) trabajando con maíz, como también Wright y Hons (2005) estudiando el cultivo de algodón, mencionaron que los rastrojos de dichas especies están constituidos por cantidades importantes de compuestos fenólicos, alta relación C/N y una buena provisión de carbohidratos, determinando como consecuencia un incremento en la estabilidad de los agregados. Esta característica de los rastrojos, sumada a la de los mucílagos producidos por las raíces del maíz y trigo, que mejoran la estabilidad de los agregados (Morel et al. 1991), serían los factores determinantes en el comportamiento

del DMP_{hr} en junio de 2017 y serían la razón del bajo valor registrado en T2, ya que en este último caso no hubo presencia previa de ninguno de los cultivos mencionados.

2.3.4.2 Pretratamiento de disgregación mecánica (DMP_{dm}).

Con la previa humectación mediante el uso de un líquido no polar y miscible en agua (etanol), este pretratamiento pretende poner a prueba la cohesión de los materiales de forma independiente del efecto estallido. La humectación sin estallido y su posterior agitación en agua, permite evaluar la rotura de los agregados por disgregación mecánica, simulando el efecto que ocurre al impactar las gotas de lluvia sobre el suelo (Hénin et al. 1958). De esta manera se mide la cohesión de los agregados, aportada fundamentalmente por el contenido de arcilla y de materia orgánica (Ferrerías et al. 2007). Taboada-Castro et al. (2011) definieron a este test como el más apto para distinguir entre diferentes manejos agrícolas realizados sobre suelos arenosos, debido a que, en suelos poco cohesivos la estructuración sería altamente dependiente del carbono orgánico y la baja agresividad de este pretratamiento permitiría separar de manera más efectiva a los distintos tratamientos.

2.3.4.2.1 DMP_{dm} en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm

Los resultados de la Tabla 2.1 mostraron que hubo en el estrato superficial efectos sobre el DMP_{dm} de las distintas secuencias de cultivo y de la fecha de muestreo. El promedio general del DMP_{dm} a esta profundidad fue 2,39 mm, valor superior a los promedios determinados en DMP_{hr} y DMP_{hl} , por lo que se infiere que hubo una mayor resistencia de los agregados a la energía mecánica aplicada sobre ellos.

En la Figura 2.8.a se comprueba que T2 y T5 obtuvieron resultados significativamente mejores que T1 y T3, resultando T4 con valores intermedios, sin lograr diferenciarse de los restantes tratamientos. De acuerdo con estos resultados, este pretratamiento logró diferenciar los efectos sobre la estructura del doble cultivo anual respecto del monocultivo de algodón y de la secuencia soja-algodón-algodón. Dicho comportamiento sería atribuible a un mayor y más eficiente uso de los recursos ambientales, lo cual se genera por una presencia por más tiempo de cobertura vegetal viva, produciendo un continuo y frecuente aporte de residuos vegetales al suelo. Sin

embargo, T2 obtuvo resultados similares a T5, lo que se podría asociar a algún subproducto metabólico de corta duración producido por el cultivo de soja o por la degradación de sus restos, ya que este cultivo estuvo en la última campaña en ambos tratamientos. Por otra parte, y si bien T4 no se diferenció de ninguno de los restantes tratamientos, sus mejores resultados respecto a T1 y T3 podrían deberse al efecto favorable sobre esta propiedad del cultivo de maíz, cosechado previamente al muestreo de 2017. A su vez y coincidiendo con lo registrado a esta misma profundidad por el DMP_{hr} , en la Figura 2.8.b se comprueba que en el año 2017 los valores de DMP_{dm} de los primeros 5 cm fueron superiores a los registrados en 2016.

Paladino (2014) trabajando sobre los primeros 10 cm de profundidad de Hapludoles del noroeste de la provincia de Buenos Aires bajo SD, con dos situaciones de uso (agricultura continua y en rotación con pasturas), no logró registrar diferencias en esta propiedad entre las situaciones analizadas. Por su parte, Kraemer (2015) al estudiar los primeros 15 cm de un Haplustol de la pradera pampeana bajo tres tratamientos con manejos contrastantes bajo SD, tampoco determinó diferencias en el DMP_{dm} entre los mismos. Resultados similares obtuvo Novelli (2013) con el agregado e incubación de distintas cantidades de material vegetal sobre Molisoles.

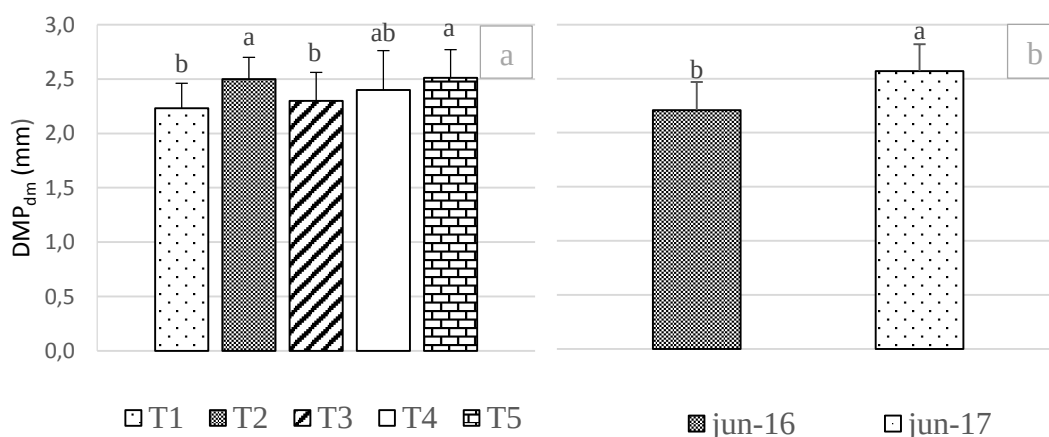


Figura 2.8. Resultados del pretratamiento disgregación mecánica (DMP_{dm}) (0 a 5 cm) a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos años de muestreo. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos o entre fechas de muestreo.

Le Bissonnais y Arrouays (1997) mencionaron que el contenido de arcilla tiene gran incidencia sobre los resultados de este pretratamiento, no obstante lo cual, entre los distintos tratamientos no se encontraron diferencias en la clase textural del suelo

superficial (Tabla 1,4). A su vez, Abiven et al. (2007) al adicionar cantidades variables de materiales orgánicos al suelo, encontraron que los valores obtenidos con este pretratamiento eran explicados en gran parte por el material orgánico recalcitrante. Sin embargo, Cosentino et al. (2006) afirmaron que el pretratamiento de disgregación mecánica tiene una capacidad menor al resto de los pretratamientos para diferenciar situaciones con distintas cantidades de materia orgánica. Coincidiendo con lo expuesto por estos últimos autores, en el presente trabajo no se registraron correlaciones significativas en el estrato superficial, entre el DMP_{dm} y el COT o con alguna de sus fracciones.

2.3.4.2.2 DMP_{dm} en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm

A esta profundidad no existió interacción entre los efectos de la fecha de muestreo y de la sucesión de cultivos (Tabla 2.2). En la Figura 2.9.a se analizan los efectos de los tratamientos, mientras que en la Figura 2.9.b el de la fecha de muestreo.

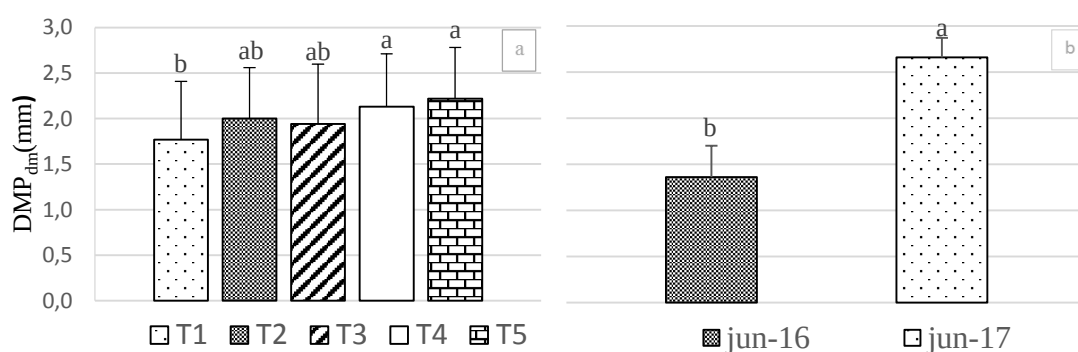


Figura 2.9. Resultados del pretratamiento de disgregación mecánica para determinar estabilidad estructural (DMP_{dm}) (5 a 20 cm): a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos años de muestreo. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$, test de Fisher) entre tratamientos o entre fechas de muestreo.

De la Figura 2.9.a, se desprende que los tratamientos que tuvieron trigo o maíz en algún año de las últimas dos campañas (T4 y T5), presentaron un valor del DMP_{dm} significativamente mayor a las parcelas con monocultivo de algodón, siendo estas diferencias de al menos un 16,9%. Al mismo tiempo, T2 y T3 no se diferenciaron de ninguno de los tratamientos analizados. Por su parte, y coincidiendo con el comportamiento general visto hasta ahora, la resistencia de los agregados a la disgregación mecánica durante el año 2017 se incrementó en un 95,6 % respecto al año 2016 (Figura 2.9.b).

Abiven et al. (2007) determinaron que el COA explicaba parte del comportamiento de la resistencia de los agregados a la disgregación mecánica. Coincidiendo con estas afirmaciones y a pesar que no se determinaron diferencias significativas en el COA y en el COT entre sucesiones de cultivos, en el presente trabajo se encontró que el DMP_{dm} promedio de cada tratamiento, presentó una correlación significativa y positiva con los valores del COA (p -valor=0,0226, coeficiente de correlación=0,93) y del COT (p -valor=0,0257, coeficiente de correlación=0,92). Esto está indicando que aquellas prácticas que tiendan a incrementar el stock de COA y COT, mejorarán la resistencia de los agregados al efecto de la disgregación mecánica producida. Corroborando estos comentarios, el ICC_{p1} y el ICC_2 presentaron a esta profundidad coeficientes de correlación significativos con el DMP_{dm} de junio 2016 (p -valor=0,0424, coeficiente de correlación= 0,89) y 2017 (p -valor=0,0313 y coeficiente de correlación= 0,91) respectivamente. Lo mencionado anteriormente, indica que el aumento en el número de gramíneas dentro de las rotaciones incrementaría la resistencia de los agregados a la disgregación mecánica. Sin embargo, Novelli (2013), no encontró entre los 5 a 15 cm de profundidad una relación significativa entre el ICC y el DMP_{dm} , pero sí con respecto al DMP_{hl} y el DMP_{hr} .

En coincidencia con lo sugerido por los resultados de esta tesis, como así también con lo expuesto por Kraemer (2015), Novelli (2013) concluyó que el incremento de la actividad biológica del suelo sumada la adición de residuos, favorecen la agregación del suelo. Este proceso se genera gracias a los agentes orgánicos de unión de agregados (Tisdall y Oades 1982), como las hifas de hongos (Abiven et al. 2007) o polisacáridos y lípidos de origen microbiano (Cosentino 2006; Abiven et al. 2007). Además, la utilización de la siembra directa puede favorecer el incremento de la materia orgánica del suelo y de los agentes orgánicos agregación, cuando se utilizan secuencias de cultivos con una mayor proporción de gramíneas (Studdert y Echeverría 2000; Dou et al. 2007; Kraemer 2015). Por su parte, Taboada-Castro et al. (2011) encuentran al test de disgregación mecánica como el más apto para distinguir entre manejos agrícolas diferentes en suelos poco cohesivos. En estos casos la estructuración es altamente dependiente del carbono orgánico, y la baja agresividad de este pretratamiento permitiría la separación de los efectos sobre la estructura de los distintos sistemas de producción.

2.3.4.3 Pretratamiento de humedecimiento lento (DMP_{hl}).

2.3.4.3.1 DMP_{hl} en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm

El pretratamiento de humedecimiento lento produce un efecto de desagregación generado por el microagrietamiento de los agregados, como consecuencia del hinchamiento diferencial de las arcillas. Por lo tanto, a mayor contenido de arcilla, mayor será el microagrietamiento. La energía de desagregación efectuada por este pretratamiento es similar a la de una lluvia de baja intensidad, siendo más adecuado para comparar tratamientos en suelos con baja estabilidad estructural (Le Bissonnais 1996; Ojeda et al. 2008). Es por ello que los valores de DMP de este pretratamiento son intermedios respecto a los de DMP_{hr} y DMP_{dm} . (Figuras 2.6.a, 2.8.a y 2.10.a). Sin embargo, el grado de diferenciación entre tratamientos de DMP_{hl} fue similar al de DMP_{hr} . Estos resultados coinciden con los de otros autores (Novelli 2013; Kraemer 2015), quienes trabajaron con distintas sucesiones de cultivos bajo SD en distintos suelos de la Región Pampeana.

De manera similar a lo ocurrido con los restantes pretratamientos a entre los 0 y 5 cm de profundidad, el DMP_{hl} del T5 obtuvo la mejor condición estructural, sin diferenciarse en esta oportunidad de T4. Lo mismo ocurrió con el monocultivo de algodón, dado que dicho tratamiento logró los resultados más bajos al igual que con el DMP_{dm} y con el DMP_{hr} , aunque en este último caso no se diferenció de T2 y T3. A su vez y mediante el DMP_{hl} , las secuencias de cultivos T2 y T3 registraron una situación intermedia y diferente de T5 y T1 (Figura 2.10.a). De esta manera, los tratamientos que tuvieron algodón en los 2 años de evaluación (T1 y T3) fueron al menos 9,5% menos resistentes al proceso de contracción-expansión diferencial de los agregados, con respecto a los que tuvieron una gramínea en el 2017 (T4 y T5). La rotación con doble cultivo anual, logro un valor de estabilidad 11,7% superior respecto al T2 y de al menos 15,1% mayor con respecto a los tratamientos con algodón en los dos años de evaluación.

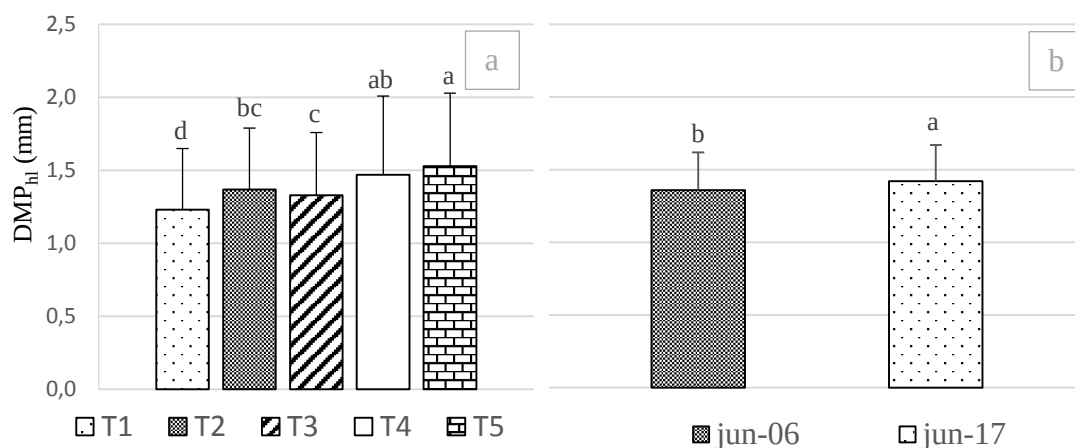


Figura 2.10. Resultados del pretratamiento humedecimiento lento (DMP_{hl}) (0 a 5 cm) a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos años de muestreo. *Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos o entre fechas de muestreo.*

Kraemer (2015) también registró un mejor comportamiento de este pretratamiento para aquellas sucesiones de cultivos que contemplaban una mayor frecuencia de gramíneas. En el presente trabajo se registró una correlación positiva entre el ICC_{P2} y el DMP_{hl} superficial promedio de cada tratamiento (p -valor=0,0174, coeficiente de correlación=0,94). Alvaro Fuentes et al. (2008), Caviglia y Andrade (2010) y Caviglia et al. (2011), mencionaron que la presencia de cobertura vegetal viva durante más tiempo, genera un aporte frecuente y continuo de residuos vegetales tanto de la parte aérea como de las raíces, favoreciendo a los agentes de agregación orgánicos temporarios y transitorios del suelo. En este sentido, Novelli (2013) para los primeros 5 cm de profundidad encontró que el DMP_{hl} presentaba los mejores resultados cuando se adicionaba al suelo residuos orgánicos. A demás del aporte de restos vegetales, el patrón de desarrollo radicular sumado a su funcionamiento y fisiología, actúan sobre la estructuración de los suelos, siendo el efecto de las monocotiledóneas superior al de las dicotiledóneas (Amezketta 1999). Todo esto nos indica que la incorporación de gramíneas y la mayor intensificación son una condición necesaria para mejorar la resistencia del suelo al efecto de desagregación generado por el microagrietamiento.

De acuerdo a lo observado en la Figura 2.10.b y de la misma manera que lo ocurrido con los restantes pretratamientos, se comprobó un incremento significativo en el DMP_{hl} del 2017 con respecto al de 2016, en este caso de un 4,5%. La mencionada mejora en el DMP_{hl}, entre junio 2016 y junio 2017 se correlaciona fuertemente correlación con el ICC_{P1} (p -valor=0,0238, coeficiente de correlación = 0,93) e ICC_{P2} (p -

valor=0,005, coeficiente de correlación = 0,97), respectivamente para las fechas antes mencionadas. Es decir que luego del tercer año de iniciado el ensayo, se incrementó la resistencia de los agregados a la destrucción por microagrietamiento cuando aumentó el número de gramíneas dentro de la sucesión de cultivos, manteniéndose este efecto al cuarto año de iniciados los tratamientos.

2.3.4.3.2 DMP_{hl} en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm

En el estrato de 5 a 20 cm, los resultados estadísticos del DMP_{hl} mostraron una interacción significativa entre el efecto de la fecha de muestreo y el de las distintas sucesiones de cultivo (Tabla 2.2).

En la Figura 2.11.a se observa que, en 2016, la T3 presentó el menor DMP_{hl} respecto al resto de las sucesiones de cultivos evaluadas, sin existir diferencias entre estas últimas. En este caso, el DMP_{hl} de T3 estuvo al menos un 25,3 % por debajo del resto de los tratamientos. Por su parte, al analizar la Figura 2.11.b se comprueba que en 2017 el comportamiento entre tratamientos fue distinto al del año previo, presentando el que tuvo maíz (T4) un mayor DMP_{hl} respecto al monocultivo de algodón (T1), ocupando los restantes valores intermedios, sin diferenciarse de T1 y T4. No obstante, la diferencia encontrada entre T1 y T4 fue superior al 37,4 %.

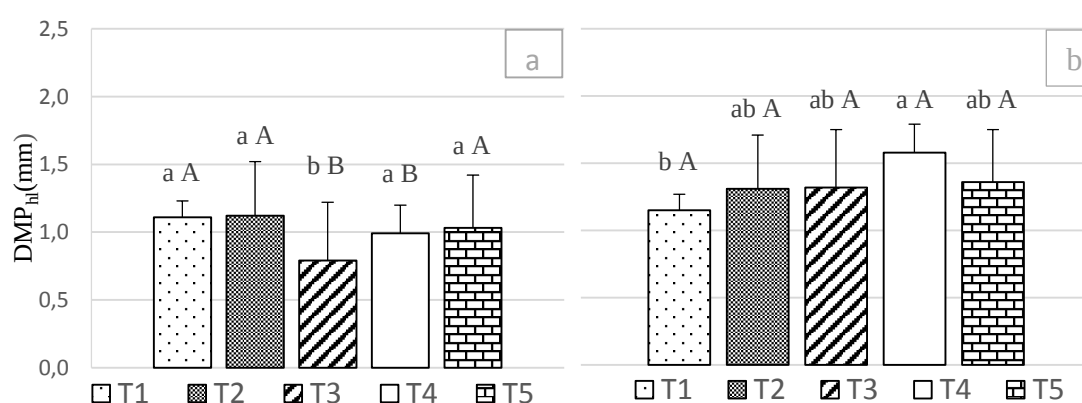


Figura 2.11. Resultados del pretratamiento humedecimiento lento (DMP_{hl}) (5 a 20 cm) para los cinco tratamientos: a). fecha 1 (jun-16). b). fecha 3 (jun-17). Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos para cada fecha. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre fechas de muestreo para cada tratamiento evaluado.

Al comparar las figuras 2.11.a y 2.11.b, y de la misma manera que se comprobó con los restantes pretratamientos, la tendencia general al segundo año de muestreo fue de un aumento en los valores del DMP_{hl} , siendo en este caso solo significativo dicho incremento para T3 y T4. Por lo tanto, este parámetro medido a esta profundidad no mostró un efecto tan positivo a partir de la inclusión de gramíneas invernales, como si fue observado en superficie. Estos resultados difieren de lo registrado por Kraemer (2015) para los primeros centímetros de profundidad de un suelo en agricultura bajo SD, quien encontró correlaciones positivas entre el DMP_{hl} con el ISI y el COP. Dicho autor, determinó valores promedio para esta propiedad de 1,75 mm para el monocultivo de soja y de 2,01 para aquellos que combinan más de una especie agrícola en la sucesión, diferenciándose estadísticamente entre sí.

2.3.4.4 Diámetro medio ponderado promedio (DMP_{med}):

El cálculo de un índice promedio de los resultados parciales de cada pretratamiento (DMP_{med}), resume el comportamiento del suelo en cuanto a su estabilidad al agua y permite clasificar al suelo en “Clases de estabilidad” (Le Bissonnais 1996). En la presente tesis, los resultados del DMP_{med} no mostraron interacciones significativas fecha-tratamiento en ninguna de las dos profundidades analizadas (Tabla 2.1 y Tabla 2.2).

2.3.4.4.1 DMP_{med} en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm

Al evaluar los resultados de la Figura 2.12.a y considerando la clasificación establecida por Le Bissonnais (1996) (Tabla 1.5), el suelo superficial correspondiente al monocultivo de algodón obtuvo una categoría “moderadamente estable”, mientras que para el resto de los tratamientos esta fue “estable”. Estos resultados muestran que se debería generar una nueva tabla para caracterizar cualitativamente a esta propiedad basadas en las particularidades del suelo local, ya que con los resultados obtenidos de la clasificación utilizada no pareciera que se capte la singularidad del proceso de degradación o recuperación de los suelos generado a partir de la implementación de los distintos tratamientos evaluados.

La Figura 2.12.a muestra que hubo un mejor comportamiento de los agregados correspondientes a las sucesiones de cultivos T2, T4 y T5, mientras que T1 y T3 mostraron la peor estabilidad estructural. Estos últimos tratamientos presentaron cultivo de algodón durante los dos años de evaluación, mientras que T4 y T5 tuvieron más gramíneas que el resto y solo hubo algodón un solo año de los dos analizados. Llama la atención el resultado de T2, el cual pese a presentar una sucesión de cultivos similar a T3 mostró una condición en la estructura de suelo superior a dicho tratamiento.

En la Figura 2.12.b se observa que al segundo año de muestreo el DMP_{med} de los primeros 5 cm se incrementó significativamente, siendo dicho incremento del orden del 11,6 %, ubicándose la estabilidad de los agregados en ambos años dentro de la categoría “estable”, según Le Bissonnais (1996) (Tabla 1.6).

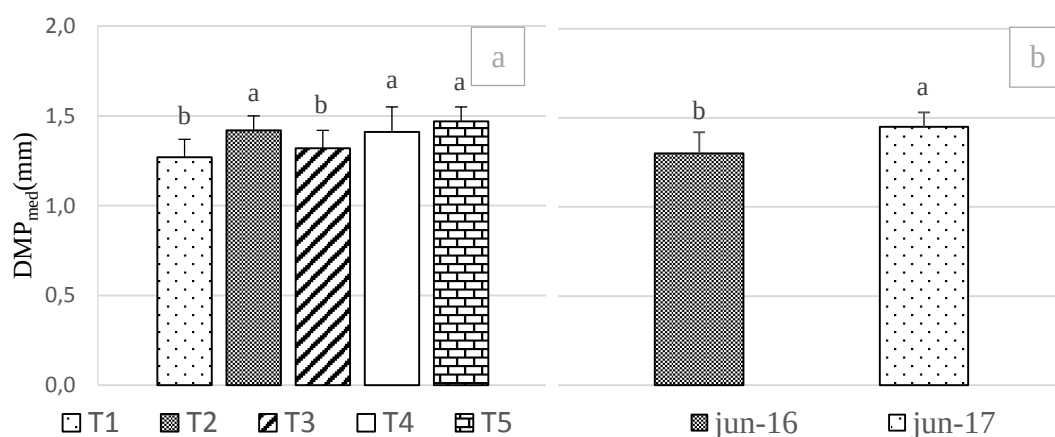


Figura 2.12. Resultados del promedio de los tres pretratamientos de estabilidad estructural (DMP_{med}) (0 a 5 cm): a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos años de muestreo. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos o entre fechas de muestreo.

La bibliografía muestra que el aumento en la intensificación de la secuencia de cultivos junto con la implementación de la SD y la incorporación de gramíneas en la rotación, determinan mejoras en la estabilidad de los agregados de los primeros centímetros de suelo. Restovich et al. (2011) encontraron diferencias significativas en la estabilidad estructural de los primeros 5 cm de un Argiudol de Pergamino, en donde los resultados de la sucesión cultivo/barbecho químico bajo SD, contrastaron con los provenientes de la incorporación de la avena como cultivo de cobertura. Sin embargo, las diferencias encontradas a favor de la incorporación de la avena, perduraron hasta la cosecha del cultivo para grano. Para la misma profundidad, Castiglioni et al. (2016) evaluaron en un Argiudol de la Prov. de Bs. As., la magnitud de los cambios en la

estabilidad de agregados, generados por la incorporación de distintos cultivos de cobertura como antecesores de soja o maíz bajo SD. Estos autores encontraron los valores más bajos de estabilidad en la situación testigo (barbecho químico de invierno/cultivo de verano) y los mayores en las rotaciones que incorporaron al trigo como cultivo de cobertura.

En el presente trabajo se determinó que al cuarto año de iniciado el ensayo, el DMP_{med} de los primeros 5 cm de profundidad correlacionó positivamente con el ICC_{P2} (índice intensificación de secuencias agrícolas con cereales calculado para el periodo entre el inicio del ensayo hasta el año 2017), evidenciándose así un incremento en esta propiedad cuando las rotaciones tienen un mayor número de gramíneas (p -valor=0,00386, coeficiente de correlación = 0,90). Novelli et al. (2013) trabajando con Molisoles de la Región Pampeana, estudiaron la relación entre distintos índices que informan acerca del grado de intensificación en la sucesión de cultivos y los resultados de estabilidad de agregados correspondientes a los distintos pretratamientos propuestos por Le Bissonnais (1996). Estos autores, luego de seis años con distintas rotaciones bajo SD, determinaron entre los 0 y 5 cm de profundidad y de manera diferente a los resultados de la presente tesis, que el índice de intensificación de la secuencia agrícola con cereales (ICC) no se relacionó significativamente con el DMP de los distintos pretratamientos de estabilidad estructural, mientras que el ISI obtuvo coeficientes de correlación positivos con los tres pretratamientos.

En los primeros 5 cm de profundidad y bajo las condiciones aquí evaluadas, el incremento en la resistencia de los agregados a ser destruidos por el microagrietamiento diferencial sería el parámetro más influenciado por la incorporación de cultivos de gramíneas dentro de la rotación. La resistencia al mencionado agente de desagregación, inicia al tercer año de iniciada la sucesión de cultivo y persiste al menos hasta el cuarto año. En ese momento, las distintas cantidades y calidades de los residuos aportados al suelo por las distintas especies vegetales, principalmente los residuos de gramíneas, influyen positivamente sobre la estabilidad general de los agregados (DMP_{med}). Muchos autores citan a los residuos de gramíneas como agentes de agregación orgánicos temporarios y transitorios de gran importancia en el suelo (Tisdall y Oades 1982, Caviglia et al. 2011, Alvaro Fuentes et al. 2008 y Caviglia y Andrade 2010). Estos restos constituyen una fuente de energía para los microorganismos del suelo, los cuales secretan sustancias orgánicas que actúan como agentes de agregación (Goss y Kay 2005; Blankiship et al. 2016). En este sentido, algunos hongos producen glycoproteína y

glomalina, que constituyen un factor esencial para darle estabilidad a los agregados, siendo este efecto estabilizador maximizado cuando se reduce la remoción del suelo (Wright et al. 1999; Wright et al. 2007). También los diferentes patrones de crecimiento radicular sumado a su funcionamiento y fisiología, afectan de diferentes maneras a la estabilidad del suelo. De esta manera, los cereales logran mejores resultados que las latifoliadas para estabilizar los agregados, ya que los primeros presentan mayor biomasa radicular que las segundas Amezketa (1999).

El DMP_{med} mostro también una fuerte correlación con el DMP_{hl} , tanto en junio de 2016 con un p-valor de 0,0241 y coeficiente de correlación de 0,93, como en junio del 2017 con un p-valor de 0,0139 y coeficiente de correlación de 0,95. Por lo que el DMP_{hl} en esta profundidad, sería uno de los factores de mayor influencia sobre la estabilidad general de los agregados en estos suelos. Como bien ya fue mencionado en la sección 2.3.4.3.1, el DMP_{hl} está íntimamente relacionado con el ICC de los dos años evaluados, por lo que sería esperable que el incremento en la cantidad de cultivos de cereales dentro de la rotación, mejoren la estabilidad general del suelo como consecuencia del incremento de su resistencia a la disgregación por expansión diferencial (DMP_{hl})

Es claro entonces que distintas especies vegetales influyen de forma distinta en la formación y estabilización de los agregados, pudiéndose explicar así las diferencias entre las sucesiones encontradas. Dicha influencia depende en parte del efecto físico del entramado de sus raíces, de los exudados que estas y sus microorganismos asociados generan, como también de los residuos orgánicos que se incorporan al suelo (Blankinship et al. 2016). Según la clasificación de Tisdall y Oades (1982), los mencionados agentes de agregación se enmarcarían dentro de los transitorios (polisacáridos microbianos y vegetales) y temporarios (raíces e hifas de hongos), lo que podría explicar en gran parte el incremento interanual y entre secuencias que se registraron en la presente tesis.

2.3.4.4.2 DMP_{med} en la capa de suelo entre los 5 a 20 cm.

En la Figura 2.13.a se muestra que a esta profundidad los tratamientos con al menos una gramínea como cultivo antecesor en alguno de los dos muestreos realizados en la presente tesis (T4 y T5), lograron al menos un 13,3 % más de estabilidad estructural que aquellos sin gramíneas en igual periodo de tiempo (T1, T2 y T3). Coincidiendo con estos resultados, se determinó una correlación significativa y positiva entre el ICC_{P2} y el DMP_{med} (p-valor= 0,0498, coeficiente de correlación=0,87). También se muestra en la

Figura 2.13.b, un incremento en la estabilidad media de los agregados entre 2016 y 2017, del orden del 39,3 %.

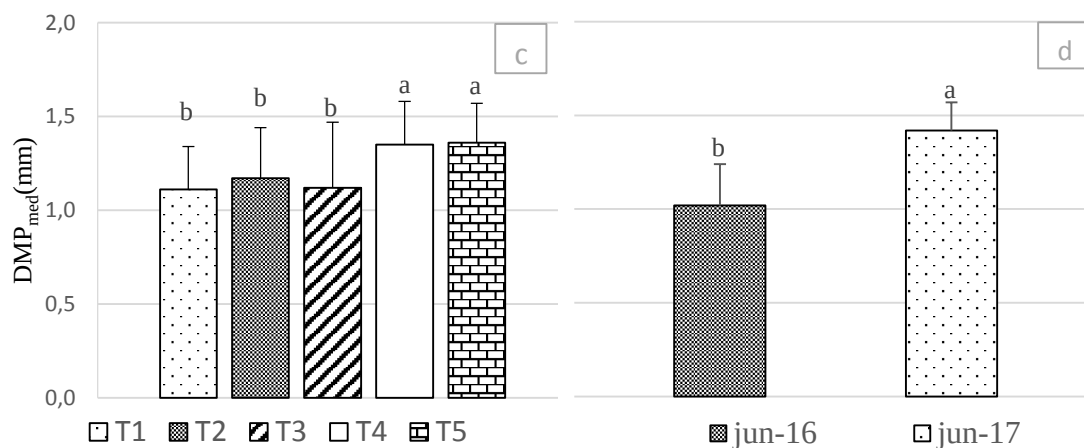


Figura 2.13. Resultados del promedio de los tres pretratamientos de estabilidad estructural (DMP_{med}) (5 a 20 cm): a) para los cinco tratamientos evaluados, b) Para los dos muestreos realizados. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos o entre fechas de muestreo.

De acuerdo a la clasificación propuesta por Le Bissonnais (1996), la estructura subsuperficial de los tratamientos T1, T2 y T3 fue “moderadamente estable”, mientras que aquellas secuencias de cultivo que recibieron maíz o trigo en alguna de las campañas evaluadas, mostraron a los agregados como “estables”. Por otro lado, el valor del DMP_{med} promedio de todos los tratamientos pasó de ser “moderadamente estable” en junio de 2016 (posterior al cultivo de algodón), a ser “estable” en junio de 2017 (posterior a la incorporación de trigo y maíz en dos de los tratamientos evaluados). Esta rápida mejora en la estabilidad estructural entre campañas, como así también la mayor estabilidad de los tratamientos T4 y T5, están relacionadas con el aporte de agentes de agregación temporarios (raíces e hifas de hongos) y transitorios (polisacáridos microbianos y vegetales) ya mencionados en el desarrollo del DMP_{med} superficial.

Rubio et al. (2019) mostraron que las mejoras en la estabilidad de los agregados de los primeros 20 cm de un Molisol, estaban relacionadas con prácticas de manejo tendientes a incrementar los aportes de biomasa al suelo. Por su parte, Castiglioni et al. (2016) encontraron entre los 5 a 20 cm un comportamiento del DMP_{med} similar al determinado en esta tesis, donde la rotación que contempló al cultivo de trigo logró el mejor registro en la estabilidad de agregados. Trabajando sobre los primeros 15 cm de Molisoles, Kraemer (2015) determinó un coeficiente de correlación positivo entre el

DMP_{med} y el sistema de producción bajo siembra directa, como también y al igual que en esta tesis, registró una relación positiva entre el ISI y el DMP_{med}. Los resultados relevados por los autores citados dan indicios de la importancia que tiene la combinación de la SD, la intensificación de los sistemas de producción y la presencia de gramíneas en las rotaciones, para lograr mejoras en la estabilidad estructural de los agregados

2.3.5 Variación de la conductividad hidráulica (Ks) entre los años y tratamientos evaluados.

La conductividad hidráulica saturada describe la funcionalidad del sistema poroso, englobando propiedades tales como cantidad, tamaño, morfología, continuidad y orientación de los poros (Ellies et al. 1997). Estos factores son sensibles a cambios estructurales debidos al manejo del suelo, por lo tanto, la conductividad hidráulica saturada es un buen parámetro para evaluar la calidad física edáfica (Dörner y Dec 2007).

Esta propiedad determinada en el laboratorio, mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos para ambas profundidades, pero no entre años (Tablas 2.1 y 2.2).

2.3.5.1 Ks en la capa de suelo entre 0 a 5 cm.

De 0 a 5 cm se encontró que la sucesión de cultivos soja-algodón-algodón (T3), no se diferenció del monocultivo de algodón (T1), presentando un valor 43,6 % inferior respecto al de los restantes tratamientos (T2, T4 y T5), mientras que estos últimos no se diferenciaron en el Log₁₀Ks entre sí, como tampoco del determinado en T1 (Figura 2.14.a).

Los valores de conductividad hidráulica saturada (Ks) obtenidos en esta tesis, los cuales oscilaron entre 5,62 mm h⁻¹ y 50,11 mm h⁻¹ (para T3 y T2 respectivamente), se encuentran dentro del rango de resultados reportados por Sasal et al. (2010) y Castiglioni et al. (2016) en suelos bajo agricultura de la Región Pampeana. El efecto de las distintas combinaciones de cultivos sobre la conductividad hidráulica saturada en los primeros centímetros de suelo ha mostrado resultados diversos. Sasal et al. (2010) trabajaron en un ensayo de rotaciones implementado sobre un Argiudol ácuico de Entre Ríos, cuyos tratamientos fueron: monocultivos de maíz y soja, rotaciones trigo/soja y trigo/soja-maíz, todos bajo SD por un período de 15 años, además de evaluar el comportamiento de una

pastura y de una parcela labrada sin vegetación. En dicho trabajo no se encontraron en los primeros 4 cm de profundidad, diferencias estadísticas en la Ks entre los tratamientos bajo agricultura, pero los mismos presentaron un valor menor de dicha propiedad respecto a la pastura. Castiglioni et al. (2016) trabajando sobre un Argiudol del partido de San Antonio de Areco (Prov. de Bs. As), donde se evaluó el comportamiento de dos cultivos de cobertura (trigo y vicia) y un testigo (barbecho químico de invierno/cultivo de verano), determinaron en los primeros 7 cm de profundidad y luego de un año de duración del ensayo, una mayor Ks en las parcelas con vicia respecto al testigo, no existiendo diferencias entre los restantes tratamientos.

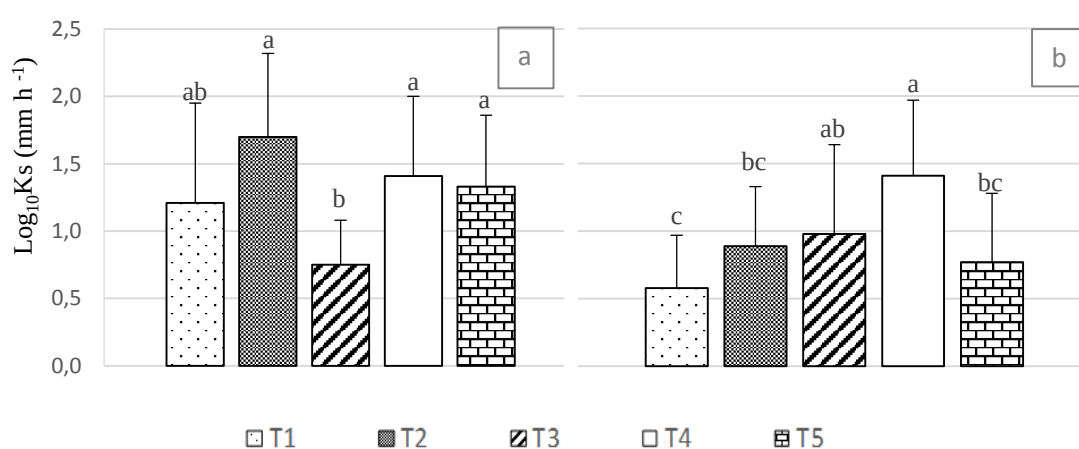


Figura 2.14. Resultados del Log_{10} Ks para los cinco tratamientos evaluados en: a) profundidad de 0 a 5 cm, b) profundidad de 5 a 20 cm. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos para una misma profundidad.

Reynolds et al. (2009) proponen para una amplia gama de texturas de suelo, un valor mínimo de Ks igual a 18 mm h^{-1} , por debajo del cual se dan condiciones predisponentes para que se genere erosión hídrica debido a impedimentos en la circulación interna del agua. En la presente tesis, las sucesiones de cultivo que registraron valores superiores a dicho valor mínimo fueron T2 ($50,11 \text{ mm h}^{-1}$), T4 ($25,12 \text{ mm h}^{-1}$) y T5 ($21,40 \text{ mm h}^{-1}$), mientras que T1 ($16,21 \text{ mm h}^{-1}$) y T3 ($5,62 \text{ mm h}^{-1}$) fueron inferiores. Los tratamientos con valores de Ks inferiores al propuesto por Reynolds et al. (2009), presentaron cultivo de algodón durante las campañas evaluadas. Dicho cultivo presenta un alto porcentaje de lignina en sus tejidos radiculares, lo que retardaría la degradación de las raíces y la correspondiente generación de bioporos. Esta obstrucción temporal de poros reduce la tasa de infiltración (Suwardji y Eberbach 1998; Bodner et al. 2008), ya

que la aireación y el movimiento gravitacional del agua dependen de los macroporos, como también de su cantidad, distribución y continuidad (Gavande 1991). Sumado a esto, la presencia de una capa de mayor compactación es considerada como otra impedancia para el paso de fluidos en profundidad (Adema et al. 2001). En este sentido, a esta profundidad se comprobó un coeficiente de correlación negativo y significativo entre el valor medio del $\text{Log}_{10}K_s$ de cada tratamiento y la RMP ($p\text{-valor}=0,0386$, coeficiente de correlación= $-0,90$). Los tratamientos T1 y T3 son los que presentaron entre los 0 y 5 cm, un mayor valor medio de RMP (Figura 2.4) y aunque dichos valores no llegan a ser una complicación para el desarrollo radicular, dicho proceso estaría reduciendo la velocidad de ingreso de agua al perfil del suelo en mayor medida que en los restantes tratamientos.

2.3.5.2 K_s en la capa de suelo entre 5 a 20 cm.

El tratamiento que en 2017 presentó maíz (T4) tuvo una conductividad hidráulica saturada significativamente superior a los restantes, con la excepción del T3, del cual no logró diferenciarse (Figura 2.14.b). Por su parte, el monocultivo de algodón obtuvo valores de conductividad hidráulica saturada por debajo de T3 y T4 (40,8 %) y de los cuales se diferenció en forma significativa, mientras que T2, T3 y T5 presentaron resultados similares entre sí (Figura 2.14.b). A esta profundidad, el único tratamiento que logró superar el valor del umbral mínimo propuesto por Reynolds et al. (2009) fue T4 ($25,7 \text{ mm h}^{-1}$), mientras que el resto de las secuencias osciló entre $3,8 \text{ mm h}^{-1}$ y $9,54 \text{ mm h}^{-1}$. A su vez, se registró un coeficiente de correlación significativo entre los valores medios de $\text{Log}_{10}K_s$ y el COP ($p\text{-valor}= 0,0180$, coeficiente de correlación= $0,94$). El COP no presentó diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 2.2), pero al parecer las pequeñas variaciones encontradas en dicha propiedad podrían estar incidiendo positivamente en los valores de K_s .

Es bien sabido que la intensificación y combinación de distintos cultivos dentro de la secuencia, genera un mayor y más eficiente uso de los recursos ambientales. La presencia de cobertura vegetal viva de distintas especies durante un intervalo de tiempo superior, genera un aporte frecuente y continuo de residuos de distintas composiciones químicas, provenientes no sólo de la parte aérea, sino también de la descomposición de las raíces (Caviglia et al. 2011; Novelli 2013). Este comportamiento modifica los niveles del carbono orgánico en los distintos estratos del suelo (Luo et al. 2010), favoreciendo a distintas propiedades físicas (Álvaro-Fuentes et al. 2008). Estas modificaciones físicas

generadas por la distinta combinación de especies vegetales afectan la curva de retención hídrica, la tasa de infiltración superficial, como así también al flujo de agua en profundidad (Dexter 2004; Sasal et al. 2006).

Como fuera mencionado, a pesar de que T5 es el tratamiento con mayor intensificación en la secuencia de cultivos, con aporte de distintos sistemas radicales y restos vegetales, no logró los mayores valores de Ks como tampoco se diferenció de los tratamientos T2 y T3. La presencia del cultivo de maíz en la campaña previa al muestreo de 2017, pareciera haber sido responsable de generar en T4 una mejor Ks. Coincidentemente, Sasal et al. (2010) registraron entre los 4 y 8 cm de profundidad, los mayores valores de Ks para aquellos tratamientos que tuvieron maíz, al ser comparados sus resultados con otras producciones agrícolas que no presentaban a esta especie en la secuencia de cultivos. Los valores de Ks registrados por estos autores en el monocultivo de maíz fue de $24,1 \text{ mm h}^{-1}$, similar al valor encontrado en esta tesis para T4 ($25,7 \text{ mm h}^{-1}$). Castiglioni et al. (2010) determinaron en un Argiudol vértico con una rotación trigo/soja-maíz bajo SD, un mayor volumen de macroporos luego del cultivo de maíz, lo cual podría favorecer al movimiento de agua en el suelo. Sin embargo, Restovich et al. (2010) trabajando en un Argiudol típico de Pergamino, informaron que los efectos favorables en macroporosidad edáfica generados por el maíz son a corto plazo, no perdurando más de un año. En base a estos antecedentes y a los resultados registrados en la presente tesis, se podría considerar al maíz como un excelente cultivo agrícola cuyas características permite maximizar el ingreso de agua en el perfil del suelo, aunque estos efectos no podrían ser considerados para el largo plazo.

Los resultados de Ks en el estrato subsuperficial fueron menores a los observados en superficie, siendo a su vez distinta entre ambas profundidades la respuesta de esta propiedad al efecto de los diferentes tratamientos. Mientras de 0 a 5 cm hubo tres tratamientos (T2, T4 y T5) que presentaron los mejores valores sin diferenciarse entre sí, a mayor profundidad la única parcela que presentó maíz como cultivo previo (T4), fue la que obtuvo el superior valor de Ks, siendo a su vez este el único tratamiento de 5 a 20 cm que sobrepasó el umbral crítico de Ks mencionado en la bibliografía. Por su parte, en superficie dicho valor fue superado solo por T2, T4 y T5.

2.3.6 Efecto de los tratamientos y la fecha de muestreo sobre la conductividad hidráulica superficial estimada a distintas tensiones.

2.3.6.1 Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 0 cm (K_{h0cm}).

La conductividad hidráulica estimada a una tensión de 0 cm mostró diferencias entre los tratamientos, pero no entre fechas de muestreo (Tabla 2.1). La sucesión de cultivos que tuvo maíz en la última campaña evaluada (T4), generó un valor significativamente superior en esta propiedad ($9,28 \text{ mm h}^{-1}$) respecto a T1 y T3, quienes durante los dos años de estudio, presentaron cultivo de algodón (Figura 2.15). A su vez, T1 y T3 no presentaron diferencias entre sí, como tampoco lo hicieron T2 y T5 respecto a los restantes tratamientos.

Similares resultados a los registrados en esta tesis fueron observados por Lozano (2014), quien trabajó sobre un Argiudol típico y un Hapludol éntico con 20 años bajo SD, con una rotación maíz-soja-trigo/soja. Este autor destacó la existencia de un efecto positivo por parte del cultivo de maíz sobre las propiedades físicas del suelo, especificando que el mismo se origina a partir de la descomposición de las raíces de dicho cultivo y de la consecuente habilitación de los macroporos creados por el crecimiento radicular. En este sentido, la conductividad hidráulica saturada y la macroporosidad en suelos bajo SD, son propiedades particularmente afectadas por el cultivo previo a la determinación de dichos parámetros (Lozano 2014; Nouri et al. 2019)

Villareal (2018) trabajando en un Argiudol abruptico, Argiudol típico y Haplustol éntico de la Región Pampeana, midió la K_h bajo SD y a diferencia de los resultados determinados en la presente tesis, este autor encontró un efecto de la fecha de muestreo sobre esta propiedad. Este autor determinó en el Haplustol una K_{h0cm} promedio de $14,22 \text{ mm h}^{-1}$, fluctuando los resultados entre $4,8 \text{ mm h}^{-1}$ y $22,7 \text{ mm h}^{-1}$, intervalo similar al registrado en el presente trabajo (entre $6,31 \text{ mm h}^{-1}$ y $16,11 \text{ mm h}^{-1}$, con un promedio de $10,50 \text{ mm h}^{-1}$). Villarreal (2018) expuso además que los valores de K_{h0cm} por el registrados en suelos francos, estarían condicionados por la presencia de estructura laminar. Dicha estructura se caracteriza por presentar agregados planos y finos orientados paralelamente a la superficie del suelo, siendo característicos de los suelos bajo SD (Sasal et al., 2006; Villareal, 2018), disminuyendo como consecuencia los niveles de infiltración (Lozano, 2014). El desarrollo de este proceso ha sido ampliamente reportado en suelos

con alto contenido de limo de la región Pampeana bajo SD (Sasal et al. 2006; Álvarez et al. 2009b; Soracco et al. 2010, Kraemer et al. 2017). Si bien en el presente estudio no se analizó la presencia de este tipo de estructura, dado el alto contenido de limo que presenta el suelo sobre el que se trabajó, es posible que se haya desarrollado estructura laminar y que la misma haya incidido sobre los resultados de Kh_{0cm} obtenidos.

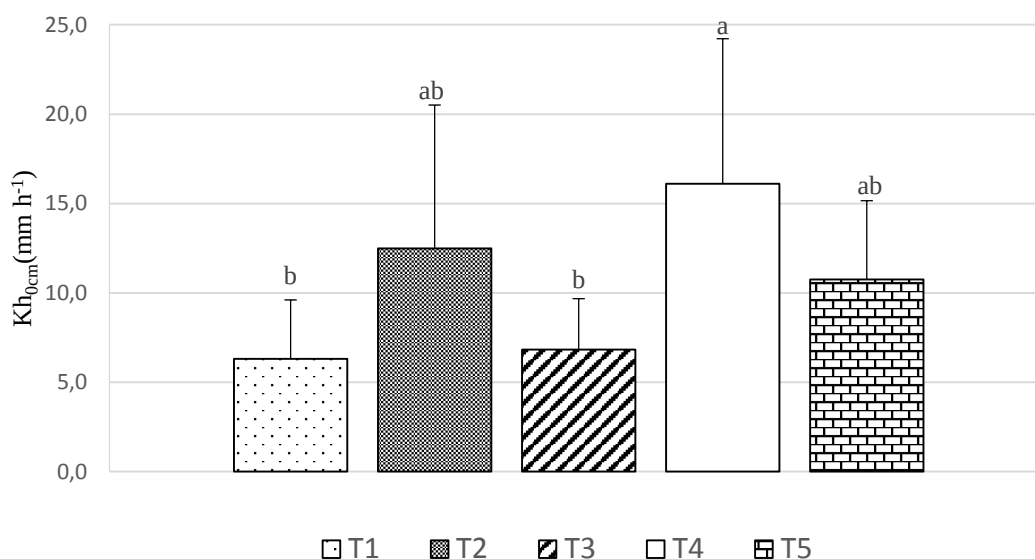


Figura 2.15. Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 0 cm (Kh_{0cm} .) para los cinco tratamientos evaluados. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos.

A la tensión de 0 cm, la conducción del agua se lleva a cabo por la totalidad de los poros del suelo, igual a lo que sucede con la K_s determinada en laboratorio. Sin embargo, no existió una correlación entre estas dos variables, como tampoco entre K_{0cm} y el resto de las propiedades evaluadas en esta tesis. Sasal et al. (2010) determinaron una asociación positiva entre la K_s y Kh_{0cm} . Por su parte, Reynolds et al. (2000) no observaron diferencias entre la K_s determinada en laboratorio, respecto a la observada a campo con el permeámetro de disco. Sin embargo, al analizar una serie mayor de resultados generados con estas dos técnicas, dichos autores encontraron una baja proporción de correlaciones significativas entre los valores de las dos metodologías evaluadas. Castiglioni et al. (2018), tampoco registraron una correlación significativa entre la K_s estimada por los mismos métodos utilizados en la presente tesis. Reynolds et al. (2000) atribuyen esta falta de vinculación entre las distintas formas de determinar K_s , al diferente tamaño de los equipos utilizados para las mediciones, abarcando de esta manera distinta cantidad de macroporos que actúan en la conducción del agua a flujo

saturado. También dichos autores explican las diferencias encontradas entre equipos de medición de K_s , a las distintas direcciones que registra el flujo de agua según sea la técnica utilizada. En este sentido, los resultados obtenidos por el permeámetro de disco son consecuencia de lo que ocurre en un estrato muy superficial de suelo, sin que el movimiento de agua se encuentre confinado, lo que permite su desplazamiento en las tres dimensiones. Por el contrario, la determinación de K_s con cilindro en laboratorio, se realiza como resultado de un flujo de agua fundamentalmente vertical. A su vez, el grado de disturbio provocado al suelo por la extracción de los cilindros es mucho mayor que el generado al apoyar el permeámetro sobre la superficie del suelo. Por su parte, al extraer los cilindros del suelo para la determinación de la K_s en laboratorio, no existe la posibilidad de la presencia de aire entrampado en su interior que dificulte el movimiento de agua (Castiglioni et al. 2018).

No obstante, estas diferencias planteadas entre ambas técnicas de medición y la falta de correlación entre los resultados de $\text{Log}_{10}K_s$ y $K_{h0\text{cm}}$, al comparar las Figuras 2.14.a y 2.15 se observa bastante similitud en como quedaron ordenados los distintos tratamientos respecto a estas propiedades. En ambos casos T2, T4 y T5 presentaron los mayores resultados, mientras que T1 y T3 obtuvieron los menores. Sin embargo, con $K_{h0\text{cm}}$ T2 y T4 no lograron diferenciarse estadísticamente de T3, pero T4 si lo hizo de T1.

2.3.6.2 Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 1,5 cm ($K_{h1,5\text{cm}}$).

Para poder evaluar la conductividad hidráulica del suelo conducida por poros menores a $2080\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro, se aplicó una tensión de 1,5 cm sobre la placa del permeámetro de disco. Los resultados obtenidos mostraron diferencias entre los tratamientos y entre las fechas de muestreo (Tabla 2.1).

El tratamiento T5 presentó una $K_{h1,5\text{cm}}$ sensiblemente superior a T1 y T3, mientras que T2 obtuvo un valor 63,7 % mayor a T3, sin diferenciarse del resto de las sucesiones de cultivo (Figura 2.16.a). La $K_{h1,5\text{cm}}$ promedio de cada tratamiento mostró un coeficiente de correlación positivo y significativo con el DMP_{med} de los primeros 5 cm ($p\text{-valor}=0,0464$, coeficiente de correlación=0,88), como también con la capacidad de los agregados de soportar el efecto estallido (DMP_{hr}) ($p\text{-valor}=0,0243$, coeficiente de correlación=0,93). La destrucción de los macroporos por el aire comprimido dentro de los agregados durante el proceso de humectación, es un agente importante en la

disminución de la estabilidad estructural, principalmente en suelos limosos (Le Bissonnais 1996, Varela et al. 2010). Caron (1996) demostró que el estallido debido a la presión de aire atrapado en los poros, es influenciado por la hidrofobicidad. Dicho fenómeno está generado por productos orgánicos aportados por los distintos cultivos, quienes revisten los poros del suelo con sustancias hidrofóbicas (Piccolo y Mbagwu 1999), generándose así una débil repelencia al agua que como consecuencia incrementa la agregación del suelo, la estabilidad de agregados y por lo tanto la disminución de poros conductores rellenos con material proveniente de la rotura de los agregados (Blanco-Canqui 2011). Por lo tanto, aquellas rotaciones con capacidad de aportar compuestos orgánicos que mejoren el balance de sustancias hidrofóbicas dentro de los agregados, como sucede con T5, mejorarán la conducción del agua en los poros menores a 2080 μm , a pesar de ser un tratamiento con un mayor tránsito de maquinarias. En este sentido, esta última variable mencionada presentó un coeficiente de correlación significativo con el ISI_{P1} ($p\text{-valor}= 0,0478$, coeficiente de correlación=0,88), lo que indica que ante incrementos en la intensificación de uso agrícola será favorecido significativamente el transporte de agua a través de los poros con diámetro menor a 2080 μm . Lozano (2014) expuso que este tipo de comportamiento está asociado también a cambios generados por los diferentes sistemas radicales y coberturas del suelo, afectándose de esta manera la continuidad vertical del espacio poroso del suelo debido a que cultivos diferentes, generan un crecimiento distinto del sistema radical y consecuentemente favorecen la formación distintos macroporos verticales continuos.

Por lo tanto, el uso de la tierra tiene una gran influencia en el comportamiento de la porosidad estructural, favoreciendo su estabilidad en base a la generación de hidrofobicidad y resistencia de los agregados, implantando especies que generen raíces que exploren el perfil del suelo en profundidad, incrementando de esta manera la continuidad y estabilidad de los poros que intervienen en la conducción del agua (Pecorari et al. 1990). En este sentido la incorporación de cultivos de gramíneas como el maíz, dentro de las secuencias de cultivos bajo SD, es determinante para lograr mejoras en el sistema poroso del suelo (Kraemer et al. 2014), especialmente en suelos con altos contenidos de limo, cuya capacidad de generar y conservar macroporos por medios físicos es baja (Stengel et al. 1984; Taboada et al. 1998; Taboada et al. 2004), dependiendo principalmente de factores biológicos.

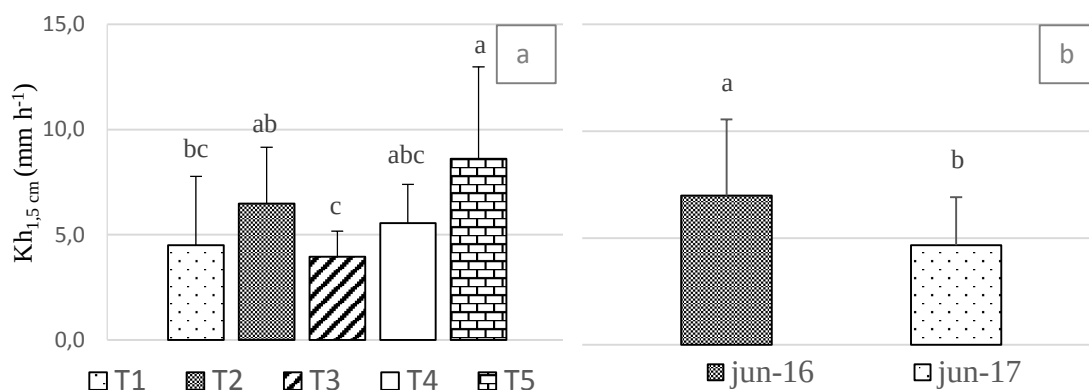


Figura 2.16. Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 1,5 cm ($Kh_{1,5cm}$): a) para los cinco tratamientos evaluados, b) para los dos muestreos anuales realizados. *Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos o entre fechas de muestreo.*

La $Kh_{1,5cm}$ registrada en el muestreo de 2017 fue un 33,0 % menor a la del año 2016 (Figura 2.16.b). Llama la atención este comportamiento, dado que cuando se analizaron los resultados de estabilidad estructural, se observó que estos eran mejores al segundo año de muestreo. A su vez, la DAP y la Kh superficial no presentaron diferencias entre años de muestreo. Sin embargo, la RMP registrada entre los 0 y 5 cm, mostró un incremento interanual del 48,9%. Pese a ello no se observaron coeficientes de correlación significativos entre este último parámetro mencionado y la DAP con $Kh_{1,5cm}$. Lozano (2014) expuso que los cambios generados por los diferentes sistemas radicales y coberturas del suelo, pueden afectar en mayor medida la continuidad vertical del espacio poroso del suelo que su porosidad total. Es probable entonces que haya habido alguna alteración en la continuidad de los poros que conducen agua a esta tensión, que no pudo ser registrada por el tipo de mediciones realizadas en el presente estudio.

2.3.6.2 Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 3 cm (Kh_{3cm})

La conductividad hidráulica estimada con permeámetro de disco a una tensión de 3 cm, mostró interacción entre los tratamientos y fechas de muestreo (Tabla 2.1), por lo cual se evaluó el efecto de las rotaciones en ambos años de manera separada, como también se analizaron las variaciones anuales de cada tratamiento.

No se observó en 2016 un efecto de los tratamientos sobre Kh_{3cm} (Figura 2.17.a), mientras que esto si ocurrió en 2017 (Figura 2.17.b). En esta última fecha, los resultados

de T4 fueron significativamente superiores a los de T3 y T5, sin diferenciarse T1 y T2 del resto de los tratamientos.

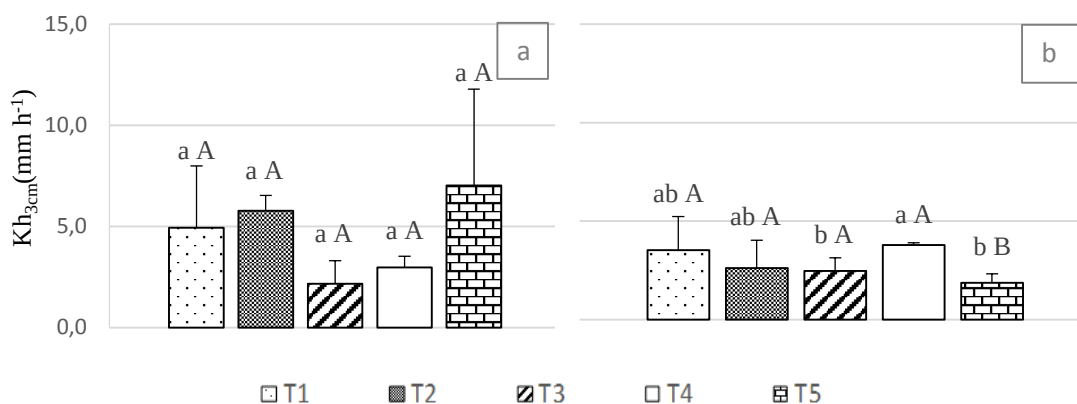


Figura 2.17. Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 3 cm (Kh_{3cm}) para los cinco tratamientos evaluados: a) durante el muestreo de junio de 2016, b) durante el muestreo de junio de 2017. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos para cada año. Letras mayúsculas distintas, indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre fechas de muestreo para cada tratamiento evaluado.

Esta determinación contempla la conducción del agua a través de poros con diámetro menor a 1040 μm , cuya presencia estaría condicionada por el crecimiento de los sistemas radiculares del cultivo que precedió a la medición. En este sentido, Lozano (2014) mencionó que, en suelos de textura franca, estos poros no son estables bajo SD para un periodo largo de tiempo, siendo dependientes del último cultivo efectuado, condicionando de esta manera la Kh_{3cm} . Este comportamiento explicaría la falta de diferencias en 2016 entre tratamientos, ya que todos tuvieron como antecesor al cultivo de algodón. Contrariamente, en 2017 el tratamiento que tuvo al maíz como antecesor (T4) fue quien generó el mayor valor de Kh_{3cm} , diferenciándose de T3 y T5.

Los distintos cultivos afectan de forma diferencial a la cantidad y conectividad de los poros grandes (Strudley et al. 2008). El sistema radicular de las monocotiledóneas como el maíz, consta de fuertes y numerosas raíces secundarias que ayudan a crear macroporosidad continua y orientada verticalmente (Bathke y Blake 1984) y cuando estas raíces se descomponen generan macroporos hidráulicamente activos (Lozano 2014; Kraemer 2015). Este mecanismo reduciría también la RMP y explicaría la alta correlación negativa registrada en el presente trabajo entre la Kh_{3cm} y la RMP superficial (p -valor=0,0400, coeficiente de correlación=-0,90). A su vez, las raíces del maíz sintetizan cantidades importantes de agentes orgánicos de relevancia en la estabilización de los agregados (Bronick y Lal 2005). Como fuera mencionado previamente, estos

agentes orgánicos de corta vida media, son importantes reductores de la inestabilidad de los agregados que presentan alta susceptibilidad a ser destruidos por hinchamiento diferencial. Este comportamiento suele ocurrir en los Molisoles con bajo contenido de arcilla y materia orgánica, como el analizado en el presente estudio.

Al analizar las variaciones de esta propiedad entre años, solo se comprobó que la secuencia con doble cultivo anual logró una caída significativa entre 2016 y 2017.

Los resultados de K_s obtenidos con el permeámetro de disco, mostraron un comportamiento diferencial de los tratamientos según la tensión aplicada, y por lo tanto de la categoría de poros involucrados en el movimiento de agua. Kh_{0cm} al igual que K_s no mostró diferencias entre fechas de muestreo, registrando un ordenamiento similar de los tratamientos, siendo T3 la sucesión de cultivos con el valor más bajo y T4 uno de los tratamientos con mejores resultados entre los cinco bajo estudio. La $Kh_{1,5cm}$ fue menor en 2017 respecto a lo sucedido el año previo, siendo el tratamiento con el doble cultivo anual el que presentó los mejores resultados, asociándose los mismos en forma significativa con algunas mediciones de estabilidad estructural. Por su parte, Kh_{3cm} presentó interacción entre el efecto fecha y tratamiento, mostrando una respuesta de muy corto plazo asociada al cultivo realizado previamente. En este sentido, en el año en que el cultivo antecesor fue el mismo para todos los tratamientos, no se encontraron diferencias para esta propiedad, mientras que al año siguiente y con distintas especies previas, se determinó que los resultados de T4 eran superiores a los de T3 y T5. De acuerdo a lo sucedido con las determinaciones Kh_{0cm} y Kh_{3cm} , se infiere que el cultivo de maíz es un buen antecesor que favorece el movimiento de agua interno del suelo.

2.3.7 Rendimiento de fibra seca (FS) durante la campaña 2015-2016, para los tratamientos evaluados.

En la Figura 2.18 se puede observar que la secuencia con doble cultivo anual (T5), logró un rendimiento de fibra significativamente superior al resto, mientras que el monocultivo de algodón (T1) obtuvo los valores significativamente más bajos, siendo la diferencia entre los tratamientos mencionados del orden de 1568 kg ha^{-1} . Por su parte, las secuencias de cultivos T2, T3 y T4, presentaron rendimientos en fibra intermedios y diferentes a los del T1 y T5. A su vez los tratamientos con una combinación de cultivos maíz-algodón-algodón (T2 y T4), no se diferenciaron entre sí, pero los resultados de FS de T4 fueron diferentes a los de T3.

A partir de los resultados expuestos y de la correlación significativa existente entre el ICC_{P1} y la FS (p-valor= 0,0191, coeficiente de correlación=0,89), se desprende que al cabo de tres años de ensayo, el rendimiento en fibra del cultivo de algodón aumentó con la presencia de gramíneas dentro de la rotación. El rendimiento de FS también mostró correlaciones significativas con el DMP_{hl} (p-valor=0,0035, coeficiente de correlación=0,96), DMP_{dm} (p-valor=0,0481, coeficiente de correlación=0,86), DMP_{med} (p-valor=0,0044, coeficiente de correlación=0,97) de los primeros 5 cm y con el DMP_{dm} (p-valor=0,0014 coeficiente de correlación=0,96) de la segunda profundidad. De esta manera, el mayor rendimiento en FS en T5 estaría asociado a los efectos favorables producidos sobre el suelo por este tratamiento.

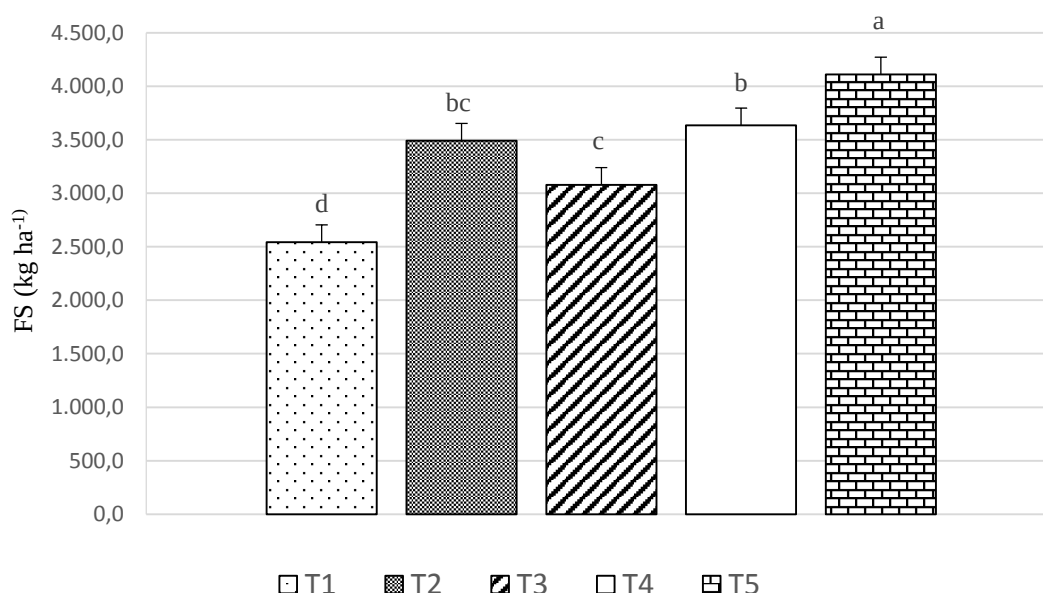


Figura 2.18. Rendimiento de Fibra seca de algodón (Fs.) determinada en la campaña 2015-2016, para los cinco tratamientos evaluados. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre tratamientos.

Gomez et al. (2016) al trabajar con este mismo ensayo al segundo año de su inicio, pero evaluando solo los tratamientos T1 (sucesión algodón-algodón) y T5 (sucesión maíz-algodón), no registraron diferencias en el rendimiento de FS. Sin embargo, dichos autores mostraron que, al inicio de la segunda campaña agrícola, el monocultivo presentó un 25% menos de residuos de cosecha. Estos autores concluyeron que dos campañas no son suficientes para observar cambios en el rendimiento de algodón en la zona de estudio, debidas a la implementación de distintas secuencias de cultivos. En otro trabajo realizado por Gomez et al. (2020) sobre Molisoles de la localidad de Sachayoj (Santiago del

Estero), se evaluó el rendimiento de FS de algodón en lotes que previamente habían recibido maíz y soja. En dicho trabajo se comprobó una reducción en la concentración de nitratos en aquellos lotes con maíz previo al algodón y como consecuencia se registraron menores rendimientos de FS. Estos autores concluyeron que la alta relación C/N de los rastrojos y raíces del maíz, tendrían una velocidad de mineralización más lenta que los de soja, generándose un déficit de nutrientes cuando el antecesor del algodón es el maíz, quedando estos disponibles dos campañas después de cosechado dicho cultivo. Por lo tanto, es probable que parte de las diferencias encontradas en FS entre el monocultivo de algodón y los restantes tratamientos, se deban al efecto residual del cultivo de maíz sembrado al inicio del ensayo en T2, T3, T4 y T5.

2.4 Conclusiones

En la búsqueda de alternativas productivas sustentables al monocultivo de algodón, se analizaron distintos indicadores de calidad del suelo a dos profundidades (0 a 5 y 5 a 20 cm) conjuntamente con el rendimiento en fibra del algodón, luego del tercer y cuarto año de un ensayo donde se contrastó la respuesta edáfica entre diferentes secuencias de cultivos bajo siembra directa.

Se observó, independientemente de la profundidad analizada, que las distintas fracciones del carbono edáfico si bien mostraron cierta variabilidad estacional, no fueron sensibles al efecto de los diferentes tratamientos implementados, debido probablemente a las altas temperaturas regionales que generan una rápida mineralización del carbono acumulado, igualando de esta manera las posibles diferencias generadas por los tratamientos. Es factible también, que la corta duración del ensayo influyera para que esas potenciales diferencias no se puedan expresar.

Distinto es lo que sucedió con la estabilidad de agregados, dado que esta propiedad mostró una significativa diferenciación entre tratamientos, siendo T2, T4 y T5 en el estrato superficial y T4 y T5 en el subsuperficial, los que en mayor medida mejoraron su condición estructural respecto al monocultivo de algodón.

La densidad aparente no presentó diferencias entre tratamientos en superficie, observándose un peor comportamiento de esta propiedad a mayor profundidad en T5, probablemente como consecuencia de un mayor número de pasadas del rodado de la maquinaria agrícola en el mismo.

La resistencia a la penetración fue un parámetro más sensible para diferenciar el efecto de los distintos tratamientos respecto a la densidad aparente, mostrando en ambas profundidades que T2 y T5 fueron los que mejor se comportaron.

Por su parte, observando lo sucedido con la conductividad hidráulica medida en sus distintas formas, también surge que T5 y T4 fueron aquellos que obtuvieron los mejores valores en superficie, mientras que T4 determinaron superiores resultados a mayor profundidad.

Las mejoras producidas en estas propiedades, influyeron positivamente en los rendimientos en fibra del algodón, que mostró la mayor productividad en T4 y T5.

De esta manera, el monocultivo de algodón fue el tratamiento con peores resultados en todas las variables edáficas y productivas analizadas, T2, T4 y T5 fueron los que más se diferenciaron en superficie de dicho sistema productivo, mientras que T3 presentó una condición edáfica y de rendimiento en fibra más parecida a T1. A mayor profundidad, si bien T1 y T3 presentaron también la peor calidad en el suelo, las diferencias con los restantes tratamientos fueron menores que los observados de 0 a 5 cm, siendo T4 y T5 los que mejor se comportaron.

Los comentarios recién vertidos se visualizan en las Tablas 2.7 y 2.8. En ellas se puede observar para ambas profundidades, la relación entre los resultados obtenidos por las variables en los diferentes tratamientos, respecto a los valores logrados por las mismas propiedades en T1. Para el caso de DAP y RMP, la relación que se hizo fue entre los valores de T1 respecto a los de cada tratamiento, ya que se supone que un valor mayor en estas últimas propiedades implica una menor calidad del suelo.

De acuerdo con lo mencionado previamente, la suma de todas las relaciones para cada tratamiento resultó ser mayor en superficie para T5, T4 y T2, mientras que a mayor profundidad fue en T4 y T5.

Tabla 2.7. Relación entre los resultados obtenidos por cada variable en cada tratamiento respecto al determinado en el monocultivo de algodón en el estrato de 0 a 5 cm.

Propiedades	Secuencia				
	T1	T2	T3	T4	T5
COT	1	0,99	0,99	1,01	1,03
COA	1	1,01	0,98	1,03	1,02
COP	1	0,96	0,99	0,97	1,04
DMP _{hl}	1	1,16	1,12	1,18	1,27
DMP _{dm}	1	1,1	1,02	1,06	1,13
DMP _{hr}	1	1,07	0,92	1,05	1,09
DMP _{med}	1	1,11	1,02	1,08	1,15
DAP	1	0,98	0,98	0,97	0,98
RMP	1	1,14	0,86	1,02	1,14
Kh _{0cm}	1	1,98	1,08	2,55	1,7
Kh _{1,5cm}	1	1,44	0,88	1,24	1,91
Kh _{3cm}	1	0,99	0,55	0,8	1,05
Log ₁₀ Ks	1	1,4	0,62	1,17	1,1
Sumatoria	13,00	15,33	12,01	15,13	15,61

Tabla 2.8. Relación entre los resultados obtenidos por cada variable en cada tratamiento respecto al determinado en el monocultivo de algodón en el estrato de 5 a 20 cm.

Propiedades	Secuencia				
	T1	T2	T3	T4	T5
COT	1	1,04	1,02	1,03	1,06
COA	1	1,04	1,01	1,05	1,06
COP	1	1,03	1,09	0,95	1,07
DMP _{hl}	1	1,08	0,93	1,14	1,05
DMP _{dm}	1	1,13	1,1	1,2	1,25
DMP _{hr}	1	0,66	0,84	1,48	1,61
DMP _{med}	1	1,05	1,01	1,22	1,23
DAP	1	1	1,02	1,01	0,96
RMP	1	1,08	0,85	1,03	1,14
Log ₁₀ Ks	1	1,53	1,69	2,43	1,33
Sumatoria	10	10,66	10,56	12,54	11,77

Del análisis de dichas tablas, también surge que las variables que menores diferencias relativas aportaron fueron aquellas vinculadas al carbono, mientras que las que lograron los mayores contrastes fueron las ligadas a la estabilidad estructural y al movimiento de agua.

El deficiente comportamiento de T3 en superficie, se debió principalmente a los reducidos valores que obtuvo dicho tratamiento en las propiedades asociadas a la conductividad hidráulica. A su vez, los resultados de esta última variable en T2, T4 y T5 en el estrato superficial, se diferenciaron de T1 sobre todo en aquellas tensiones menores

(Kh_{0cm} y $Kh_{1,5 cm}$), lo que indicaría una mayor presencia de macroporos mayores y continuos en dichos tratamientos respecto a T1.

Al vincular la información de la sumatoria de estas diferencias relativas respecto a T1, con el rendimiento en fibra seca del cultivo de algodón determinado al tercer año del ensayo, se comprueba (Figura 2.19) que hay una asociación importante entre las mejoras en las variables analizadas en ambas profundidades para los distintos tratamientos con el rendimiento en fibra. En este sentido, las mejoras en la calidad del suelo lograda por los tratamientos T5, T4 y T2 en superficie y T5 y T4 en profundidad, explicarían el 60 % y 65 %, respectivamente, de las diferencias en el rendimiento en fibra seca obtenido por el algodón en dichos tratamientos.

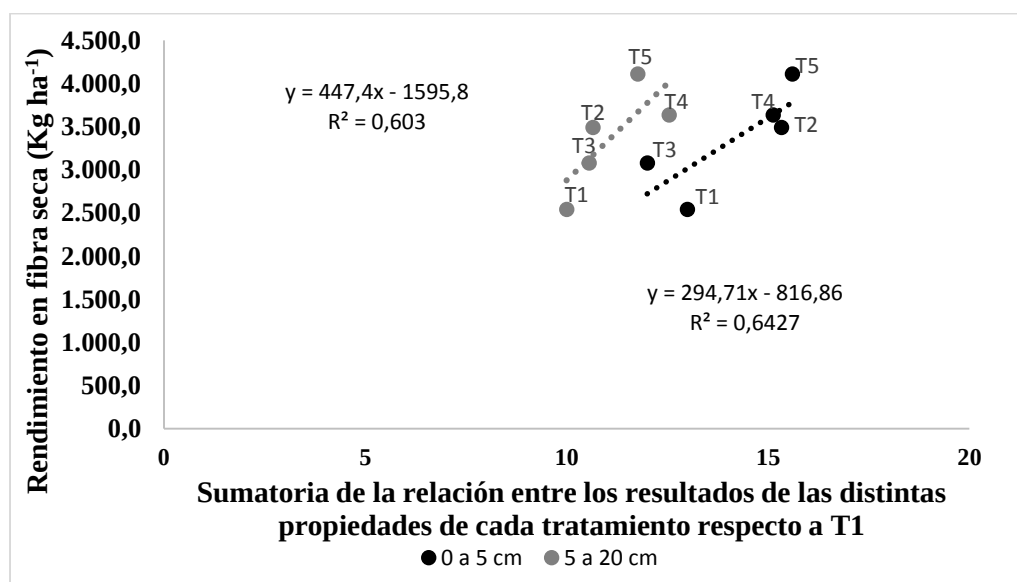


Figura 2.19. Relación entre el rendimiento en fibra seca del cultivo de algodón obtenido por cada uno de los tratamientos con las diferencias relativas en los resultados de las distintas propiedades evaluadas en ambas profundidades del suelo.

Desde el punto de vista del mejoramiento de la calidad del suelo como también teniendo en cuenta el rendimiento en fibra del cultivo de algodón, no solamente el doble cultivo anual se presenta como una alternativa productiva más sostenible al monocultivo, sino que la mayor diversificación de cultivos en la rotación generaría una condición edáfica y productiva mejor. En este sentido, la incorporación de maíz o de soja luego de dos años de algodón determinaron en general, una mejor calidad del suelo y un mayor rendimiento en fibra que el ofrecido por el monocultivo de algodón.

Capítulo 3: *Respuesta de distintas propiedades edáficas al incorporar un Haplustol torriorténtico degradado a la producción bajo riego de cultivos agrícolas o de alfalfa para corte*

3.1 Introducción

La producción agrícola bajo riego de la provincia de Santiago del Estero está basada principalmente en cultivos de alfalfa para corte, maíz, hortalizas y algodón (Coronel de Renolfi y Ortuño 2004; Angella 2016). Esta producción es como consecuencia de un cambio de uso de la tierra, en donde los espacios que hoy están ocupados por cultivos, antes lo eran por monte nativo. A la alta susceptibilidad de estos suelos a ser degradados (Moscuzza et al. 2003; Lorenz 2005; Oneto et al. 2005a; Galizzi et al. 2015), se suman los efectos generados por el desmonte y el uso agrícola.

Diversos autores han documentado una disminución en la calidad química y física de los suelos de Santiago del Estero, como consecuencia del desmonte y su posterior uso agrícola (Albanesi et al. 2003; Sánchez y Arrigo 2006; Osinaga et al. 2014; Rojas et al. 2015; Gomez et al., 2018; Nazar, 2018; Koritko et al., 2019). Otros investigadores (Abril et al. 2005; Sánchez y Arrigo 2006; Nazar 2018; Gomez et al. 2018) especificaron que sería posible revertir o detener los mencionados procesos degradativos con la introducción y/o combinación de prácticas como la SD, rotación de especies, cultivos de cobertura y la incorporación de pasturas. En esta línea y pese a la importancia que tiene la producción de alfalfa para corte en la zona, los registros científicos de su efecto sobre las propiedades físicas de estos suelos son escasos.

En el presente capítulo se muestran los cambios generados por diferentes tipos de uso de la tierra, sobre los primeros 20 cm de un Haplustol torriorténtico. Se contempló el efecto de una pastura de alfalfa para corte (T7), que es de gran importancia económica para la zona de estudio, después de 4 años desde su implantación, contrastando sus resultados con los ya analizados en el capítulo anterior y obtenidos para el doble cultivo anual (T5), quien resultó ser una de las mejores opciones agrícolas entre las evaluadas. A su vez, los resultados de los mencionados usos de la tierra se compararon con los obtenidos en un sitio de “monte nativo” (T6), considerado como el mejor estado en el que el suelo se puede encontrar en la zona de estudio.

3.2 Objetivos e hipótesis

3.2.1 Objetivo general

3. Comparar la respuesta de distintas propiedades edáficas de un Haplustol torriortentico de la región semiárida de Santiago del Estero, al cuarto año de haber iniciado dos sistemas de producción contrastantes bajo riego: alfalfa para corte y agricultura bajo siembra directa, confrontando a su vez con los resultados obtenidos de una situación *cuasi-prístina*.

3.2.2 Objetivos específicos

1. En los estratos de 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de un Haplustol de la provincia de Santiago de Estero, comparar el comportamiento del COT, COA, COP, DMP_{hr} , DMP_{hl} , DMP_{dm} , DMP_{med} , RMP, Kh_{0cm} , $Kh_{1,5cm}$ y Kh_{3cm} , al cuarto año de haber implantado un cultivo de alfalfa para corte y de iniciado un ensayo agrícola bajo siembra directa con una rotación Maiz/Trigo-Algodón/Trigo-Algodón/Trigo-Soja, contrastando a su vez los resultados obtenidos con los de un sitio cuasi-prístino con monte nativo.
2. Determinar cuáles de las variables estudiadas, logran una significativa diferencia entre los usos de la tierra aquí contemplados.
3. Establecer el uso de la tierra con mayor sostenibilidad para la región bajo estudio.

3.2.2.1 Hipótesis

Hipótesis 1: De los tres usos del suelo evaluados, es el sitio *cuasi-prístino* quien logra la mejor performance de los indicadores de calidad edáficos aquí evaluados.

Hipótesis 2: La merma en los resultados de las distintas propiedades evaluadas respecto a la condición natural es mayor en los suelos bajo agricultura con doble cultivo anual.

Hipótesis 3: El carbono orgánico particulado es la propiedad edáfica que logra en mayor medida, distinguir los efectos generados por los distintos sistemas de uso de la tierra evaluados.

Hipótesis 4: La agricultura con doble cultivo anual bajo siembra directa, presenta los mayores valores de densidad aparente, debido al mayor tránsito de la maquinaria.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Propiedades analizadas

Para lograr los objetivos planteados en el presente Capítulo y como ya se mencionó en el Capítulo I, Sección 1.3 de esta tesis, el 10 junio del año 2017 (3^{er} muestreo = F3), al cuarto año de iniciado el ensayo y en forma posterior a la cosecha de los cultivos de verano de la campaña 2016 – 2017, se realizó el muestreo del tratamiento T5. En ese momento, también se realizaron mediciones y toma de muestras de suelo en un sitio con monte nativo o *cuasi-pristino* (T6) y en un ensayo de 4 años de duración con alfalfa bajo riego y para corte (T7). Tanto en T6 como en T7 se midieron las mismas variables que en T5, ya detalladas en el Capítulo 1 (COT, COA, COP, DAP, RMP, DMP_{hr}, DMP_{dm}, DMP_{hl}, DMP_{med}, Kh_{0cm}, Kh_{1,5cm} y Kh_{3cm}), a las mismas profundidades (0 a 5 cm; 5 a 20 cm). Únicamente no se determinó en laboratorio la conductividad hidráulica saturada (Ks).

3.3.2 Análisis estadístico

El análisis de resultados se realizó con el procedimiento de modelos lineales, generales y mixtos, a través de la interfaz de R con el paquete estadístico Infostat 2019 (Di Rienzo et al. 2009). Para el análisis de varianza de los resultados de las distintas propiedades evaluadas en los diferentes tratamientos (T5, alfalfa de 4 años para corte y sitio de monte) en las profundidades 0 a 5 cm y 5 a 20 cm, correspondientes a las variables COT, COA, COP, DMP_{hr}, DMP_{dm}, DMP_{hl}, DMP_{med}, RMP, DAP, Kh_{0cm}, Kh_{1,5cm} y Kh_{3cm}, se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_i = \mu + T_i + B_k + \varepsilon_{ijk}$$

Donde Y es la variable dependiente del tratamiento i y el año j, μ es la media global, T es el efecto fijo del tratamiento i, B es el efecto aleatorio del bloque k y ε_{ijk} es el error experimental.

En el caso particular de las propiedades COT, COA, COP, RMP, DMP_{hr}, DMP_{dm}, DMP_{hl}, DMP_{med}, se modelizó el efecto del tratamiento en la heteroscedasticidad de la varianza (VarIdent). Las propiedades Kh_{0cm}, Kh_{1,5cm} y Kh_{3cm} cumplieron con los supuestos del ANVA sin necesidad de que fuesen modelizadas y/o transformadas.

La comparación de medias se realizó mediante la prueba de diferencias mínimas significativas de LSD de Fisher ($P < 0,05$) protegida por el test F de la ANVA. Se usaron contrastes polinomiales para evaluar el patrón de respuesta a los distintos tratamientos.

Además, se buscó correlaciones de Pearson entre los valores promedio de los tratamientos del resto las distintas variables estudiadas (COT, COA, COP, DMP_{hr}, DMP_{dm}, DMP_{hl}, DMP_{med}, RMP, DAP, Fs, Kh_{0cm}, Kh_{1,5cm} y Kh_{3cm}), para cada profundidad.

3.4 Resultados y discusión

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados del análisis de varianza, realizado para comparar el efecto generado sobre las propiedades edáficas citadas, por los dos usos de la tierra mencionados y por una situación con mínimo disturbio.

Se comprobó para las dos profundidades, que las situaciones evaluadas influyeron significativamente sobre el stock de carbono orgánico total y su fracción lábil (COP), mientras que la componente recalcitrante (COA) solo fue afectada entre los 0 a 5 cm de suelo. Por su parte, el DMP_{dm}, DMP_{hr} y DAP también mostraron diferencias significativas de acuerdo a los distintos usos de la tierra para ambas profundidades. El DMP_{med} solo mostró diferencias entre los sitios evaluados en el estrato superficial, mientras que la RMP únicamente lo hizo en el subsuperficial. Por su parte, el DMP_{hl} no mostró diferencias entre las distintas situaciones para ninguno de los dos estratos. A su vez, el movimiento del agua en el suelo, estimado en superficie para distintas tensiones, logro establecer diferencias entre los distintos usos de la tierra evaluados.

Tabla 3.1. Análisis de varianza del efecto de dos usos de la tierra contrastantes (agricultura y pastura para corte) y de una situación de referencia (monte), sobre distintas propiedades edáficas, correspondientes a dos profundidades (0 a 5 y 5 a 20 cm)

Variable	Profundidad de 0 a 5 cm		Profundidad de 5 a 20	
	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor
COT (t ha^{-1})	10,38	0,0060*	4,22	0,0494*
COP (t ha^{-1})	12,26	0,0037*	25,34	0,0003*
COA (t ha^{-1})	5,2	0,0358*	1,67	0,2472
DMP _{hr} (mm)	3,35	0,0475*	11,64	0,0043*
DMP _{dm} (mm)	30,4	0,0002*	49,64	<0,0001*
DMP _{hl} (mm)	0,87	0,4560	0,59	0,5760
DMP _{med} (mm)	3,46	0,0488*	2,48	0,1449
RMP (MPa)	2,14	0,1798	15,47	0,0018*
DAP (gr cm^{-3})	311,08	<0,0001*	127,43	<0,0001*
Kh _{0cm} (mm h^{-1})	8,23	0,0114*		
Kh _{1,5cm} (mm h^{-1})	22,99	0,0005*		
Kh _{3cm} (mm h^{-1})	139,23	<0,0001*		

(*): diferencias estadísticas significativas ($p\text{-valor} < 0,05$); COT: Stock de carbono orgánico total; COP: Stock del carbono orgánico particulado; COA: Stock del carbono orgánico asociado; DMP_{hr}: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento rápido; DMP_{dm}: diámetro medio ponderado correspondiente a disgregación mecánica; DMP_{hl}: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento lento; DMP_{med}: diámetro medio ponderado promedio; RMP: resistencia mecánica a la penetración; DAP: densidad aparente; Kh_{0cm}: conductividad hidráulica a 0 cm de tensión; Kh_{1,5cm}: conductividad hidráulica a 1,5 cm de tensión; Kh_{3cm}: conductividad hidráulica a 3 cm de tensión.

3.4.1. Resultados del carbono orgánico total (COT), asociado (COA) y particulado (COP), obtenidos por los distintos usos de la tierra (agricultura, pastura para corte y monte).

3.4.1.1. COP, COA y COT en ambas capas de suelo

En la Figura 3.1 se muestran los stocks de las diferentes fracciones del carbono orgánico entre los 0 y 5 cm, expresados en t ha^{-1} y referenciados a una masa equivalente de $514,5 \text{ t ha}^{-1}$.

Los stocks de COT y sus fracciones (COP y COA), mostraron que los valores más altos fueron registrados en el sitio *cuasi-pristino*, mientras que los sectores con intervención antrópica (agricultura y pastura) no lograron diferenciarse entre sí (Figura 3.1). El monte presentó valores de COT al menos un 83,4 % más altos que los registrados en los otros dos usos de la tierra. Es decir que el COT se redujo como consecuencia del uso previo y del generado por ambos ensayos, al menos en un 45,6 % respecto al monte. Los stocks del COA Y COP del monte fueron al menos 1,20 t ha⁻¹ y 2,88 t ha⁻¹, respectivamente, mayores a los registrados en los suelos bajo agricultura o pastura para corte. Por lo tanto, estas fracciones de carbono se vieron reducidas en ambos tratamientos en al menos un 26,8 % y 63,6 % respectivamente, respecto a la condición con mínimo disturbio. De esta manera se confirma una reacción diferencial de ambas fracciones del carbono, con una merma más intensa debida al uso de la tierra en la componente más lábil del carbono.

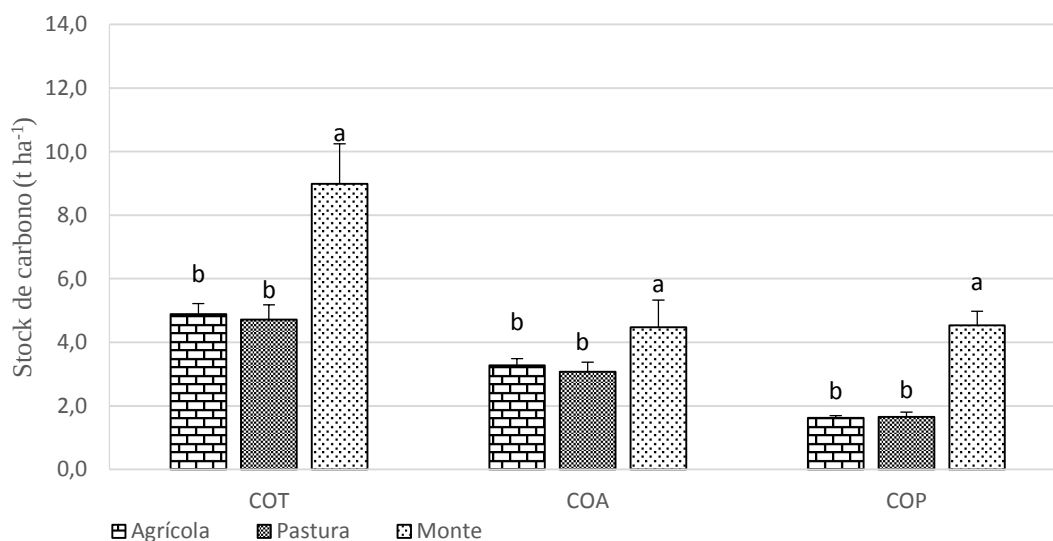


Figura 3.1. Resultados del stock de COT, COA y COP entre los 0 y 5 cm de profundidad para los distintos usos de la tierra evaluados. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para una misma variable.

El sitio con alfalfa para corte, posee una historia previa similar al ensayo de sucesiones de cultivos estudiado en el Capítulo II, dentro del cual se encuentra el T5. No obstante, el uso de la tierra fue distinto posteriormente en ambos sitios, basando sus diferencias, en la disímil producción de biomasa aérea y radicular y en las labores efectuadas en cada uno de los dos ensayos. Es de recordar que a diferencia del T5, el

suelo bajo alfalfa no recibe aportes importantes de la biomasa aérea, ya que dicho material es retirado luego de cada corte, y por lo tanto los aportes de materia orgánica en el alfalar son principalmente de origen radicular. A pesar de ello, no se obtuvieron diferencias en ninguna de las fracciones del carbono superficiales analizadas entre ambos usos de la tierra. Si bien se desconocen los niveles de carbono al inicio de ambos ensayos, se asume que los mismos fueron bajos dada la extensa y continua historia agrícola previa. Sin embargo, no se ha podido establecer un proceso diferencial entre ambos tratamientos, ya sea de recuperación o de mayor deterioro para estas propiedades

Sánchez y Arrigo (2006) encontraron en la zona de riego de Santiago del Estero, resultados de contenido de carbono total de los primeros 10 cm de suelo similares a los determinados en esta tesis, luego de transcurrir al menos 13 años de producción agrícola desde el desmonte. En dicho trabajo, el monte también presentó valores de COT de hasta un 80% superiores a los presentados por los suelos bajo agricultura en SD y con las siguientes rotaciones: 1) tres ciclos de la secuencia maíz- algodón-maíz; 2) tres años de alfalfa sumado a un ciclo de la secuencia algodón-maíz-alfalfa, las cuales tampoco se diferenciaron entre sí en el contenido de carbono orgánico.

Osinaga et al. (2014), trabajando con Molisoles del centro-este de la provincia de Santiago del Estero, registraron entre los 0 a 5 cm de suelo de distintos sitios con 20 años de historia agrícola, valores de COT 54% menores a los encontrados en monte nativo. Este valor representa una diferencia de un 11,6% superior a la registrada entre el COT de T5 y T7 determinado en esta tesis para igual profundidad. Sainz Rozas et al. (2011) afirmaron que, en el estrato superficial de los suelos correspondientes a la Región Semiárida del norte argentino, la caída del COT debido al uso agrícola posterior a un desmonte, oscila entre el 36 % y el 53 %, ubicándose los resultados hallados en esta tesis dentro de dicho intervalo. Koritko et al. (2019) determinaron en Molisoles del centro-este de la provincia de Santiago del Estero, que la caída del COT de los primeros 5 cm de suelo luego de 3 años de agricultura bajo SD y realizada en forma posterior al desmonte, fue del 40 %. No obstante, estos autores también mencionaron que los niveles de COT se mantuvieron estables entre el tercer y decimoséptimo año posteriores al inicio del uso agrícola.

Por su parte, Sánchez y Arrigo (2006) encontraron en los primeros 10 cm de suelo, que los valores de COP del monte fueron entre un 62,5 % y un 116,7 % mayores a los registrados en las secuencias agrícolas mencionadas previamente, siendo el último porcentaje al menos un 52,7 % superior a la merma del COP registrada en esta tesis. A

su vez, estos autores determinaron que el suelo del monte superó a los agrícolas en el COA en un 49,8 %, siendo dicha diferencia un 23 % superior a la encontrada en el presente trabajo. Koritko et al. (2019) encontraron en los primeros 5 cm de un Molisol del este de Santiago del Estero, que el COP y COA en sitios de monte fue 60 % y 30 % respectivamente superior al de lotes con 3 años de historia agrícola, cultivados siempre bajo SD. Estos autores mencionaron que esta diferencia se mantuvo estable durante 14 años, resultados coincidentes con lo hallado en la presente tesis, donde los cambios fueron del 63,6 % para el COP y del 26,84 % para el COA.

En el presente trabajo se determinó a los 0 y 5 cm profundidad una fuerte correlación del COT con el COP (p-valor = $<0,0001$; coeficiente de correlación = 0,97) y el COA (p-valor = $<0,0001$; coeficiente de correlación = 0,80). A su vez, el COP representó el 33,1%, 34,9 % y 50,4 % del COT en los sitios bajo agricultura, pastura y monte, respectivamente. Otros autores también registraron mayores proporciones de COP en los suelos de monte. En este sentido, Koritko et al. (2019) luego de 17 años de uso agrícola bajo siembra directa, observaron en los primeros 5 cm que el COP representaba aproximadamente un 25 % del COT, mientras que en el monte esta proporción era del 52 %. Por su parte, Sánchez y Arrigo (2006) determinaron porcentajes de COP respecto al COT (0-10 cm) del 50 %, 43 % y 62 % en suelos bajo agricultura, pastura de alfalfa y monte respectivamente. En comparación con lo determinado por estos autores, los resultados de las distintas fracciones de carbono obtenidos en esta tesis, fueron menores y podrían estar asociadas a la mayor historia agrícola de los suelos aquí estudiados, sumado a la utilización de prácticas de producción poco conservacionistas aplicadas los años previos a la implantación de los cultivos/manejos evaluados en esta tesis. En base a los antecedentes citados y a las diferencias encontradas en los 0 y 5 cm de profundidad entre el suelo del monte y las otras dos situaciones evaluadas (agricultura y pastura), la fracción de carbono proporcionalmente más afectada por los dos usos antrópicos, fue el carbono lábil (COP), siendo esta fracción la que en principio es más afectada por el uso de la tierra.

En la Figura 3.2 se muestran los valores de COT, COP y COA para el estrato de 5 a 20 cm, expresados en $t\ ha^{-1}$ y referenciados a una masa equivalente de $1570,5\ t\ ha^{-1}$

Entre los 5 y 20 cm de profundidad, solo los stocks de COT y COP presentaron diferencias significativas entre tratamientos. El suelo del monte, con un valor de COT de $12,78\ t\ ha^{-1}$ y de COP de $1,55\ t\ ha^{-1}$, fue al menos 15,2 % y 32,3 %, respectivamente, mayor a los correspondientes bajo agricultura y pastura para corte. Solo en el COP y a

esta profundidad se registraron diferencias entre estos dos últimos tratamientos, en donde el suelo con alfalfa, con un valor $1,05 \text{ tn ha}^{-1}$, superó significativamente en un 35,2 % al doble cultivo anual (Figura 3.2).

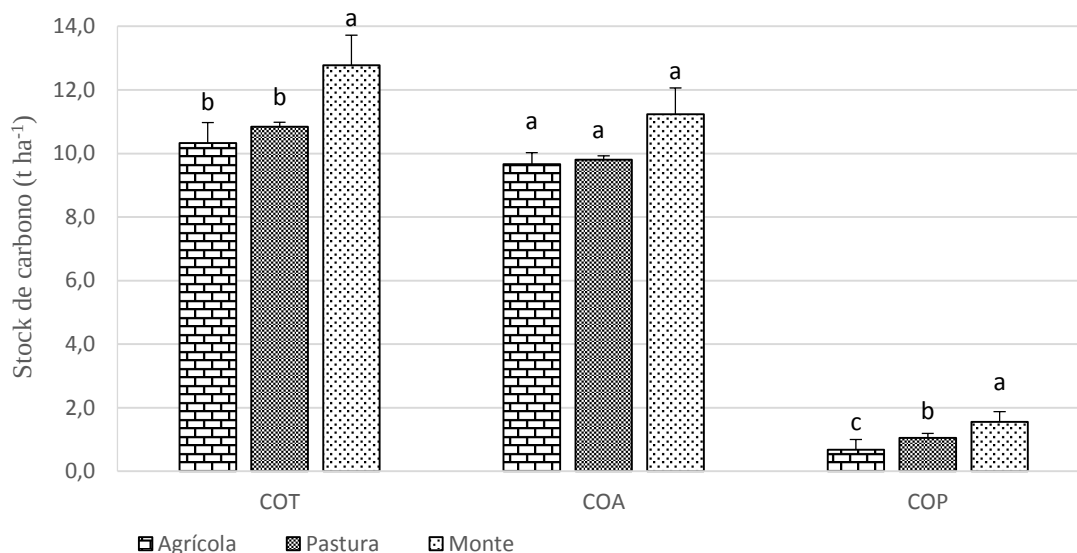


Figura 3.2. Resultados del stock de COT, COA y COP entre los 5 a 20 cm de profundidad para los distintos usos de la tierra evaluados. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para una misma variable.

Osinaga et al. (2014) trabajando en el estrato de 5 a 20 cm de Molisoles del centro-este de la provincia de Santiago del Estero, encontraron que el COT de lotes con 6 a 9 años de SD posterior al desmonte, fue un 64,0 % menor al del monte nativo, manteniéndose esta diferencia hasta los 20 años de uso agrícola. Gomez et al. (2019) al comparar lotes con más de 5 años bajo agricultura, con sitios prístinos ubicados en el oeste de la provincia de Santiago del Estero encontraron que, en los primeros 20 cm de profundidad de los Molisoles con uso agrícola, el contenido de COT era 30 % inferior. Koritko et al. (2019) mostró que el COT de los 5 a 20 cm de profundidad, fue un 50% más bajo en lotes con 6 años de historia agrícola que en el monte nativo, mientras que esta diferencia se incrementó al 60% para el COP. estos autores concluyeron que las diferencias antes mencionadas, se mantuvieron sin cambios hasta los 17 años (Koritko et al. 2019).

Como se evidencia en la Figura 3.2, la única diferencia entre los tratamientos con intervención antrópica se registró en el COP del estrato más profundo, resultados que se asemejan a lo observado por Sánchez y Arrigo (2006), quienes a pesar de no encontrar diferencias en el COP entre los 10 y 20 cm de profundidad, mencionaron que aquellas

rotaciones donde se incorporaba la alfalfa lograban una tendencia a incrementar las concentraciones de la fracción más lábil del carbono del suelo. Esto podría ser explicado por la continua descomposición y transformación de la materia seca de raíces que es aportada por el alfalfar durante todo el año, cuyas características composicionales permiten una fácil biodegradación (Rovira y Vallejo 2002), contribuyendo así a la fracción lábil del carbono del suelo (Sánchez y Arrigo 2006).

Basado en lo hasta aquí desarrollado, tanto para el estrato superficial como en el sub-superficial, el sitio de monte registró los stocks más altos de COT y COP cuando se lo comparó con los suelos con intervención antrópica. Varios autores aseguran que el uso agrícola de la tierra en ambientes semiáridos, produce una importante reducción en los contenidos del carbono total y de su fracción más lábil luego del desmonte (Stevenson 1986; Sánchez y Arrigo 2006; Osinaga et al. 2014; Koritko et al. 2019). Si bien dichas pérdidas se dieron en las dos profundidades estudiadas en esta tesis, las reducciones registradas por otros autores para el estrato de 5 a 20 cm podrían ser hasta de magnitudes mayores que las registradas en el presente trabajo.

La disminución cuantitativa del carbono orgánico total y de sus fracciones es estimulada por las altas temperaturas (Abril et al. 2013). Al producirse el desmonte, se genera una mayor exposición del suelo a la radiación solar y consecuentemente a un incremento de su temperatura entre 6° a 9° C (Casas y Mon 1983), generándose de esta manera efectos negativos para el almacenamiento del carbono en el suelo (Stockmann et al., 2013) por aceleración de los procesos degradativos (Stevenson 1986; Serril et al. 2018). En este sentido, varios autores registraron una acentuada caída en los contenidos de COP y COA al pasar del monte al uso agrícola y al aumentar el tiempo de uso agrícola (Roldán et al. 2000; Albanesi et al. 2003; Barbero et al. 2010; Koritko et al. 2019). A lo antes expuesto se suma que tanto el sitio bajo agricultura como en el que se instaló la pastura se aplica riego suplementario, determinando de esta manera que la humedad no sea una limitante para el desarrollo de los procesos de descomposición de la materia orgánica (Álvarez y Álvarez 2000), favoreciéndose aún más las pérdidas de carbono.

Por otra parte, los elevados niveles de carbono del suelo registrados en el monte se asocian con la baja o nula extracción de la materia seca producida en este ambiente por la acción antrópica, una mejor calidad y mayor cantidad de residuos aportados a gran parte del perfil por la vegetación espontánea que allí se desarrolla, como también al tipo, calidad y diversidad microbiana presente en estos sitios (Galantini 2001; Albanesi et al. 2003; Sánchez y Arrigo 2006; Anriquez et al. 2014). Los residuos vegetales del monte

polifítico caducifolio contribuyen de manera diferencial a las fracciones del carbono del suelo, ya que el tipo y composición del mantillo inciden significativamente en su estabilidad (Abril et al. 2013; Lal et al. 2014). El carbono orgánico del suelo incluye compuestos que están en un continuo estado de transformación sobre el cual interviene fundamentalmente la calidad del material vegetal aportado por la vegetación presente (Galantini y Suñer 2008).

3.4.2. Resultados de densidad aparente (DAP) para los distintos usos de la tierra (agrícola, pastura para corte y monte).

3.4.2.1. DAP en ambas capas de suelo

En la Figura 3.3 se muestran los valores de DAP determinados a la profundidad de 0 a 5 cm y 5 a 20 cm para los distintos usos de la tierra evaluados. De la misma se desprende que el comportamiento de esta variable fue similar en ambas profundidades, encontrándose los valores más altos en el uso agrícola y los más bajos en el monte, con valores intermedios y diferentes a los otros dos en la pastura de alfalfa para corte. De esta manera, el monte en los primeros 5 cm de profundidad registró una densidad 10,7% y 16,8% menor que la pastura y las parcelas bajo agricultura, respectivamente (Figura 3.3), mientras que entre los 5 y 20 cm las diferencias entre el monte y los otros dos usos de la tierra se ampliaron, obteniéndose en el sitio no disturbado valores de DAP un 15,4 % menores a los registrados en el alfalfar y un 22,5 % menores a los logrados por el doble cultivo anual.

Osinaga et al. (2014), trabajando sobre Haplustoles del este de la provincia de Santiago del Estero, registraron en los primeros 10 cm de profundidad, valores de DAP un 27,5 % inferiores en el monte respecto a situaciones con 20 años de agricultura bajo SD. Por su parte, Gomez et al. (2019) trabajando sobre los primeros 20 cm de Haplustoles de Santiago del Estero, registraron en sitios no disturbados, valores de DAP un 15,3 % inferiores a los registrados en suelos con más de 5 años de agricultura con SD. Pese a ello, la DAP determinada en los suelos bajo agricultura o pastura del presente trabajo y en los anteriormente mencionados, no superaron el umbral estipulado por Reynolds et al. (2002), quienes definieron al mismo en $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ para los suelos limosos. Según estos autores, por encima de este valor el crecimiento de las raíces se detiene, existiendo así un impedimento para el normal desarrollo y crecimiento de las raíces.

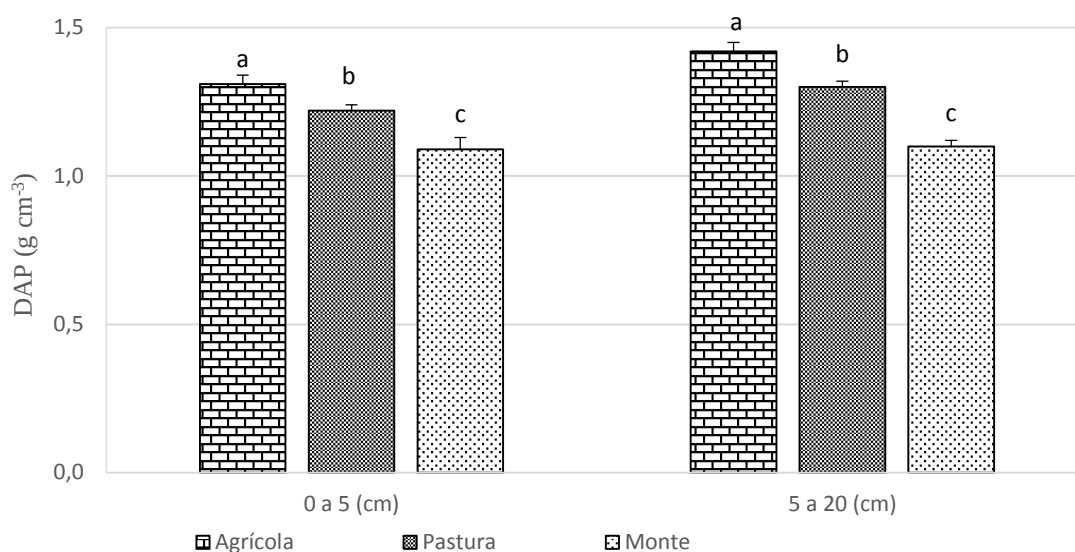


Figura 3.3. Resultados de DAP entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los distintos usos de la tierra evaluados. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para la misma profundidad.

En el mismo sitio de monte evaluado en esta tesis, Anriquez et al. (2005) encontraron que los valores de DAP oscilaron entre 0,62 y 1,18 g cm⁻³ en los primeros 15 cm de profundidad. Coincidiendo con los resultados de esta tesis, Gomez et al. (2019) registraron un valor de 1,09 gr cm⁻³ en los primeros 20 cm de suelos de monte ubicados en el centro-oeste de la provincia de Santiago del Estero, mientras que, en aquellos con más de 5 años de historia agrícola bajo SD, determinaron un promedio de DAP de 1,31 gr cm⁻³.

Se comprobaron correlaciones negativas para el estrato superficial entre la DAP y todas las fracciones del carbono orgánico evaluadas: COT (p-valor=0,0003; coeficiente de correlación = -0,80), COP (p-valor=0,0002; coeficiente de correlación = -0,65) y COA (p-valor=0,009; coeficiente de correlación = -0,82). Sin embargo, a mayor profundidad solo se comprobó una correlación significativa entre DAP y COP (p-valor=0,0004; coeficiente de correlación = -0,79). En este mismo sentido, son muchos los autores que han asociado los incrementos de la DAP en lotes bajo agricultura con la pérdida de COT, especialmente con disminuciones del COP (Coria, 2004; Rojas, 2012).

En los suelos del área de riego del Rio Dulce, también se han comprobado pérdidas de COT y/o COP al pasar de un suelo prístino o cuasi-prístino al uso agrícola, al mismo tiempo que incrementos en la DAP (Lorenz 1995; Anriquez et al. 2005; Koritko et al. 2019; Gomez et al. 2019). Estos aumentos están fuertemente influenciados por la

disminución del carbono orgánico del suelo, la presión sobre el suelo que ejerce el tránsito de la maquinaria agrícola (Álvarez y Steinbach 2009; Álvarez et al. 2012), el peso de la lamina de agua de riego, el estallido de agregados que dicho riego podría generar (Galizzi et al. 2014), y a una disminución de la actividad de la macrofauna del suelo como consecuencia de la perturbación producida por el uso agrícola (Álvarez et al. 2009a). A su vez, la densificación debida al tránsito de la maquinaria, es mayor aun cuando los suelos bajo agricultura tienen una baja o nula remoción (Botta et al. 2004; Zanettini et al. 2014). Esto se evidencia al observar lo sucedido en el T5 (Figura 3.3), con un mayor tránsito respecto a la pastura de alfalfa, donde gran parte de las labores se realizan sin maquinarias (con excepción de la siembra y eventuales cortes y controles fitosanitarios). Este comportamiento fue más evidente en profundidad, en parte por la menor acumulación de materia orgánica entre los 5 a 20 cm, contrastando con lo que sucede en superficie donde hay una mayor acumulación de carbono, producto de la descomposición de los residuos de cosecha (Sánchez y Arrigo 2006; Rojas et al. 2015). Lo antes mencionado implicaría un mayor riesgo de que procesos de degradación física afecten el estrato subsuperficial de estos suelos. Debido a ello, la densificación como consecuencia del efecto del rodado (Botta et al. 2004), se manifiesta con mayor intensidad a dicha profundidad. A su vez, en el estrato de 5 a 20 cm la pastura obtuvo un mayor contenido de COP que el sitio agrícola (Figura 3.2), esto junto con otras variables permitiría explicar la acentuada diferencia registrada entre las densidades aparentes de los suelos bajo los usos antes mencionados.

De esta manera y dado que no existieron diferencias significativas entre T5 y T7 en el contenido de carbono superficial (Figura 3.1), la mayor DAP en T5 respecto a T7 se debería fundamentalmente al mayor tránsito de la maquinaria agrícola experimentado por el primer tratamiento mencionado. Por su parte, en el estrato subsuperficial habría influido también en las diferencias de DAP determinadas entre ambos usos de la tierra, el distinto contenido de COP registrado (Figura 3.2). Por lo tanto, el suelo bajo agricultura (con un mayor número de pasaje de maquinarias) fue el que presentó mayores valores de DAP, siguiéndole con valores más bajos la pastura (con un menor tránsito) y por último el monte, quien no presenta tránsito de maquinaria, presión ejercida por una lamina de agua de riego y cuyo contenido carbono fue el mayor.

3.4.3. Resultados de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) para los distintos usos de la tierra (agricultura, pastura para corte, monte).

3.4.3.1. RMP en ambas capas de suelo

Para el caso de las parcelas bajo alfalfa y con el doble cultivo, las determinaciones de esta propiedad fueron realizadas tres días después de un riego, mientras que para el monte se realizaron 3 días después de una copiosa lluvia, logrando así la uniformidad en el contenido hídrico de los distintos suelos analizados (Tabla 3.2). Por el mismo motivo, no se registró una correlación significativa entre los valores de humedad y la RMP (p -valor = 0,4707 y 0,6157 para los estratos de 0 a 5 cm y 5 a 20 cm, respectivamente). El valor medio de humedad gravimétrica para el estrato superficial fue de 20,4 %, con extremos de 18,8 % y 22,5 %, mientras que en el estrato más profundo se obtuvo un promedio para esta propiedad de 20,9 %, con valores extremos de 19,8 % y 22,3 %.

Tabla 3.2: Análisis de varianza de la humedad gravimétrica del suelo, entre los distintos usos de la tierra y para las profundidades de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm.

Efecto	Humedad gravimétrica del suelo (% p/p)			
	Profundidad de 0 a 5 (cm)		Profundidad de 5 a 20 (cm)	
	F-Valor	p-Valor	F-Valor	p-Valor
Uso del suelo	10,04	0,96370	1,09	0,3823

(*): diferencias estadísticas significativas (p -valor < 0,05)

En la Figura 3.4 se observa que los valores de RMP de las dos profundidades estudiadas, no lograron superar el límite crítico de 2 MPa, por encima del cual disminuye el crecimiento radicular (Drganc et al. 2000; Chen et al. 2005). En los primeros 5 cm de suelo no se observaron diferencias significativas para esta propiedad entre los distintos usos de la tierra evaluados, a pesar de que se observó una tendencia a un incremento en los registros de RMP para el monte y la alfalfa. Contrariamente, entre los 5 y 20 cm del suelo bajo agricultura se logró un valor de 1,75 MPa, superando significativamente al resto en un 22,4 %.

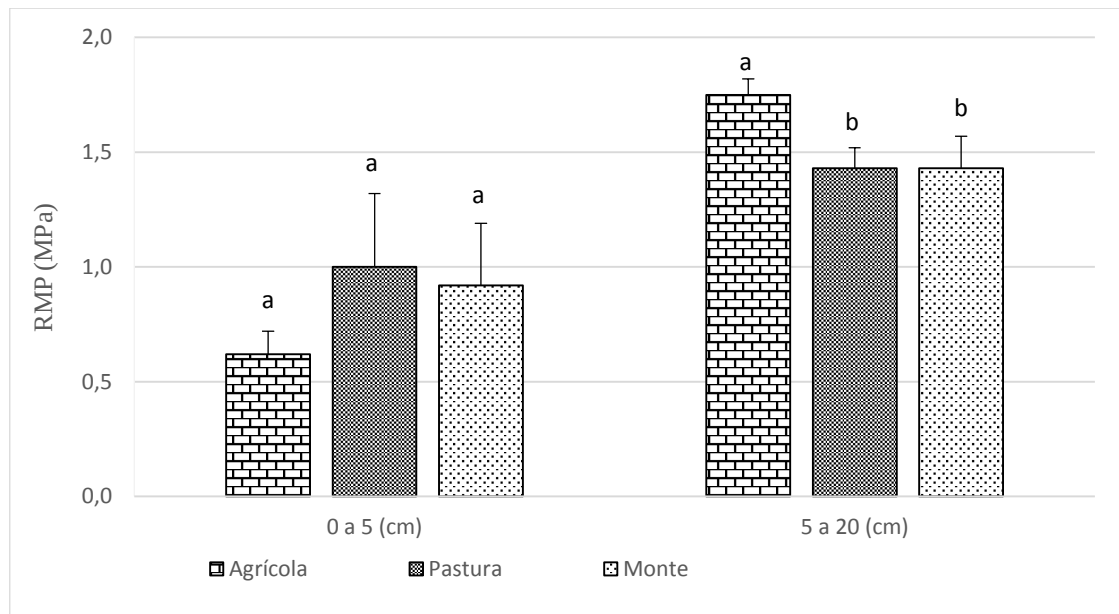


Figura 3.4. Resultados de RMP entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad para los distintos usos de la tierra. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para la misma profundidad.

En un estudio realizado sobre los primeros 20 cm de Haplustoles de la Región Pampeana Argentina, sometidos a tres usos de la tierra contrastantes (prístino, agrícola que en la rotación de cultivos que incorpora gramíneas y agrícola con monocultivo), Kraemer (2015) determinó para los primeros 10 cm de profundidad un comportamiento similar al de esta tesis, al no encontrar diferencias entre la situación prístina y los sitios bajo agricultura. Sin embargo, entre los 10 a 20 cm de profundidad y con valores cercanos a los 2,5 MPa, el mencionado autor tampoco registró diferencias al contrastar los resultados del tratamiento agrícola que contempla una rotación de diferentes cultivos, respecto a los del sitio prístino

En un Haplustol torriorténtico con 20 años de uso agrícola, correspondiente a la zona de riego de Santiago del Estero, Nazar (2018) luego de 4 años de implementar una rotación en siembra directa con doble cultivo anual que combinó maíz, soja, algodón y trigo, registró una resistencia a la penetración de 1,2 MPa. en los primeros 5 cm y de 1,8 MPa. entre los 5 y 20 cm. Este autor determinó también para el sitio prístino, un valor medio de RMP de 0,72 MPa. y 0,86 MPa., respectivamente, para los estratos de 0 a 5 y 5 a 20. Los niveles de esta propiedad obtenidos por Nazar (2018) a mayor profundidad del sitio agrícola, son casi el doble a los obtenidos en el presente trabajo de tesis, mientras que los correspondientes al monte son inferiores en ambos estratos de suelo.

Numerosos autores concluyeron que el sistema de implantación de cultivos bajo SD produce un incremento en la resistencia a la penetración (Mahboubi et al. 1993;

Chagas et al. 1994; Botta et al. 2004), encontrándose esta propiedad directamente relacionada con el número de pasadas que realizan los implementos agrícolas, con el peso de la maquinaria utilizada y con la humedad del suelo al realizar las labores (Chancellor 1977; Botta et al. 2002; Botta et al. 2008; Wilson et al. 2010), como también con algunas propiedades del suelo como su textura, contenido de materia orgánica y su estado de degradación física (Tardieu 1984; Buschiazzo y Panigatti 1996; Oneto et al. 2005a; Sasal 2012; Kraemer 2015). Además, dicho proceso se encuentra influido por el tipo de cubiertas utilizado y la presión de inflado de los neumáticos (Botta et al. 2004; Pozzolo y Ferrari 2007). Como resultado de este proceso de densificación, se ha constatado en suelos limosos de la Región Pampeana sometidos a SD continua, la presencia de estructuras de tipo laminar (Sasal et al. 2006; Morrás et al. 2012, Sasal 2012; Álvarez et al. 2014), que generan una disminución en la permeabilidad de los suelos y en el crecimiento en profundidad de las raíces de los cultivos (Wilson et al. 2010). En este sentido, Nazar (2018) registró la presencia de estructuras laminares en los sectores agrícolas de la zona de riego del Río Dulce, concluyendo que su formación son consecuencia de una prolongada historia de uso agrícola de estos suelos, el tránsito de la maquinaria y los efectos del riego por inundación. Por su parte, Galizzi et al. (2018) mencionaron que el uso agrícola bajo siembra directa y el riego por inundación aplicados sobre Haplustoles torriorténticos de la zona de riego de Santiago del Estero, generan cambios estructurales en los primeros 20 cm de profundidad que incrementan los niveles de RMP del suelo.

Las diferencias en RMP registradas en esta tesis en el estrato más profundo (Figura 3.4), están asociadas al diferente tránsito de la maquinaria experimentado por cada una de las situaciones evaluadas. En este sentido, el sitio agrícola es el que tiene un mayor número de labores culturales y por consiguiente es el que obtuvo los valores más altos de RMP, seguido por el ensayo de alfalfa con menor uso de herramientas de labor y por último el monte con nula actividad de la maquinaria. Respecto al comportamiento de la alfalfa, López Báez et al. (2018) mencionaron a este cultivo como un potencial subsolador biológico, donde las características de su raíz pivotante permitirían mantener niveles bajos de RMP en sistemas agrícolas continuos. Es de destacar también que la DAP tuvo una mayor sensibilidad que esta propiedad para detectar los efectos del diferente manejo de los suelos, dado que la misma pudo separar estadísticamente en ambas profundidades el comportamiento de los tres tratamientos evaluados.

3.3.4. Resultados de estabilidad estructural según los distintos usos de la tierra.

3.4.4.1. Pretratamiento de humedecimiento rápido (DMP_{hr}).

3.4.4.1.1. DMP_{hr} en ambas capas de suelo

En la Figura 3.5 se observa en ambas profundidades, que el sitio con mínimo disturbio logró los mayores valores de resistencia al estallido, obteniendo un DMP_{hr} de 1,59 mm para el primer estrato de suelo y de 1,55 mm para el segundo. Sin embargo, en los primeros 5 cm de suelo el monte no logró diferenciarse en esta propiedad de la alfalfa, como tampoco de 5 a 20 cm del doble cultivo. La menor resistencia a este agente de desagregación en el estrato superficial fue bajo el doble cultivo anual, logrando un valor de DMP_{hr} un 73,3 % más bajo que el del monte, sin lograr diferenciarse a su vez del de la alfalfa. Por otro lado, en el estrato de suelo de 5 a 20 cm, el tratamiento con 4 años de alfalfa fue el que obtuvo el valor significativamente más bajo de resistencia al efecto del estallido, siendo su DMP_{hr} un 72,2 % menor que el sitio de monte y un 60,7 % inferior al doble cultivo.

Kraemer (2015) trabajando con Molisoles de la región pampeana, determinó también para los primeros 15 cm de profundidad, que los suelos correspondientes a los ambientes naturales eran más resistentes al estallido de los agregados, que aquellos provenientes de sitios agrícolas bajo SD. Este autor destacó que estos resultados estaban fuertemente influenciados por los mayores niveles de COT presentes en los sitios con poco disturbio. En la presente tesis y a pesar de que el comportamiento del DMP_{hr} en la capa de suelo entre los 0 a 5 cm presenta un comportamiento similar al registrado por Kraemer (2015) (donde existe una mejor performance del sitio prístino al compararlo con el agrícola), no se registran correlaciones entre esta variable con el COT, COA o COP.

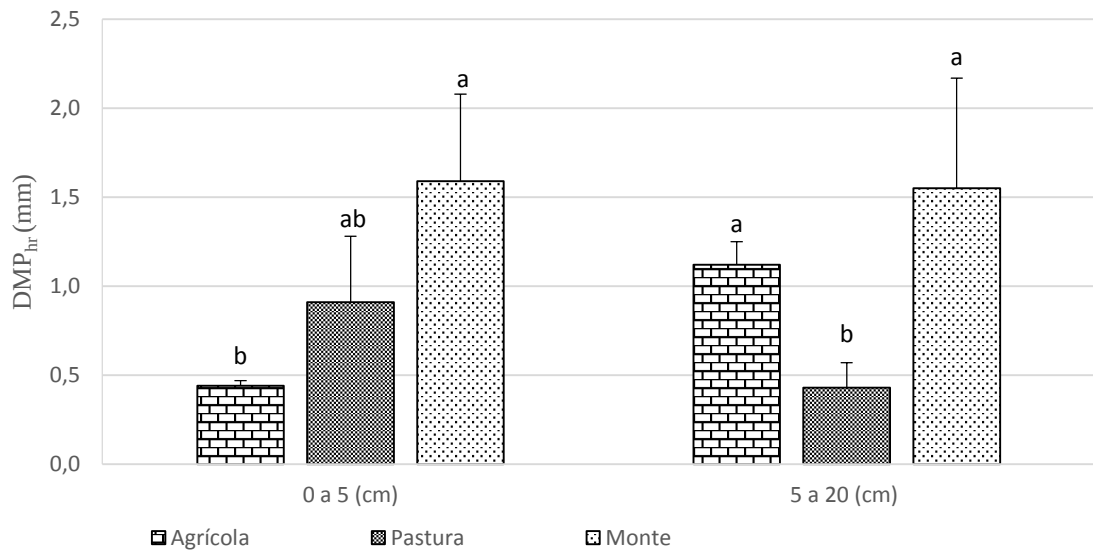


Figura 3.5. Resultados del pretratamiento humedecimiento rápido (DMP_{hr}) entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los diferentes usos de la tierra. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para una misma profundidad.

Entre los 5 y 20 cm de profundidad se registraron correlaciones significativas entre el DMP_{hr} y el COT (p -valor= 0,0166; coeficiente de correlación= 0,61) y COA (p -valor= 0,0052; coeficiente de correlación=0,68). Esto indicaría que el carbono del suelo a esta profundidad funcionó como agente de agregación, impidiendo que ocurra el estallido de los agregados (Dexter 1988; Oades 1993; Novelli et al. 2013; Rubio et al. 2019), siendo este comportamiento más evidente en los suelos limosos como el analizado en el presente estudio (Gabioud et al. 2011).

Al analizar en el capítulo anterior los resultados de esta propiedad, se observó una mayor estabilidad de los agregados provenientes del doble cultivo anual (T5). Las gramíneas tienen una gran capacidad de influir positivamente en la formación y estabilización de los agregados del suelo (Bronick y Lal 2005). Por lo tanto, la presencia de trigo y maíz en dicho tratamiento fue beneficioso y le otorgó una ventaja con respecto a la alfalfa para corte a nivel subsuperficial. Esto podría estar dado por el desarrollo de raíces fibrosas y extensas aportadas por las gramíneas, asociado con la alternancia de sistemas radicales pivotantes (cultivos de soja y algodón), permitiendo combinar diferentes formas de exploración del suelo como así también por la presencia de distintas calidades de residuos provenientes de las raíces a nivel subsuperficial y por una estructura

y composición más diversa de la población microbiana resultante (Silverman 2016; Serri et al. 2018). Como consecuencia, al incrementarse la actividad biológica se generó una mejora en la estabilidad de los agregados (Cosentino et al. 2006), debido al aumento de sustancias que mejoran la cohesión y la hidrofobicidad de los agregados (Jouany et al. 1992; Sullivan 1990).

La combinación interespecífica de raíces, generaría en estos suelos mejoras en la estructura a nivel subsuperficial (5 a 20 cm), logrando valores similares para esta propiedad a los obtenidos por el monte. Esto no sucedió en los primeros 5 cm, donde los resultados de DMP_{hr} correspondientes al doble cultivo fueron menores a los de la situación sin disturbio, probablemente porque es el estrato que recibe en forma directa el riego por inundación, que por humedecimiento rápido genera el estallido de los agregados superficiales, disminuyendo su tamaño y estabilidad.

3.3.4.2. Pretratamiento de disgregación mecánica (DMP_{dm}).

3.3.4.2.1. DMP_{dm} en ambas capas de suelo

Los resultados de la Figura 3.6 muestran tanto en el estrato superficial como en el subsuperficial, que el DMP_{dm} de la pastura fue menor respecto al de los otros dos usos de la tierra analizados, no existiendo diferencias entre la respuesta del suelo del monte y el del sitio agrícola. El promedio general del DMP_{dm} fue de 2,29 mm para la primera profundidad y de 2,49 mm para la segunda, valores superiores a los promedios generales determinados en DMP_{hr} y DMP_{hl} (0-5 cm: 0,98mm y 1,73 mm, respectivamente; 5-20 cm: 1,03 mm y 1,61mm, respectivamente). Estas diferencias de comportamiento se deben a una menor energía de disrupción generada para este suelo por el DMP_{dm} . El suelo correspondiente al ensayo bajo agricultura con doble cultivo anual, logró resistir la disgregación mecánica de igual manera que el del monte, superando al correspondiente del monocultivo de alfalfa en un 45,9% entre los 0 y 5 cm y en un 38,2% entre los 5 y 20 cm. Por su parte, el suelo del monte logró superar en esta propiedad al de la pastura de alfalfa en un 47,5% para los primeros 5 cm de profundidad, mientras que en la segunda profundidad la diferencia fue de un 41,2%.

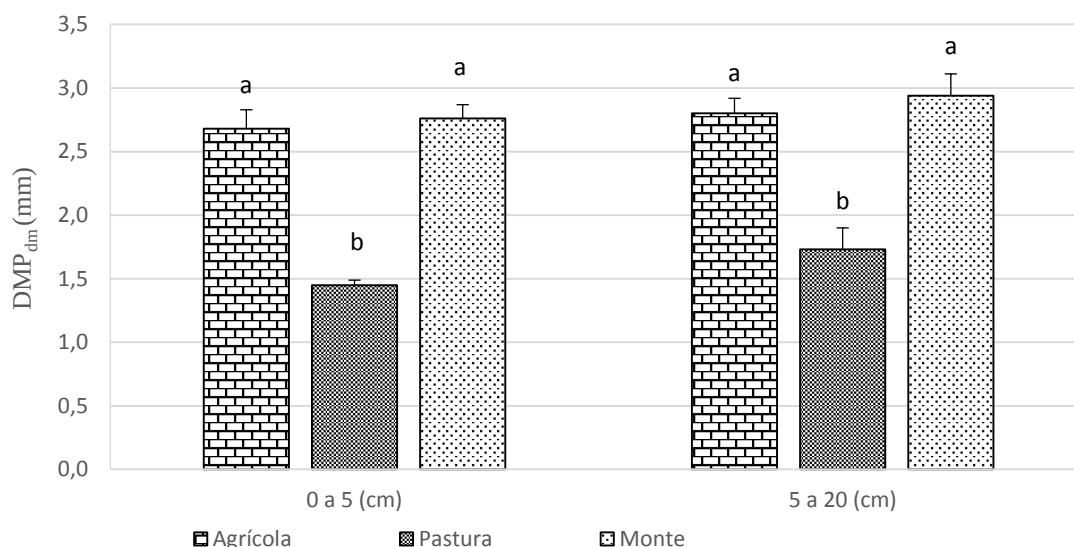


Figura 3.6. Resultados del pretratamiento disgregación mecánica (DMP_{dm}) entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los diferentes usos de la tierra. *Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para una misma profundidad.*

Castiglioni y Kraemer (2019) en los primeros 5 cm de un Argiudol de la Pampa Ondulada con textura franco limosa y bajo siembra directa, registraron que la resistencia de los agregados a la disgregación mecánica durante el primer año de la implementación de un cultivo de cobertura con gramíneas (avena o trigo), fue entre un 44 % y 50 % mayor a la generada en el mismo suelo, pero posteriormente a un cultivo de cobertura con una leguminosa (vicia). Por su parte, Kraemer (2015) determinó en un Haplustol del sur de Córdoba, que el suelo correspondiente a un ambiente natural presentaba una resistencia a la disgregación mecánica un 72 % superior al del mismo suelo, pero bajo una rotación agrícola que incluía gramíneas, siendo dicho porcentaje mayor al determinado en la presente tesis.

Por lo mencionado, las diferencias registradas en ambos estratos se debieron a que tanto en el doble cultivo anual, como en el sitio prístino se combinaron los efectos producidos por distintas especies vegetales, las cuales aportan un diversificado y frecuente aporte de residuos al suelo. A esto se suma que la presencia de raíces vivas durante gran parte del año de distintas especies vegetales, mejoran la estabilidad estructural del suelo debido a la diversidad de los entramados de los distintos sistemas radiculares, a la mayor heterogeneidad en la comunidad microbiana correspondiente a la rizósfera, como también por las diferentes sustancias cementantes generadas por las raíces y por los microorganismos edáficos (Bronick y Lal 2005; Mardhiah et al. 2014;

Rillig et al. 2014), lográndose de esta manera estructuras más estables (González et al. 2017). Como contrapartida, los cultivos de leguminosas presentan una más rápida tasa de la degradación de sus restos vegetales (Blanco-Canqui y Lal 2004), como es el caso del cultivo de alfalfa aquí estudiado. Por lo tanto, los monocultivos en general, y los de leguminosas en particular, propician una discontinuidad temporal en la dinámica de microorganismos del suelo (De Gryze et al. 2006) y una menor diversidad microbiológica edáfica (Mardhiah et al. 2014). En consecuencia, y contemplando que el manejo del alfalfar aquí estudiado cosecha casi la totalidad de MS aérea de alfalfa producida, generaría entonces una reducida cantidad de residuos con una alta tasa de degradación, en el estrato superficial y una discontinua producción de agentes cementantes mejoradores de estabilidad estructural. mientras que, en profundidad, los valores significativamente menores de resistencia a la disgregación mecánica, serían coincidentes con la limitada diversidad de entramados radiculares presentes en este manejo.

3.3.4.3. Pretratamiento de humedecimiento lento (DMP_{hl}).

3.3.4.3.1. DMP_{hl} en ambas capas de suelo

En base a los resultados de la Tabla 3.1, no se registraron diferencias entre los DMP_{hl} de los distintos usos de la tierra estudiados para ninguna de las dos profundidades evaluadas. Pese a presentar un nivel de energía intermedia respecto a los otros dos, este pretratamiento, no logró diferenciar los efectos sobre los agregados producidos por los distintos usos de la tierra aquí evaluados, mientras que el DMP_{hr} (con mayor nivel de energía aplicada) y el DMP_{dm} (con menor nivel de energía aplicada) si lo hicieron (Figuras 3.7, 3.6, 3.5).

Los resultados hallados en este pretratamiento concuerdan con los encontrados por Kraemer (2015), quien determinó en suelos Haplustoles de la Región Pampeana, que los valores de DMP_{hl} en los primeros 15 cm del suelo de un ambiente natural no se diferenciaban estadísticamente de los registrados en los suelos agrícolas bajo siembra directa y rotaciones de cultivos. Contrariamente, Castiglioni y Kraemer (2019) en los primeros 5 cm de un Argiudol bajo siembra directa perteneciente a la Región Pampeana,

evidenciaron que la presencia de gramíneas (avena, trigo) como cultivo de cobertura, mejoraban en mayor proporción el DMP_{hl} que la presencia de una leguminosa (vicia).

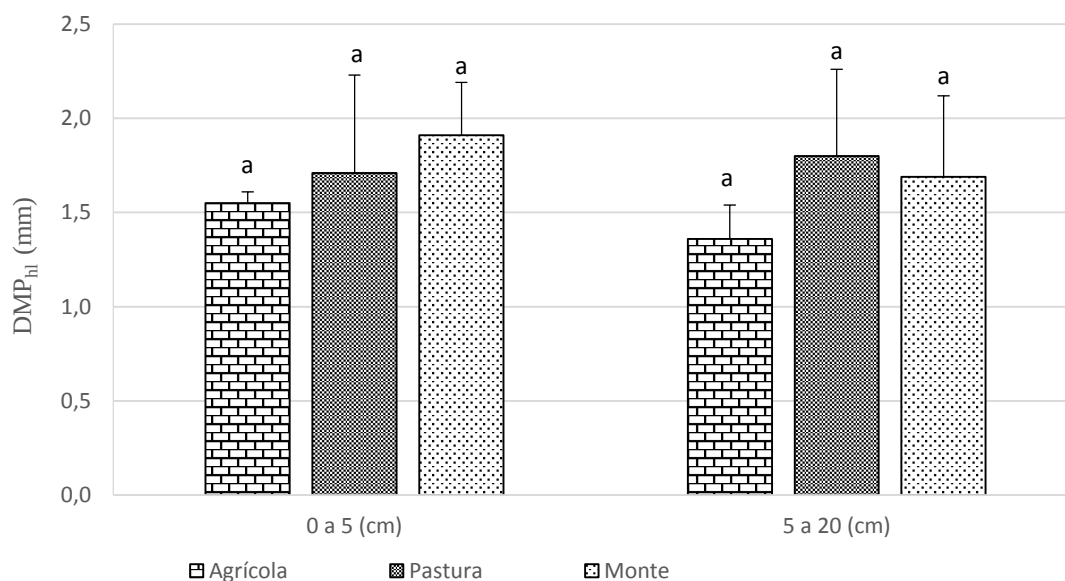


Figura 3.7. Resultados del pretratamiento humedecimiento lento (DMP_{hl}) entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los diferentes usos de la tierra. *Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para una misma profundidad*

A pesar de que este pretratamiento trata de mensurar el efecto producido por el hinchamiento diferencial de las arcillas (Le Bissonnais 1996), muchos autores (Ferrerías et al. 2007; Novelli 2013; Paladino 2014; Kraemer 2015), son coincidentes en que el microagrietamiento que se genera sobre los agregados de un Molisol con bajo contenido de arcillas como el aquí estudiado, estaría influenciado fuertemente por algún agente orgánico de corta vida media en el suelo, lo cual no logró registrarse en los resultados mostrados en la Tabla 3.7. Novelli (2013) a los sesenta y dos días de haber incorporado por separado residuos de trigo y de trébol a un Molisol, no detectó diferencias entre los DMP_{hl} de ambos tratamientos analizados. Sin embargo, en un lapso de tiempo menor (30 días posteriores de incorporar los residuos), dicho autor encontró mayor resistencia al hinchamiento diferencial con la aplicación de rastrojos de trigo.

Son numerosos los trabajos que registraron diferencias en los niveles de resistencia a la disgregación por hinchamiento diferencial, especificándose en los mismos que las mejoras en los niveles de estabilidad son logradas gracias a los residuos de gramíneas como el maíz, avena y trigo (Amezketá 1999; Bronick y Lal 2005; Castiglioni

y Kraemer 2019). Estas especies presentan una alta relación C:N, altos contenidos de carbono y de carbohidratos (Bronick y Lal 2005), que sumado a las características de los mucílagos y productos generados por la actividad rizosférica (Mardhiah et al. 2014; Rillig et al. 2014), explican una buena parte de las ventajas que presentan los suelos cultivados con gramíneas. Al ser comparados los resultados de T5 con los de T7 en el presente trabajo, este efecto diferencial positivo de las gramíneas sobre el DMP_{hl} no se comprobó en ninguna de las dos profundidades evaluadas. Por lo tanto, sería importante investigar porque a pesar de estar trabajando con suelos frágiles, esta propiedad que presentó una energía de disrupción intermedia no logró diferenciar a los distintos tratamientos estudiados.

3.3.4.4. Diámetro medio ponderado promedio (DMP_{med}).

3.3.4.4.1. DMP_{med} de ambas profundidades

En la Tabla 3.1 se observó que existieron en el estrato superficial, diferencias entre usos de la tierra para este parámetro, no ocurriendo lo mismo a mayor profundidad. El DMP_{med} del suelo del monte (0 a 5 cm) logró un valor de 2,08 mm, siendo este significativamente superior en un 31,3 %, respecto al que presentó alfalfa durante cuatro años (Figura 3.8). Por su parte, el doble cultivo anual no se diferenció del resto de los tratamientos (Figura 3.8).

Basado en el criterio de clasificación establecido por Le Bissonnais (1996) (Tabla 1.5), los resultados de esta propiedad mostraron para ambos estratos de suelo que la clase de estabilidad estructural para el sitio prístino fue muy estable, mientras que a los suelos bajo agricultura y pastura se los clasificó con una estructura estable. Los resultados determinados en el primer estrato de esta tesis, guardan similitud con lo registrado por Kraemer (2015), quien en los primeros 15 cm de Haplustoles de la Región Pampeana encontró un mayor DMP_{med} en el ambiente natural respecto a los suelos bajo agricultura. En el mencionado trabajo, el sitio prístino logró una estabilidad de agregados clasificada también como muy estable, reduciéndose la misma a estable cuando los suelos fueron cultivados en SD con rotaciones de cultivo equilibradas entre gramíneas y leguminosas, mientras que para los suelos bajo SD y con monocultivo de soja la estabilidad de agregados se clasificó como medianamente estable.

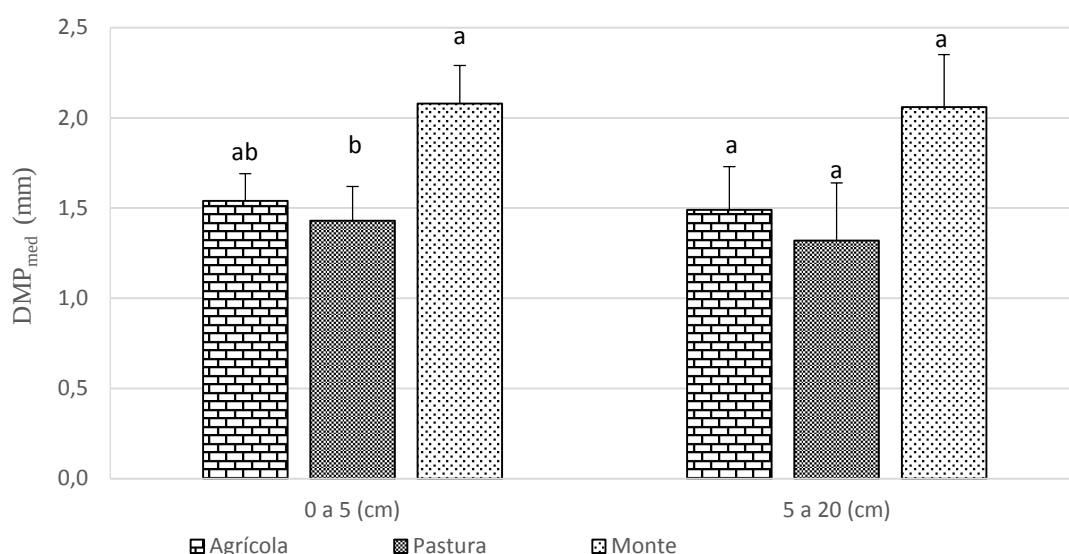


Figura 3.8. Resultados del promedio de los tres pretratamientos de estabilidad estructural (DMP_{med}) entre los 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad, para los diferentes usos de la tierra. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para una misma profundidad.

El incremento del carbono orgánico en Haplustoles es esencial para aumentar la estabilidad de los agregados (Novelli 2013; Kraemer 2015). Esto se corroboró en la presente tesis, a partir de la existencia de una fuerte correlación significativa y positiva entre el DMP_{med} superficial con el COT (p-valor = 0,0101, coeficiente de correlación= 0,64), con el COA (p-valor = 0,0180, coeficiente de correlación= 0,60) y con el COP (p-valor = 0,0146, coeficiente de correlación= 0,62) superficiales. Un comportamiento similar sucedió entre los 5 y 20 cm de profundidad, donde existió una correlación positiva del DMP_{med} con el COT (p-valor= 0,0012, coeficiente de correlación= 0,75) y el COA (p-valor= 0,0007, coeficiente de correlación= 0,72).

Como ya se ha mencionado, los residuos de alta relación C:N, los incrementos del carbono orgánico del suelo y los exudados radiculares, son factores importantes al momento de definir una mayor estabilidad de agregados (Angers y Caron 1998; Bronick y Lal 2005). En este sentido, el monte polifítico caducifolio, como el analizado en esta tesis, contribuye a la materia orgánica del suelo de manera diferencial según la especie considerada (Abril et al. 2013; Lal et al. 2014) y por consiguiente la distinta combinación de especies mejorará la estabilidad de los agregados. Por ejemplo, las hojas de *Aspidosperma quebracho-blanco* son resistentes a la degradación, lo que resulta en un residuo con mayor posibilidad de formar humus, incrementando por consiguiente el COA

(Torres et al. 2005). El *Ziziphus mistol* produce mayor hojarasca con mayor tasa de descomposición que los quebrachos, favoreciendo la actividad microbiana (Biani et al. 2005; Six y Paustian 2014), siendo dicha actividad un factor fundamental en la estabilidad estructural (Bronick y Lal 2005). La combinación de los efectos generados por las distintas especies arbóreas y arbustivas presentes en el monte, sumado a la permanencia de las mismas durante todo el año y la falta de perturbaciones que favorezcan la mineralización balanceada de la materia orgánica, logran agregados clasificados como “muy estables” en estos suelos limosos con alta fragilidad física. Dicho nivel en la calidad de la estructura, no pudo ser alcanzado por el tratamiento agrícola en SD con permanencia de cultivos durante gran parte del año, como tampoco por la pastura de alfalfa, debido a que ambos ensayos provienen de una historia agrícola previa con más de 30 años de agricultura, gran parte bajo un sistema convencional de labranza y riego por inundación. Sumado a lo antes mencionado, los retornos de materia seca al suelo en los sitios bajo intervención antrópica, son de menor calidad que los aportados por el monte, existiendo a su vez en los primeros una mayor extracción de nutrientes del suelo, producto de la cosecha de granos, fibra o forraje y una mayor tasa de mineralización de los residuos aportados. Este comportamiento podría haber contribuido a la obtención de una categoría “estable” de estabilidad estructural en T5 y T7, para las dos profundidades estudiadas.

3.3.5. Resultados de conductividad hidráulica superficial estimada a distintas tensiones, para los distintos usos de la tierra estudiados.

3.3.5.1. Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 0 cm (K_{h0cm}).

La conductividad hidráulica estimada a una tensión de 0 cm mostró diferencias entre los tratamientos (Tabla 3.1). En el doble cultivo anual (T5), la K_{h0cm} fue de 10,49 mm h⁻¹, sin diferenciarse del resultado obtenido en el suelo correspondiente al monte, pero estos fueron al menos un 55,0 % superiores al determinado en el sitio con alfalfa (Figura 3.9).

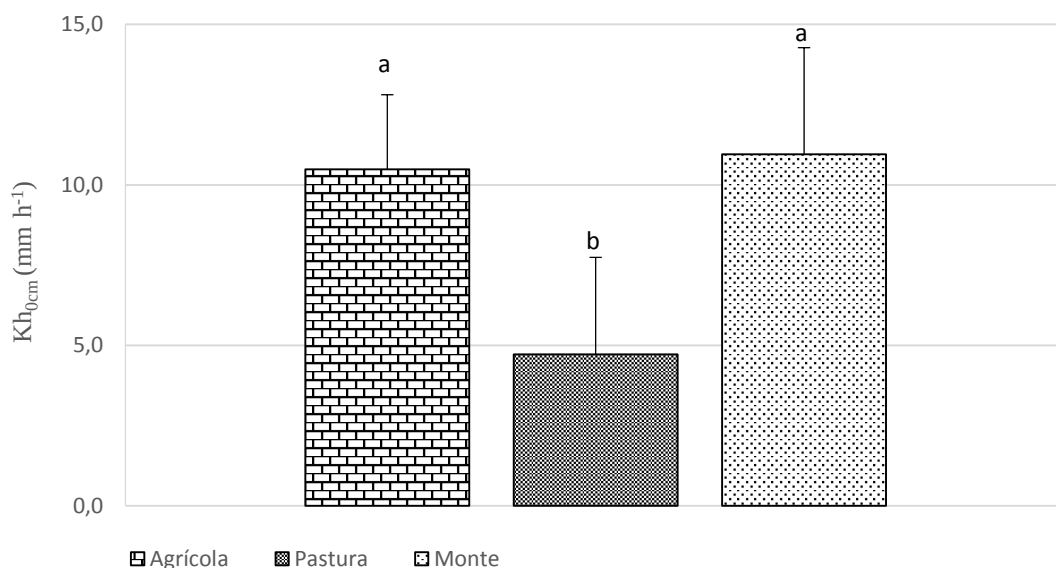


Figura 3.9: Resultados de conductividad hidráulica superficial estimada a una tensión de 0 cm (Kh_{0cm}) para los diferentes usos de la tierra. *Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para una misma profundidad.*

La baja Kh_{0cm} registrada en el alfalfar, podría asociarse a la presencia de raíces vivas que este cultivo presenta por ser una pastura perenne sin descanso invernal, las que estarían obturando gran parte del espacio poroso. A lo hasta aquí mencionado se sumaría el reducido aporte de rastrojos en superficie que esta producción genera, producto de la continua cosecha del forraje. Esto último impactaría directamente en la resistencia de los agregados a la disgregación mecánica y estaría explicando parte de la correlación existente entre esta última variable y la Kh_{0cm} (p -valor=0,0075; coeficiente de correlación=0,66). Cabe aclarar que este agente de desagregación trata de imitar el efecto generado por el impacto de gota de lluvia y contrariamente a lo que sucedería con el doble cultivo anual y el monte, el sitio con alfalfa no cuenta con una buena cobertura superficial de rastrojos. Un comportamiento similar al de esta tesis fue encontrado por Coria (2004), al estimar a campo la Kh_{0cm} en Molisoles de textura franca correspondientes al centro este de la provincia de Santiago del Estero. En ese trabajo, dicho autor no pudo detectar diferencias en esta propiedad entre el sitio de monte y otro con más de 17 años de uso agrícola en SD. En esa experiencia se registraron valores de Kh_{0cm} algo superiores a los encontrados en esta tesis (agricultura: 18,54 mm h⁻¹; monte: 18,27 mm h⁻¹), concluyendo el autor, que esta falta de diferencias entre ambos sitios se asociaría con la hidrofobicidad del suelo. En este sentido, Coria (2004) registró valores de hidrofobicidad extremadamente altos en agregados superficiales del monte (0 a 5 cm),

mientras que bajo uso agrícola dicha variable fue muy baja. Esta propiedad tiende a interferir y reducir la velocidad de infiltración (Dekker y Ritsma 2000), pudiendo generar una conducción de agua hasta 25 veces más lenta que un suelo con características similares, pero con menor hidrofobicidad (De Bano 1971).

Imhoff et al. (2010) y Fernández et al. (2020) remarcan que las rotaciones más diversificadas y con mayor proporción de gramíneas, presentan una mejor condición física edáfica, mejorando la proporción de macroporos, en relación a lo sucedido con rotaciones menos diversificadas. En una revisión bibliográfica realizada por Strudley et al. (2008), estos autores informaron que la implementación de la SD junto con la alternancia de distintos cultivos, incrementa la conectividad vertical de los macroporos, resultando en una mayor infiltración básica y conductividad hidráulica saturada. Por su parte, Gerster y Bacigaluppo (2004) trabajando en Argiudoles típicos, especificaron que un cultivo de una leguminosa como la soja, presenta mayor dificultad que una gramínea como el maíz, para explorar zonas de suelo compactado. Este último cultivo, si bien logra superar los sectores densos, presenta una distribución de raíces desuniforme, mientras que otras gramíneas como el trigo, muestran una exploración radical en los sectores compactos similar a zonas sin esta limitación física. Edwards et al. (1988) encontraron que, con 28 años de monocultivo de maíz bajo siembra directa, se mejoró su agregación y aumentó la cantidad de macroporos continuos en los primeros 30 cm de un suelo franco limoso de Ohio, EEUU. Kraemer et al. (2018) al evaluar tres manejos en Molisoles de la región pampeana, concluyeron que la mayor combinación de especies promueve el desarrollo de poros elongados grandes y estables en el suelo. Por lo tanto, en la medida que se incrementa la participación de gramíneas dentro de rotaciones en SD, se mejora la exploración de raíces como así también la actividad biológica, beneficiando a los indicadores de fertilidad física del suelo (Gerster et. al. 2010). Gabioud (2018) trabajando sobre Argiudoles de Entre Ríos bajo SD, concluyeron que las diferencias encontradas en la porosidad son atribuibles a la baja actividad biológica y reducida estabilidad de agregados, encontrada en suelos con monocultivo soja. En dicho trabajo, en el tratamiento con gramíneas y doble cultivo (trigo/soja-maíz) la mencionada actividad y estabilidad fue mayor a la encontrada en el monocultivo de la ya mencionada leguminosa, como también lo fue la presencia de macroporos verticales.

Por lo tanto, la combinación de especies con presencia de gramíneas anuales dentro de una sucesión agrícola o en el caso del monte santiagueño, gramíneas anuales y/o perennes con descanso estacional, sumado a la existencia de restos vegetales en la

superficie del suelo, mejoraría la resistencia de los agregados a la disgregación mecánica. Induciendo, consecuentemente, a la formación de poros más estables frente al impacto de la gota de lluvia en los primeros centímetros del perfil, que afectaría el flujo preferencial del agua y permitiría un mejor ingreso y circulación de este fluido en profundidad. La similitud en Kh_{0cm} esta propiedad entre T5 y el T6, estaría generada por la combinación de distintos niveles de hidrofobicidad que presentarían los primeros centímetros de suelo (mayor hidrofobicidad en el sitio no disturbado) y una mayor densificación generada en el tratamiento bajo agricultura (Figura 3.3).

3.3.5.2. Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 1,5 cm ($Kh_{1,5cm}$).

La conductividad hidráulica estimada bajo una tensión de 1,5 cm, que mide el flujo del agua través de poros con diámetro menor a 2080 μm , mostro diferencias entre los sitios evaluados (Tabla 3.1). De los resultados obtenidos (Figura 3.10), se desprende que hubo diferencias entre los tres usos de la tierra, siendo el monte el que presentó el mayor valor para esta propiedad, siguiéndole el uso agrícola, con los resultados más bajos para la pastura de alfalfa para corte. En el caso del doble cultivo, la reducción de $Kh_{1,5cm}$ fue del 31,4% respecto al monte, mientras que para el alfalfar esta fue del orden del 71%.

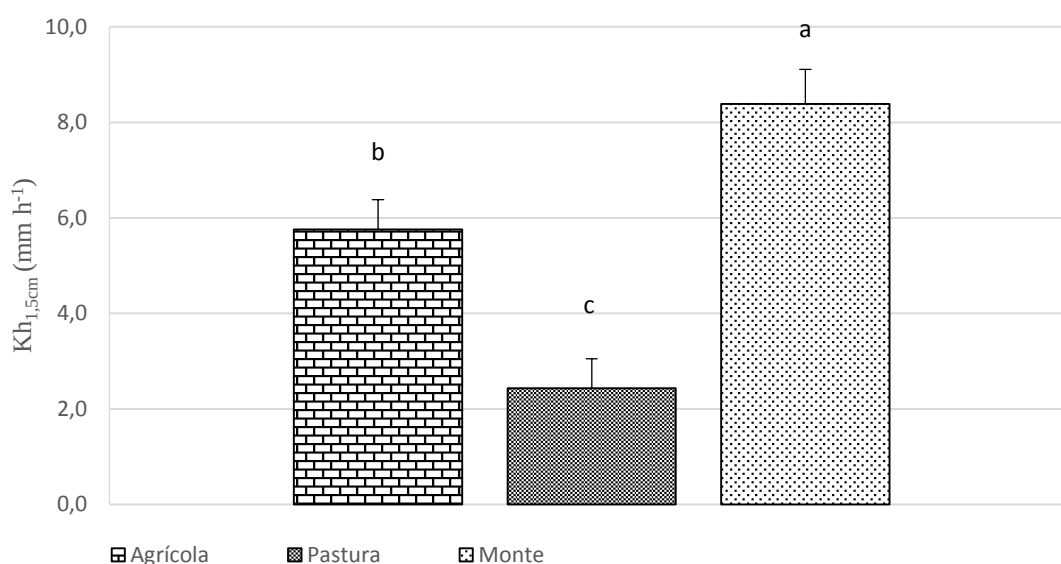


Figura 3.10. Resultados de conductividad hidráulica superficial estimada a una tensión de 1,5 cm ($Kh_{1,5cm}$) para los diferentes usos de la tierra. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para una misma profundidad.

El suelo correspondiente al monte no es afectado por los efectos del riego y el tránsito de la maquinaria agrícola, siendo dichos factores de gran relevancia al momento de diferenciar entre un manejo agrícola con un sitio sin intervención antrópica. Por su parte, la presión del rodado, genera la destrucción de poros con diámetro mayor a $> 117 \mu\text{m}$ (Lipiec et al. 2006), principalmente los de diámetro de $2080 \mu\text{m}$ (Botta et al. 2004; Rasaily et al. 2011), mientras que el riego por inundación estimula el estallido de agregados y ejerce presión sobre el suelo por el peso de la lamina de agua aplicada (Galizzi et al. 2014)

Por otro lado, en línea con lo sucedido con la $K_{h0\text{cm}}$, la baja en $K_{h1,5\text{cm}}$ registrada en el alfalfar, se asociaría con la presencia de raíces vivas las cuales impedirían la libre circulación del agua en poros de diámetro menor a $2080 \mu\text{m}$. Lo hasta aquí mencionado se suma al reducido aporte de rastrojos que ésta producción de alfalfa deja en superficie como contracara del monte, quien presenta grandes cantidades de material vegetal en el mencionado estrato. Las marcadas diferencias, impactarían directamente en la relación de la variable estudiada esta sección con el carbono del suelo, comprobándose una correlación positiva con el COT (p-valor = 0,0083; coeficiente de correlación= 0,65), COA (p-valor = 0,0276; coeficiente de correlación= 0,57) y el COP (p-valor = 0,0083; coeficiente de correlación= 0,65). Lo hasta aquí mencionado tiene implicancia directa en la estabilidad general de los agregados y su resistencia al efecto estallido, generando en el sitio con alfalfa, la presencia de estructuras más susceptibles a su destrucción, lo que explicaría la significativa correlación encontrada entre la $K_{h1,5\text{cm}}$ con el DMP_{hr} (p-valor= 0,0011; coeficiente de correlación= 0,76) y con el DMP_{med} (p-valor = 0,025; coeficiente de correlación= 0,57). Por su parte, el comportamiento del T5 al momento de la medición, las condiciones intermedias de rastrojo en superficie, sumado a un predominio de raíces de soja de rápida descomposición con la consecuente habilitación de poro, le dieron al T5 una $K_{h1,5\text{cm}}$ menor a la del monte, pero mayor a la del alfalfar.

3.3.5.3. Conductividad hidráulica estimada a una tensión de 3 cm ($K_{h3\text{cm}}$)

La conductividad hidráulica estimada con permeámetro de disco a una tensión de 3 cm, mostró diferencias entre tratamientos (Tabla 3.1). Se observó que el suelo del monte logró una conductividad hidráulica de $6,96 \text{ mm h}^{-1}$, considerando a los poros con diámetro inferior a $1040 \mu\text{m}$, valor que fue significativamente mayor en un 69,1 % a los resultados obtenidos por las parcelas bajo agricultura y alfalfa para corte (Figura 3.11).

La $K_{h_{3cm}}$ mostró una correlación significativa y negativa con la DAP (p-valor= 0,0001; coeficiente de correlación = -0,84), lo que podría estar indicando que el aumento de la densidad aparente afectó aquellos tamaños de poro inferiores a 1040 μm de diámetro, con consecuencias sobre la tasa de infiltración. Muchos autores coinciden en que el desmonte y el posterior uso productivo de los suelos de Santiago del Estero, genera distintos procesos de degradación del suelo, entre ellos la reducción de su espacio poroso (Lorenz 1995; Anriquez et al. 2005; Koritko et al. 2019; Gomez et al. 2019). Dicho proceso es generado principalmente por una reducción en la actividad y diversidad biológica, pérdida del carbono orgánico del suelo y un incremento en el tránsito de la maquinaria agrícola (Álvarez et al. 2009a; Álvarez et al. 2012; Koritko et al. 2019), que en forma conjunta favorecen el desarrollo del proceso de degradación física. En este sentido, se observó una incidencia positiva de las distintas fracciones del carbono orgánico sobre esta propiedad, ya que se registraron correlaciones significativas y positivas entre $K_{h_{3cm}}$ y COT (p-valor = <0,0001; coeficiente de correlación= 0,85), COA (p-valor = 0,0019; coeficiente de correlación= 0,73) y COP (p-valor = <0,0001; coeficiente de correlación=0,87), como también con la estabilidad general de los agregados (p-valor= 0,0092; coeficiente de correlación= 0,65).

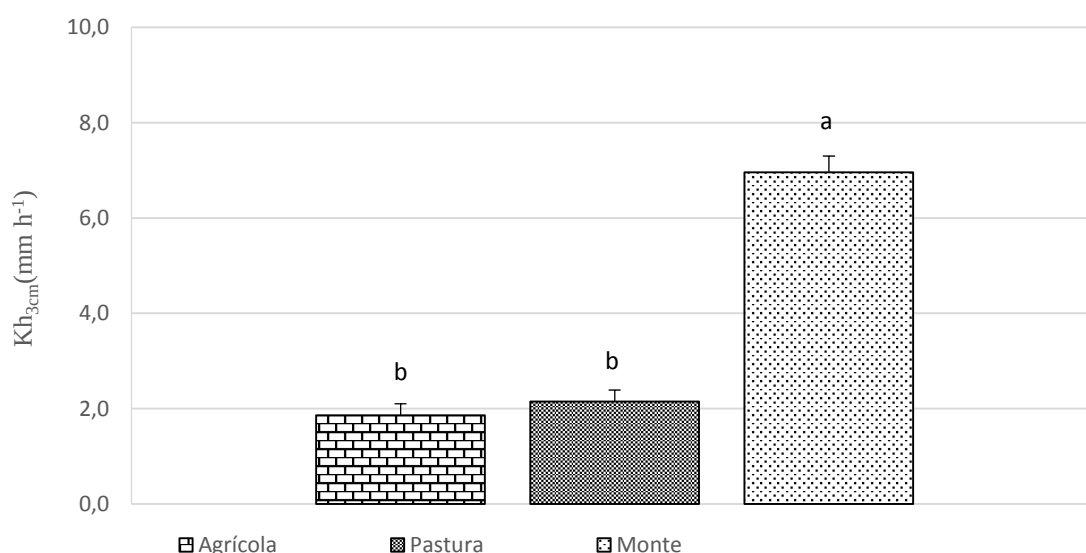


Figura 3.11. Resultados de conductividad hidráulica superficial estimada a una tensión de 3cm ($K_{h_{3cm}}$) para los diferentes usos de la tierra. *Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, test de Fisher) entre usos de la tierra para una misma profundidad.*

La disminución en el volumen de poros inferiores a 1040 μm de diámetro no sería un proceso aislado, sino que se asocia directamente con la densificación y la pérdida de

carbono generada como consecuencia del desmonte y posterior uso para producción de granos, fibra o forraje. Esta pérdida no se podría impedir aun cuando se realice SD, ya que la cobertura viva y remanente producida por la mencionada practica es de menor calidad que la que provee el monte (Koritko et al. 2019). A lo hasta aquí mencionado se suma el hecho de que agentes como la temperatura del suelo y su humedad, favorecen los procesos degradativos del carbono orgánico del suelo en los sectores bajo intervención antrópica. En los sectores bajo uso agrícola o producción de pastura, se realizan riegos que logran mantener por más tiempo un mayor contenido hídrico del suelo. Además, en estos sitios no existe una cobertura arbórea que amortigüe la exposición directa de la superficie del suelo a los rayos del sol como sucede en el monte. Estas condiciones de alta humedad y temperatura determinan una mayor mineralización del carbono orgánico edáfico (Austin y Vivanco 2006; Abril et al. 2013), lo que resulta en una menor cantidad de compuestos orgánicos que recubren los poros, incrementando su susceptibilidad al colapso (Le Bissonnais 1996; Varela et al. 2010). De esta forma se ve reducida una parte de los poros conductores en los sitios bajo uso agrícola y producción de pasturas. Este proceso podría estar explicando por qué el suelo del monte logra los menores valores de DAP y los mayores de Kh_{3cm} .

En base a los resultados obtenidos con las otras dos tensiones (1,5 cm y 0 cm), y dado que en dichos casos no se registraron correlaciones con la DAP, pareciera que, bajo las condiciones evaluadas en el presente trabajo, los poros conductores de agua más afectados por el pasaje de maquinaria y efectos de la lamina de riego, serían aquellos con diámetro menor a 1040 μm . En este sentido, con una mayor tensión aplicada en la placa del permeámetro, se produce el pasaje del agua por los macroporos activos en la conducción. De esta forma se explicaría que la Kh de los suelos agrícolas pasó de ser igual a la del monte, cuando la tensión aplicada era 0 (Kh_{0cm}), intermedia entre los del monte y la pastura cuando la tensión era de 1,5 cm ($Kh_{1,5cm}$) y finalmente lograr la igualdad con el monte cuando la tensión aplicada fue de 3 cm (Kh_{3cm}). De esta manera, mientras los suelos bajo agricultura sufrieron una reducción en la Kh al pasar de Kh_{0cm} a $Kh_{1,5 cm}$ del 45 % y de esta última tensión a Kh_{3cm} del 68 %, en la pastura dichos porcentajes fueron 44 % y 12 %, mientras que en el monte resultaron 23 % y 17 %.

3.5. Conclusiones

Se observó que ambos ensayos analizados (alfalfa para corte y rotación agrícola con doble cultivo anual bajo siembra directa), obtuvieron una calidad de suelo menor a la del monte, generando valores más bajos en la mayoría de las propiedades analizadas. Al no disponer de los resultados iniciales, no se pudo determinar cómo fue la evolución de dichas propiedades, luego de 4 años de haber comenzado los ensayos.

En la Tabla 3.3 se detalla para ambas profundidades, la relación entre los valores de las distintas variables obtenidas en T5 y T7 con los resultados determinados en el monte. Cabe aclarar que en el caso particular de la DAP y RMP, los valores mas altos hacen referencia a un estado agronómico de mejor calidad , es decir que cuando los valores de estos indicadores en la mencionada tabla son más altos, sus correspondientes niveles de RMP y DAP medidos fueron más bajos. En dicha tabla, se observa que los resultados promedio obtenidos entre 0 a 5 cm del suelo bajo el tratamiento agrícola, representaron un 72 % de los determinados bajo la condición natural, mientras que los correspondientes a la alfalfa alcanzaron a obtener el 59 % de los generados por dicha situación. A mayor profundidad, las diferencias entre T5 y T7 se atenuaron, siendo los promedios alcanzados del 77 % y 76 % para los suelos agrícolas y bajo alfalfa, respectivamente.

Tabla 3.3. Relación entre los resultados obtenidos por cada variable en cada tratamiento respecto a los determinados en el monte para los estratos de 0 a 5 cm y 5 a 20 cm

Propiedad	Profundidad: 0 a 5 cm			Profundidad: 5 a 20 cm		
	Agrícola	Pastura	Monte	Agrícola	Pastura	Monte
COT	0,54	0,53	1	0,81	0,85	1
COA	0,73	0,68	1	0,86	0,87	1
COP	0,36	0,36	1	0,44	0,68	1
DMP _{hr}	0,28	0,57	1	0,72	0,28	1
DMP _{dm}	0,97	0,53	1	0,95	0,59	1
DMP _{hl}	0,81	0,90	1	0,80	1,07	1
DMP _{med}	0,74	0,69	1	0,72	0,64	1
RMP	1,48	0,92	1	0,82	1,00	1
DAP	0,83	0,89	1	0,77	0,85	1
Kh _{0cm}	0,96	0,43	1			
Kh _{1,5cm}	0,69	0,29	1			
Kh _{3cm}	0,27	0,31	1			
Promedio	0,72	0,59	1	0,77	0,76	1

El mayor valor promedio de esta relación, obtenido en superficie por los suelos bajo agricultura respecto a aquellos con pastura, se dio fundamentalmente a partir de lo

sucedido con la conductividad hidráulica estimada a 0 cm y 1,5 cm de tensión y en la RMP. Por su parte, mientras los resultados de las distintas fracciones de carbono obtenidos en los sitios con fuerte intervención antrópica fueron similares, en los distintos pretratamientos de estabilidad estructural no sucedió lo mismo, aunque el valor de DMP_{med} fue parecido para ambos tratamientos. La mayor relación agricultura/monte respecto a pastura/monte en Kh_{0cm} y $Kh_{1,5cm}$, se debió a las mejores condiciones que presentó el sitio agrícola (mayor cantidad de residuos en superficie, mayor estabilidad media de agregados y consecuentemente poros más estables), ya planteado en los apartados 3.3.5.1 y 3.3.5.2. Entre los 5 a 20 cm, los resultados de RMP fueron estadísticamente diferentes entre el T5 y los demás sitios evaluados (Figura 3.4), siendo la relación agricultura/monte sensiblemente menor a la de pastura/monte (Tabla 3.3), como consecuencia del mayor tránsito de maquinaria ocurrido bajo agricultura.

En la Tabla 3.3 se observa también que las propiedades superficiales con mayor reducción respecto al monte fueron para ambos usos de la tierra: COT, COP, DMP_{hr} y Kh_{3cm} , mientras que para la pastura además disminuyeron significativamente su valor DMP_{dm} , Kh_{0cm} y $Kh_{1,5cm}$. A mayor profundidad, si bien los promedios de la relación uso de la tierra/monte fueron similares para ambos tratamientos, se comprobó un mayor decrecimiento bajo agricultura en los resultados relativos del COP y DMP_{hl} , mientras que lo mismo ocurrió en la pastura para el DMP_{hr} y DMP_{dm} . De 5 a 20 cm también hubo una superior reducción en la densificación del suelo en los suelos agrícolas respecto a lo sucedido en la pastura.

De acuerdo a las observaciones realizadas en el presente capítulo, las principales conclusiones fueron las siguientes:

Considerando ambas profundidades de suelo y las distintas fracciones del carbono orgánico, solo el COP del estrato más profundo obtuvo una mejor condición en la pastura respecto a los suelos agrícolas, no encontrando otras diferencias entre ambos tratamientos, siendo el suelo del monte el que siempre aportó los mejores resultados.

La densidad aparente de ambos estratos fue el parámetro que mostró la mayor eficacia para separar el efecto de los distintos usos de la tierra, presentando los resultados

de esta propiedad el mismo orden para ambas profundidades: agricultura>pastura>monte.

La resistencia mecánica a la penetración evidenció una compactación superior solo en el estrato superficial de los suelos agrícolas, respecto a lo observado en los restantes usos de la tierra evaluados.

Entre los diferentes pretratamientos del método de estabilidad estructural utilizado, DMP_{hr} y DMP_{dm} fueron los más eficaces para distinguir el efecto de los distintos usos de la tierra. Los resultados de estos test mostraron en términos generales, una peor condición estructural del suelo bajo alfalfa respecto al del monte y al agrícola, no existiendo diferencias en esta propiedad entre estos dos últimos usos de la tierra. Sin embargo y considerando al DMP_{hr} superficial, se comprobó una menor resistencia de los agregados al efecto estallido en los suelos bajo agricultura respecto a los del monte, sin diferenciarse estos dos usos de la tierra de la situación con alfalfa.

Independientemente de la tensión de trabajo, el monte siempre presentó la mejor conductividad hidráulica superficial mientras que el suelo correspondiente al ensayo de alfalfa la peor, obteniendo el sitio bajo agricultura un comportamiento similar al monte, intermedio o igual a la alfalfa en la medida que se incrementó la proporción de los macroporos de menor tamaño en la conducción del agua.

Estos resultados están mostrando que independientemente del uso actual de la tierra (agricultura o pastura), se han producido mermas en el contenido de carbono de los suelos (COT y COP), con consecuencias negativas sobre la estabilidad estructural, lo que debería ser abordado en futuros estudios buscando otras alternativas de manejo o analizando la evolución del ensayo bajo agricultura en un lapso de tiempo mayor. Respecto a la producción de alfalfa para corte, sería necesaria una investigación más detallada de los efectos que genera este uso de la tierra sobre el suelo, dada su importancia regional y a la escasez de trabajos locales que enfoquen con más detalle la evolución de las propiedades edáficas ante la presencia de este cultivo.

Capítulo 4: Consideraciones finales

Durante las últimas décadas, el área de riego del Rio Dulce sufrió los embates de distintos procesos de degradación de los suelos, generando tanto la pérdida de su fertilidad física como química. La falta de conocimiento local y el uso inapropiado de las tecnologías de producción agrícola, son algunas de las razones que generaron el detrimento del potencial productivo de estos suelos. Con la idea de mitigar los procesos degradativos e incrementar la productividad de los suelos, en los últimos años se observó un sostenido aumento en la superficie del ARD incorporada a la siembra directa, combinada con riego por inundación y sucesiones de cultivos, contemplando al algodón como principal cultivo de interés económico. Esto generó la necesidad de comenzar a evaluar los efectos edáficos que estas prácticas producían en un lapso acotado de tiempo. Es así que en la campaña 2013/2014 se inició un ensayo sobre el cual se evaluó el efecto sobre el suelo de cinco sucesiones de cultivos que contienen al cultivo de algodón (T1: alg-alg-alg-alg; T2: mz-alg-alg-sj; T3: mz-sj-alg-alg; T4: mz-alg-alg-mz; T5: mz/tr-alg/tr-alg/tr-sj/tr), siendo el mismo instalado luego de 28 años de una agricultura convencional (1982-2010) y 3 años de SD (2010-2013).

En la presente tesis se analizó la respuesta de distintas propiedades físicas y químicas edáficas al tercer y cuarto año de iniciado el mencionado ensayo, en las capas de suelo entre 0 a 5 cm y 5 a 20 cm de profundidad del Haplustol torriorténtico presente (Capítulo 2). También se compararon los resultados obtenidos para dichas propiedades, por uno de los tratamientos agrícolas de mejor desempeño en el capítulo 2 (T5), con los registrados en una situación con bajo disturbio (T6) y con los correspondientes a un ensayo con cuatro años de alfalfa para corte bajo riego (T7), cultivo que constituye una alternativa productiva en la región (Capítulo 3).

Las hipótesis planteadas en el Capítulo 2 fueron las siguientes:

Hipótesis 1: El tratamiento con doble cultivo anual (trigo/cultivo de verano) aporta las mayores diferencias en los resultados de las propiedades físicas y químicas del Haplustol analizado, respecto a los obtenidos por el monocultivo.

Hipótesis 2: El carbono orgánico particulado y la estabilidad estructural son las dos propiedades que logran evolucionar más favorablemente a partir de la implementación de secuencias de cultivos más diversificadas.

Hipótesis 3: A pesar de las mejoras producidas por el doble cultivo anual en algunas de las propiedades edáficas, este tratamiento es el que experimenta la mayor densificación del suelo debido al mayor tránsito de la maquinaria.

Hipótesis 4: La mejora en algunos parámetros físicos y químicos edáficos generados por el doble cultivo anual (trigo/cultivo de verano), favorece una mayor productividad en fibra del cultivo de algodón.

La primera hipótesis se rechaza, ya que si bien se observó que en superficie, el tratamiento con doble cultivo anual presentó las mayores diferencias relativas acumuladas de las distintas propiedades con respecto al T1 (Tabla 2.7), en el estrato subsuperficial fue el tratamiento T4 el obtuvo un mejor desempeño relativo con respecto al monocultivo de algodón (Tabla 2.8). A su vez, de las distintas variables estudiadas, en muy pocas de ellas el doble cultivo se constituyó como el único tratamiento con diferencias significativas favorables respecto al monocultivo. Es por ello que en las conclusiones del Capítulo 2 se manifestó que “no solamente el doble cultivo anual se presenta como una alternativa productiva más sostenible al monocultivo, sino que la mayor diversificación de cultivos en la rotación generaría una condición edáfica y productiva mejor”. Además, sería interesante continuar evaluando los efectos que las distintas secuencias generan sobre las variables de suelo aquí analizadas, y tal vez así se logre definir diferentes alternativas sostenibles de producción.

La segunda hipótesis también se rechaza, ya que, si bien la estabilidad estructural se mostró como una propiedad eficaz para separar el efecto del monocultivo de algodón sobre la calidad de la estructura respecto a lo sucedido en las restantes sucesiones de cultivo, ninguna de las fracciones del carbono evidenció resultados significativamente diferentes entre los tratamientos analizados.

La tercera hipótesis es aceptada, ya que a pesar de no mostrar diferencias entre los tratamientos para la capa superficial de suelo, la DAP del doble cultivo anual entre los 5 a 20 cm de profundidad es quien mostró los niveles de densificación superiores respecto al resto de las secuencias estudiadas.

La cuarta hipótesis es aceptada ya que se mostró en la Figura 2.19 que las mayores diferencias en la calidad edáfica obtenida por el doble cultivo, redundaron en una superior producción de fibra en el cultivo de algodón, obteniendo dicha relación un R^2 mayor a 0,60.

Las hipótesis planteadas en el Capítulo 3 fueron las siguientes:

Hipótesis 1: De los tres usos del suelo evaluados, es el sitio cuasi-prístino quien logra la mejor performance de los indicadores de calidad edáficos aquí evaluados.

Hipótesis 2: La merma en los resultados de las distintas propiedades evaluadas respecto a la condición natural es mayor en los suelos bajo agricultura con doble cultivo anual.

Hipótesis 3: El carbono orgánico particulado es la propiedad edáfica que logra, en mayor medida, distinguir los efectos generados por los distintos sistemas de uso de la tierra evaluados.

Hipótesis 4: La agricultura con doble cultivo anual bajo siembra directa, presenta los mayores valores de densidad aparente, debido al mayor tránsito de la maquinaria.

La primera hipótesis es aceptada, debido a que los resultados del contraste entre los distintos usos del Haplustol torriorténtico, mostraron al monte con una mejor performance en 9 de las 10 variables analizadas, siendo solo superado en los valores superficiales de RMP presentados por el sitio agrícola

La segunda hipótesis se rechaza, ya que solamente el COP (5-20 cm), la DAP correspondiente a ambas profundidades y la RMP (5 a 20 cm), presentaron mejores resultados en la pastura de alfalfa respecto al doble cultivo anual, al mismo tiempo que en otras variables (DMP_{hr} (5 a 20 cm), DMP_{dm} (ambas profundidades), Kh_{0cm} y $Kh_{1,5cm}$) las parcelas bajo agricultura mostraron superiores valores que la pastura para corte.

La tercera hipótesis también es rechazada, dado que el carbono orgánico particulado separó en superficie únicamente el efecto del monte respecto a los

tratamientos con mayor intervención antrópica, mientras que solo el COP subsuperficial mostró diferencias entre los tres usos de la tierra analizados. La DAP fue en ese sentido una propiedad más efectiva, ya que en ambas profundidades logró distinguir los efectos sobre el suelo del monte, la pastura y la agricultura.

La cuarta hipótesis es aceptada, ya que como se dijera en el párrafo anterior es una propiedad que separó los efectos de los tres usos de la tierra, siendo la agricultura con doble cultivo anual quien obtuvo los mayores valores de esta variable en ambos estratos de suelo.

Propuesta de una clasificación de estabilidad estructural para los suelos del ARD:

En base a lo expresado en el Capítulo 2 (sección 2.3.4.4), donde se hizo mención a la necesidad de establecer nuevos criterios para la clasificación de la estabilidad estructural (método de Le Bissonnais, 1996) de los suelos de la región bajo estudio, se desarrolla a continuación una propuesta inicial, considerando que la misma debe enriquecerse y complementarse con mayor información generada en el ARD. Para el desarrollo de la misma se tuvieron en cuenta los resultados de estabilidad estructural (DMP_{med}) obtenidos en los Capítulos 2 y 3 de esta tesis, intentando mantener las categorías originales del método.

Se consideró que el mejor estado de agregación de estos suelos se encuentra en el monte. Por lo tanto, como en este sitio se superaron los 2 mm de DMP_{med} en las dos capas de suelo analizadas, se define a los agregados como “muy estables” cuando se determinan resultados mayores a dicho valor, manteniéndose así el límite original propuesto por Le Bissonnais (1996) para esta clase de estabilidad de agregados. El valor límite que se propone para separar la clase “inestable” de la “moderadamente estable”, sería cuando el DMP_{med} resulta igual a 1,35 mm, quedando clasificados como “inestables” a los suelos con un DMP_{med} menor a dicho valor y como “moderadamente estables” a aquellos que lo superen. Este criterio surge de los resultados obtenidos en el Capítulo 2, donde en la capa superficial T5, T4 y T2 no mostraron diferencias estadísticas significativas entre sí, superando dicho valor. Algo similar ocurrió a mayor profundidad con T4 y T5. Por su parte, T3 y T1 tuvieron en superficie resultados por debajo de 1,35 mm, al igual que T3, T2 y T1 en profundidad, sin lograr en ninguna de las dos capas de suelo diferencias estadísticas entre dichos tratamientos.

Con la propuesta de estos nuevos límites, se observa que los agregados superficiales de T1 y T3 se encontrarían en un nivel inestable, mientras que los de T2, T4, T5 y T7 se clasificarían como moderadamente estables. Por otro lado, en la capa de suelo de 5 a 20 cm, T1, T2 y T3 presentarían agregados inestables, mientras que los de T4, T5 y T7 lograrían clasificarse como moderadamente estables. De esta manera, solo el suelo del monte presentaría agregados muy estables en las dos profundidades estudiadas.

Mediante esta propuesta de modificación, se estaría representando mas adecuadamente lo sucedido en estos suelos para los usos y manejos planteados en esta tesis. Sin embargo, y como se dijera previamente, la misma es provisoria ya que necesita enriquecerse y completarse a partir de distintas experiencias realizadas o a realizar en el ARD. Este comentario pretende estimular el desarrollo de nuevas investigaciones en la temática para el ARD, ya que para generar una tabla con categorías que determinen el grado de deterioro de la estabilidad estructural de manera más consistente y realista, será necesario contar con mayor número de resultados, producto de la evaluación de una superior cantidad de situaciones diferentes.

Bibliografía

- Abiven S., Menasseri S., Angers D. A. y Leterme P. 2007.** Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *Eu. J. of Soil 3 Sci.* 58:239-247.
- Abril A., Salas P., Lovera E., Kopp S., y Casado-Murillo N. 2005.** Efecto acumulativo de la siembra directa sobre algunas características del suelo en la región semiárida central de Argentina. *Ciencia del suelo*, 23(2), 179-188
- Abril A., Merlo C. y Noe L. 2013.** Realistic soil C sink estimate in dry forests of western Argentina based on humic substance content. *Journal of Arid Environments* 91: 113-118.
- Adema E. O., F.J. Babinec y N. Peinemann. 2001.** Pérdida de nutrientes por erosión hídrica en dos suelos del Caldenal Pampeano. *Ciencias del Suelo*. 19 (2).144-154.
- Agostini M. A., Studdert, G. A., y Domínguez, G. F. 2012.** Relación entre el cambio en el diámetro medio de agregados y el carbono orgánico y sus fracciones. *Actas del “XIX Congreso Latinoamericano” y “XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo”*. 16 al 20 de abril del 2012. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Alakukku L. 1998.** Properties of compacted fine-textured soils as affected by crop rotation and reduced tillage. *Soil Till. Res.*, 47:83-89.
- Albanesi A., Anriquez A. y Polo Sanchez A. 2003.** Efectos de la agricultura convencional sobre algunas formas de C en toposecuencia de la región Chaqueña, Argentina. *Agriscientia*, Vol XX: 9-17
- Álvarez C. R., Taboada M. A., Gutierrez Boem F. H., Bono A., Fernandez P. L. y Prystupa P. 2009a.** Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1251.
- Álvarez C. R., Torres Duggan M., Chamorro E. R., D’Ambrosio D., Taboada M.A. 2009b.** Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo* 27(2): 159-169.
- Álvarez C. R., Fernández P. L. y Taboada, M. A. 2012.** Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la región pampeana. *Ciencia del Suelo*. 30 (2):173-178.
- Álvarez R. y Alvarez C. R. 2000.** Soil organic matter pools and their associations in carbon mineralization kinetics. *Soil Sci. Am. J.* 64:184-189.

- Álvarez R. 2006.** Materia Orgánica. Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. I Edición. Impreso por Orientación Grafica Editora SRL. ISBN 950-29-0911-9. 206 páginas.
- Álvarez R. 2007.** Balance de carbono en los suelos. <http://www.engormix.com/MA-agricultura/maiz/articulos/balance-carbono-suelos-t1457/p0.htm>
- 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., Berhongaray G., Bono A., Steinbach H. S. y De Paepe J. 2014.** Rangos de densidad aparente en suelos pampeanos. XXIV Congreso de Ciencia de Suelo. Bahía Blanca, del 5 al 9 de mayo del 2014.
- Álvaro-Fuentes J., Arrúe, J. L., Gracia R., López M. V. 2008.** Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma* 145:390-396.
- Álvaro-Fuentes J., Cantero-Martínez C., López M. V., Paustian K., Denef K., Stewart C. E. y Arrúe J. L. 2009.** Soil aggregation and soil organic carbon stabilization: effects of management in semiarid mediterranean agroecosystems.
- Amézketa E. 1999.** Soil aggregate stability: a review. *Journal of sustainable agriculture*, 14(2-3), 83-151.
- Angella G. A. 2016.** Sistema de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Brecha de rendimientos y productividad del agua en los cultivos de maíz y algodón. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, departamento de agronomía.
- Angers D. A. y Caron J. 1998.** Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*. 42: 55-72.
- Angueira C. y Zamora E. 2007.** Carta de suelos. Oeste del Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Serie informes técnicos EEASE N°40. INTA, Argentina.
- Ankeny M. D., Ahmed, M., Kaspar, T. C., y Horton, R. 1991.** Simplified method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 467–470.
- Anriquez A., Albanesi A., Kunst C., Ledesma R., Lopez C., Rodriguez Torresi A. y Godoy J. 2005.** Rolado de fachinales y calidad de suelos en el Chaco occidental, Argentina.. *Ci. Suelo (Argentina)* 23 (2) 145-157.

- Anriquez A., Savino P., Silberman J., Domínguez Núñez J. y Albanesi A. 2014.** Fracciones de C, N y actividad microbiológica del suelo, en rolados del centro este de Santiago del estero. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Aoki, A.M., Sereno, R. 2004.** Modificaciones de la Conductividad Hidráulica y Porosidad del Suelo, Estimadas Mediante Infiltrómetro de Disco a Tensión Pp. 159-180. En Filgueira R., Micucci F. (eds). Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría. Editorial Edulp.
- Apezteguía H. y Sereno R. 2002.** Influencia de los sistemas de labranza sobre la cantidad y calidad del carbono orgánico del suelo. Agricultura Técnica (Chile). V 62 (3): 418-426.
- Austin A. y Vivanco L. 2006.** Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. Nature 442: 555-558.
- Banegas N. R., Albanesi A. S., Pedraza R., Nasca J. A., y Toranzos M. R. 2007.** Determinación de fracciones de carbono edáfico en un sistema pastoril bovino de la Llanura Deprimida Salina de Tucumán, Argentina. Trabajo obtenido de internet del sitio <http://www.produccion-animal.com.ar/>. Acceso febrero de 2018.
- Barbero F, Apezteguía H. P. y Sereno R. 2010.** Tasa de mineralización del suelo luego del desmonte en Córdoba y Santiago del Estero. HUMUSLAB. URL: humuslab.com/articulos/resumen-e-pandido.doc.
- Barraco M., Álvarez C. y Díaz-Zorita M. 2004.** Ensayo de labranzas de larga duración en un hapludol del Noroeste bonaerense: efectos en el suelo y los rendimientos de maíz y soja. Publicación Técnica N° 40. INTA, República Argentina, agosto 2004.
- Basanta M., Maressa M., Giubergia J. P., Aimetta M. B., Álvarez C. y Cesaretti C. 2014.** Propiedades físicas de un Haplustol del centro de la provincia de Córdoba. XXIV Congreso de Ciencia de Suelo. Bahía Blanca, del 5 al 9 de mayo del 2014.
- Bathke G. R. y Blake G. R. 1984.** Effects Of Soybeans On Soil Properties Related To Soil Erodibility. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 1398-1401.
- Biani N. B., Vesprini J. L. y Prado D. E. 2005.** Conocimiento sobre el gran Chaco Argentino en el siglo XX. En: Ecología y Manejo de los bosques de Argentina. Investigación en bosques nativos de Argentina, <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/15915>, consulta: septiembre 2018.

- Blanco-Canqui H., y Lal R. 2004.** Mechanisms of Carbon Sequestration in Soil Aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences* 23, 481-504.
- Blanco-Canqui, H. 2011.** “Does No-till Farming Induce Water Repellency to Soils?” *Soil Use Managet* 27: 2-9.
- Blankinship J. C., Fonte S. J., Six J. y Schimel J. P. 2016.** Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem. *Geoderma* 272: 39-50.
- 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.
- Boletta P. E., Acuña L., y Juárez de Moya M. L. 1989.** Análisis de las características climáticas de la Provincia de Santiago del Estero y comportamiento del tiempo durante la sequía de la campaña agrícola 1988/89, 23 p. anexo. INTA-UNSE, Santiago del Estero, Argentina
- Botta G. F., Jorajuria D., y Draghi L. M. 2002.** Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics*, 39(1), 47-54.
- Botta B. A., Jorajuría D., Balbuena R. y Rosatto R. 2004.** Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil and Tillage Research* 78: 53-58.
- Botta G. F., Pozzolo O. M., Bomben M., Tourn E., Soza H., Rosatto A., Gili J., Ressia D., Rivero J., Vazquez Y. y Stadler S. 2007.** Aplicación del tráfico controlado en la cosecha de maíz: Efectos sobre rendimientos del cultivo y las propiedades físicas del suelo. *Agro-Ciencia* 23.
- Botta G. F., Tolon Becerra A., Bellora F. y Tourn M. 2008.** Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil & Tillage Research* 103(2009): 381-386.
- Bronick C. J. y Lal R. 2005.** Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil Till. Res.* 81: 239-252
- Burke W., Gabriels D., Bouma J. 1986.** Soil structure assessment. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 92

- Buschiazzo D. E., Quiroga A.R. y Stahr K. 1991.** Patterns of organic matter accumulation in soils of the Semiarid Argentinian Pampas. *Z. Pflanzen Boden.* 154: 347-441.
- Buschiazzo D. E. y Panigatti J. L. 1996.** Labranzas en la región semiárida argentina: consideraciones finales. 113 - 124. En *Labranzas en la región semiárida argentina.* Buschiazzo, D. E.; J. L. Panigatti y F. J. Babinec (Eds.). Centro Regional La Pampa – San Luis. EEA Ing. Agr. Guillermo Covas INTA Anguil. Impreso de Editorial Extra. Santa Rosa. ISBN 950-43-7384-4. 126 páginas.
- Buyanovsky G. A., Islam M. y Wagner G.H. 1994.** Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1167-1173.
- Cáceres Días R., Gutiérrez J. R., Luque R. y Petkoff Bankoff J. 2008.** Abonos verdes en monocultivo de algodón con siembra convencional y su efecto sobre la resistencia mecánica a la penetración. XXI Congreso Argentino de la Ciencia de Suelo. Potrero de los Funes (SL), Argentina, del 13 al 16 de mayo del 2008.
- Cambardella C. A. y Elliott E. T. 1992.** Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci.Soc.Am.J.*56:777–783
- Cannell R. Q. y Hawes J. D. 1994.** Trends in tillage practices in relation to sustainable crop production with special reference to temperate climates. *Soil and Tillage Research* 30: 245-282.
- Caron J. 1996.** Describing pressure buildup within aggregates following immersion: a model. En: *Proceedings of the 3rd Eastern Canada Soil Structure Workshop* (J. Caron, D.A. Angers y G.C. Topp, eds). Colloque Canadien sur la structure du sol, Merrickville, Ontario. pp. 59–73.
- Carter M. R. 2002.** Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94: 38-47
- Casado-Murillo N y Abril A. 2013.** Decomposition and carbón dynamics of crop residue mixtures in a semiarid long term no-till system: effects on soil organic carbon. *Open Agric. J.* 7(Suppl. 1- M3): 11-21.
- Casanobas E., Echeverria H. y Studdert G. 1995.** Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. Contenido total y de distintas fracciones. *Ciencia del suelo* 13: 16-20.
- Casas R. y Mon R. 1983.** Desmonte y habilitación de tierras en Santiago del Estero. IDIA. N° 413-416, pp: 56-64

- Castiglioni M. G., Mendive Álvarez M. E., Cordoba J., Ochoa M. y Mazzoni D. 2010.** Cambios en la porosidad y distribución de poros asociados a causas edáficas y por el uso de la tierra. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Argentina.
- Castiglioni M. G., Kraemer F. B. y Morrás H. J. M. 2013.** Efecto de la secuencia de cultivos bajo siembra directa sobre la calidad física de suelos de la región Pampeana. *Cienc Suelo* (Argentina) 31(1): 93-105.
- Castiglioni M., Navarro Padilla R., Eiza M., Romaniuk R., Beltran M. y Mousigne F. 2016.** Respuesta en el corto plazo de algunas propiedades físicas a la introducción de cultivos de cobertura. *Ciencia del Suelo* 34 (2): 263-278.
- Castiglioni M. G., Kraemer F. B. y Marquez Molina J. 2018** Conductividad Hidráulica Saturada determinada por distintos procedimientos en suelos con alta humedad inicial. *Cienc. Suelo* (Argentina) 36 (2): 158-169, 2018.
- Castiglioni G. y Kraemer F. B. 2019.** Short-term of cover crops on aggregate stability assessed by two techniques. *Ciencia del Suelo* , 37 (2).
- Caviglia O. P. y Andrade F. H. 2010.** Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *Americas J. Plant Sci. Biotech.* 3:1-8.
- Caviglia O. P., Sadras V. O. y Andrade F. H. 2011.** Grain yield and quality of wheat and soybean in sole- and double-cropping. *Agron. J.* 103, 1081-1089.
- Chagas C. I., Marelli H. y Santanatoglia O. 1994.** Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol típico bajo tres sistemas de labranza. *Cienc Suelo* (Argentina) 12 (1): 11-16.
- Chagas C. I., Santanatoglia O. J., Castiglioni M. G., y Marelli H. J. 1995.** Tillage and cropping effects on selected properties of an Argiudoll in Argentina. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 643-655.
- Chan K. Y. 1997.** Consequences of changes in particulate organic carbon in Vertisols under pasture and cropping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1376-1382.
- Chancellor W. J. 1977.** Compaction of Soil by Agricultural Equipment. In: *Bulletin* 1881, Ed.: University of California. Division of Agricultural Sciences. 32 pp.
- Chen Y., Cavers C., Tessier S., Moreno F. y Lobb D. 2005.** Short-term tillage effects on soil cone index and plant development in a poorly drained, heavy clay soil. *Soil Till. Res.* 82: 161-171.

- Chenu C., Le Bissonnais Y. y Arrouays D. 2000.** Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1479-1486.
- Christensen B. T. 2001.** Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *Eur. J. Soil Sci.* 52: 345-353.
- Ciarlo E., Cosentino D., Heredia O. y Conti M. 2004.** Efecto del uso del suelo sobre fracciones de la materia orgánica y cantidad de agregados estables. *Revista Científica Agropecuaria* 8(2): 15-23.
- Coelho M. B., Mateos L. y Villalobos F. J. 2000.** Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. *Soil Till. Res.*, 57 (2000), pp. 129–142.
- Conant R., Klopatek J. F y Klopatek C. C. 2000.** Environmental Factors Controlling Soil Resoiration in Three Semiarid Ecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 383-390.
- Coria R. D. 2004.** Influencia de la agricultura en las propiedades hidráulicas del suelo en un paisaje del Chaco Semiárido: I. Suelos en ambientes generadores de escorrentía. Trabajo Final de Graduación para acceder al título de Lic. en ecología y conservación del ambiente. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales.
- Coronel de Renolfi, M. y Ortuño, S. 2004.** Optimización productiva en el área de riego del río Dulce de Santiago del Estero, *Realidad Económica*, n°. 203, p. 121-136.
- Cosentino D. 2006.** Contibution des matieres organiques à la satabilite de la structure des sols limoneux cultives. Effet des apportes organiques a court terme. Dr. Sci. Theses. Institut National Agronomique Paris–Grignon.
- Cosentino D., Chenu C. y Le Bissonnais Y. 2006.** Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.* 38:2053-2062.
- De Bano L. F. 1971.** The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration. *Proceedings of the Soil Science Society of America.* 35: 340–343.
- De Gryze S., Jassogne L., Bossuyt H., Six J. y Merckx R. 2006.** Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture. *Eur. J. Soil Sci.* 57:235–246. doi.org/10.1111/j.1365- 2389.2005.00733.x.

- De Nobili M., y Maggioni A. 1993.** Infl uenza della sostanza organica sulle proprietà fisiche del suolo. En: Ciclo della sostanza organica nel suolo: aspetti agro-nomici, chimici, ecologici e selviculturali (Ed. P. Nannipieri) Pàtron Editore. Bologna, Italia.
- Dekker L. W. y Ritsema C. J. 2000.** Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *Journal of Hydrology*. 231–232: 148–164.
- Desjardins T., Folgarait P. J., Pando-Bahuon A., Girardin C., y Lavelle P. 2006.** Soil organic matter dynamics along a rice chronosequence in north-eastern Argentina: Evidence from natural ¹³C abundance and particle size fractionation. *Soil Biol. Biochem.* 38: 2753-2761.
- Dexter A.R. 1988.** Advances in characterization of soil structure. *Soil Til. Res.* 11: 199–238
- Dexter, A. R., Czyz E. A., Niedzwiecki J. y Mackowiak C. 2001.** Water retention and hydraulic conductivity of a loam sand soil as influenced by crop rotation and fertilization. *Arch. Acker- Pfl. Boden* 46: 123-133.
- Dexter A. R. 2004.** Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Di Rienzo J. A., Casanoves F., González L. A., Tablada E. M., Díaz M. del P., Robledo C. W. y Balzarini M. G. 2009.** Estadística para las ciencias agropecuarias. 7ma ed. 372 pp.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., González L., Tablada M. y Robledo C.W. 2015.** Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz-Zorita M., Perfect E. y Grove J. H, 2002.** Disruptive methods for assessing soil estructure. *Soil and Tillage Research* 64. 3-22.
- Díaz-Zorita M., Barraco M. y Álvarez C. 2004.** Efectos de doce años de labranzas en un haplustol del noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 22: 11-18.
- Dörner J. y Dec, D. 2007.** La permeabilidad de aire y conductividad hidráulica saturada como herramientas para la caracterización funcional de los poros del suelo. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 7 (2): 1-13.
- Dou F., Wright A.L., y Hons F.M. 2007.** Depth distribution of soil organic C and N after long-term soybean cropping in Texas. *Soil Till. Res.* 94:530-536.

- Drganc D. M., Ferreyra M., Corrales A., Gutiérrez N. y Venialgo C. 2000.** Caracterización de la Resistencia Mecánica a la Penetración en suelos del Dorsal Agrícola Chaqueño sometidos a labranza cero. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2000. A-08.
- Duffau, R. A., Ecurra F. A., Galizzi F. A. y Soria R. 2000.** Tipos de suelos asociados a las unidades geomorfológicas del área de riego del Dulce (Santiago del Estero). XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. Resúmenes, página 250.
- Duffau R. A., Sánchez M. C., Galizzi F. A. y Angueira C. 2013.** Descripción de un suelo: zona agrícola del campo experimental La María. INTA Innova. La María. Abril 2013
- Echeverría N., Querejazú S., De Lucia M., Silenzi J., Forjan H. y Manso M. 2012.** Estabilidad y carbono orgánico de agregados bajo rotaciones en siembra directa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.
- Edwards W. M., Norton L. D. y Redmond C. E. 1988.** Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil. Sci. Soc. Am. J. 52: 483-487. effects on soil C storage on the Canadian prairies. Soil Tillage Res.
- Ellies Sch A., Grez R. y Ramírez C. 1997.** La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. Agro sur, vol.25, n°.1, p.51-56. ISSN 0304-8802.
- European Conservation Agriculture Federation. 1999.** Agricultura de conservación en Europa: aspectos medioambientales, económicos y administrativos de la UE. Bruselas, Bélgica.
- Fernández R., Furch N. E., Frasier M. B. I., Scherger E. D. y Quiroga A. R. 2020.** Efecto de las pasturas perennes en la fertilidad física y biológica en Molisoles de la región semiárida pampeana. Cienc. Suelo (Argentina) 38 (1): 133-148.
- Ferreras L., Magra G., Besson P., Kovalevski E. y García F. 2007.** Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de argentina bajo siembra directa. Ciencia del suelo 25(2): 159-172.
- Gabioud E. A., Wilson M. G., Sasal M. C. y Indelángelo N. 2008.** Análisis de la metodología de estabilidad de agregados de Le Bissonnais (1996) para diferenciar usos de suelos. En Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis. Pp. 53.

- Gabioud E.A., Wilson M.G., y Sasal M.C. 2011.** Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. Ciencia del suelo;29(2):129-39.
- Gabioud E. A. 2018.** Regeneración de la estructura edáfica y su efecto sobre el ingreso del agua. Evaluación del agregado de enmiendas en Argiudoles bajo siembra directa. Tesis presentada para optar al título de Magister. Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. FAUBA. Argentina
- Galantini J. A. 2001.** Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. Revista RIA (INTA) 30 (1): 125-146.
- Galantini, J. A., Iglesias J. O., y Rossell R. A. 2004.** Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en la región semiárida pampeana. En: XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina.
- Galantini J. A. 2008.** Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. En: Galantini, J. A. “Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina”, Edición literaria. 1ª ed. Bahía Blanca, Universidad Nacional del Sur, Ediuns, 2008. 309 p.
- Galantini J. A. y Suñer L. 2008.** Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. Agriscientia. Vol XXV (1) 41-55
- Galizzi F. A., Gonzales C. C., Sánchez M. C., Azar A. E., y Mondino M. H. 2012.** Carbono orgánico en un suelo manejado con rotaciones y siembra directa. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Galizzi F. A., Bonelli C. L., González C. C., Sánchez M. C. y Duffau R. A. 2014.** Condición física final de un suelo manejado con rotaciones bajo siembra directa. XXIV Congreso de Ciencia de Suelo. Bahía Blanca, del 5 al 9 de mayo del 2014.
- Galizzi F. A., González C. C. Nazar P. E., Elías Tissera M. J., Ramírez N. M., y Gomez N. A. 2015.** Condición inicial de un suelo degradado por el uso agrícola continuado en la zona IV de riego del Rio Dulce (Provincia de Santiago del Estero). X Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA. Salta 21 y 22 de mayo del 2015.

- Galizzi F. A., González C. C., Elías Tissera M. J., Sánchez M. C., Cáceres Romero H., Azar A. E. y Cosci F. 2018.** Cambios en propiedades edáficas por el uso del suelo en el sudeste de Santiago del Estero. XXVIº Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Tucumán. 15 al 18 de mayo del 2018. Comisión I – Panel N° 25.
- Gasparoni J. C. 2008.** Determinación de la materia orgánica del suelo. En: Galantini, J. A. “Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina”, Edición literaria. 1ª ed. Bahía Blanca, Universidad Nacional del Sur, Ediuns, 2008. 309 p.
- Gavande, S. 1991.** Física de suelos. Principios y aplicaciones. Ed. Limusa.
- Gerster G y Bacigaluppo S. 2004.** Consecuencia de la densificación por tránsito en Argiudoles del sur de Santa Fe. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 303
- Gerster G., Bacigaluppo S., Bodrero M. y Salvagiotti F. 2010.** Secuencia de cultivos, descompactación mecánica y rendimiento de soja en un suelo degradado de la región pampeana. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Argentina.
- Gibbs R. J. y Reid J. B. 1988.** A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science* 8: 123-149.
- Gómez, N. A., Azar, E. A. y Savino P. 2016.** Evolución de nitratos, rastrojos, parámetros de crecimiento y rendimiento de algodón para dos antecesores diferentes. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto, Córdoba, 27 de Junio - 01 de Julio
- González C. C., Elías Tissera M. J. y Galizzi F. A. 2016.** Mineralización del carbono orgánico en suelos con rotaciones y siembra directa en Santiago del Estero. XXIVº Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 27 junio, 2016 al 1 julio del 2016. Río Cuarto Córdoba. Comisión 2. Biología del suelo
- Gómez N. A, Lescano M., Contreras M., Azar E. A., Savino P. y Sainz Rozas H. 2019.** Efecto del cambio en el uso del suelo en el oeste de Santiago del Estero, situación prístina a una agrícola. IV Jornada nacional de suelos de ambientes semiáridos. Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias- Universidad Nacional de Córdoba. 25 y 26 de septiembre de 2019

- Gómez N. A., Avalos A., Coriale S. y Azar E. A. 2020.** Efecto de diferentes antecesores sobre el cultivo de algodón. informe técnico INTA. <https://inta.gob.ar/documentos/efecto-de-diferentes-antecesores-sobre-el-cultivo-de-algodon-0>. Ingreso 13 mayo
- Gómez N. A., Azar, E. A., Savino, P. y Sánchez M. C. 2018.** Efecto de secuencias de cultivos sobre algunos parámetros químicos del suelo, bajo siembra directa e irrigados. XXVI Congreso de Ciencia de Suelo. Tucumán, del 15 al 18 de mayo del 2018, Comisión 1 – Panel 27
- González H. M., Restovich S. B. y Portela S. I. 2017.** Utilización de cultivos de cobertura invernales como alternativa para mejorar la estabilidad estructural del suelo. Cienc. Suelo (Argentina). 35(1): 1-10.
- Goss M. J. y Kay B. D. 2005.** Soil Aggregation. In: Zobel, RW, Wright, SF (eds), Roots and Soil Management: Interactions between Roots and the Soil. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, pp. 163-180.
- Gramajo D. Y. N. 2012.** Macronutrientes y calidad de materia orgánica del suelo en diferentes secuencias de cultivos agrícolas del área de riego del Río Dulce, Santiago del Estero. Trabajo Final para la obtención del título de Ing. Agr. Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero
- Haynes R. J., y Swift R. S. 1990.** Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. European Journal of Soil Sciences. 41: 73–83.
- Haynes R. J. 2000.** Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. Soil Biol. Biochem. 32: 211-219.
- Heiva G., Buschiazzo D. y Díaz Raviña M. 2003.** Carbono orgánico, nitrógeno y carbohidratos totales en Suelos de la región semiárida argentina (RSA). Geoderma vol. 116, 3-4:265-277.
- Hénin S., Monnier, G. y Combeau, A. 1958.** Méthode pour l' étude de la stabilité structurale des sols. Annales Agronomiques, 9: 73-92.
- Iglesias J., Vallejos A., Galantini J., Bondia P. y Kleine C. 2014.** Efecto del tránsito en algunas propiedades físicas edáficas en dos sistemas de labranza. XXIV Congreso de Ciencia de Suelo. Bahía Blanca, del 5 al 9 de mayo.

- Imbellone P. A. y Álvarez C. R. 2018.** Compactaciones naturales y antrópicas en suelos argentinos. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo -AACS. ISBN 978-987-46870-1-2.
- Imhoff S., Ghiberto P., Grioni A. y Gay J. 2010.** Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma* 158: 268–274.
- Irizar A. B. 2010.** Cambios en las reservas de materia orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas: efecto de la secuencia de cultivo, del sistema de labranza y de la fertilización nitrogenada, Tesis presentada para optar al título de Magister. Universidad de Buenos Aires, Área Ciencia del Suelo Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano. Facultad de Agronomía, Argentina.
- Janzen H. H., Campbell C. A., Izaurrealde R. C., Ellert B. H., Juma N., McGill W. B. y Zentner R. P. 1998.** Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil Tillage Res.* 47: 181–195
- Jouany C., Chenu, C. y Chassin, P. 1992.** Détermination de la mouillabilité des constituants du sol ii partir de mesures d ‘angles de contacts: revue bibliographique. *Science du Sol*, 30: 33-47. Juma, N., McGill, W. B. and Zentner, R. P. 1998. Management
- Klute A. y Dirksen C. 1986.** Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, (methodsofsoilan1), 687-734.
- Koritko L. M., Suárez R. A., Anriquez A. L., Pece M. y Albanesi A. S. 2019.** Efecto de la siembra directa en la estabilización del carbono orgánico del suelo a escala de sitio en Santiago del Estero, Argentina. *Rev. Agron. Noroeste Argent.* (2019) 39 (1): 9-18 ISSN 0080-2069 (impresa) ISSN 2314-369X (en línea)
- Kraemer B. F., Castiglioni M. G., Carnevale L., Fernandez P. L., Morrás, H. J. M. 2014** Porosidad estructural y textural en manejos bajo siembra directa en la región pampeana. XXIV Congreso de Ciencia de Suelo. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Kraemer F. B. 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 de Doctor. Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. FAUBA. Argentina

- Kraemer F. B., Soria M. A., Castiglioni M. G., Duval M., Galantini J. y Morrás H. 2017.** Morphostructural evaluation of various soils subjected to different use intensity under no-tillage. *Soil Till. Res.* 169: 124–137.
- Kraemer F B., Castiglioni M G., Fernández P. L., Chagas C. I. y Morrás H. J. M. 2018.** Efecto de la intensificación agrícola y los años bajo siembra directa sobre la porosidad del suelo. XXVI Congreso de Ciencia de Suelo. Tucumán, del 15 al 18 de mayo.
- Lal R., Lagomarsino A., Ledda L. y Roggero P. 2014.** Variation in soil C and microbial functions across tree canopy projection and open grassland microenvironments. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 38: 62-69.
- Le Bissonnais Y. 1996.** Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D. 1997.** Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science* 48, 39-48
- Lee J., Hopmans J. W., Rolston D. E., Baer S.G. y Six J. 2009.** Determining soil carbón stock changes: simple bulk density corrections fail. *Agr. Ecosyst. Environ.* 134:251-256.
- Lipiec J., Kus J., Slowinska-Jurkiewicz A. y Nosalewicz A. 2006.** Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage Research.* 89 (2), 210-220.
- Lombardo P. y Pescio F. 2006.** Avance de la agriculturización en el noroeste argentino: el caso de la provincia de Santiago del Estero. In Presentado en VII Congreso Latinoamericano de Sociología Rural, Asociación Latinoamericana de Sociología Rural, Ecuador (pp. 20-25).
- López Báez W., Reynoso Santos R., López Martínez J., Camas Gómez R., y Tasistro A. 2018.** Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1), 65-79.
- López M. V. y Arrúe, J. L. 1997.** Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil & Tillage Research* 44: 35-54

- Lorenz G. 1995.** Caracterización ecológica de un suelo Eutric Regosol bajo bosque en el chaco semiárido, Argentina. *Quebracho* (3): 13 – 23.
- Lorenz G. 2005.** Métodos de análisis de suelos. Serie Didáctica N°12. Cátedra de Ecología Forestal- Facultad de Ciencias Forestales-Universidad Nacional de Santiago del Estero-Argentina. 126pp.
- Lozano L. 2014.** Desarrollo de estructura laminar del suelo en siembra directa. Factores predisponentes y efectos sobre las propiedades hidráulicas. Tesis Doctoral en Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Argentina.
- Lu, Y. C., Watkins, K. B., Teasdale, J. R y Abdul-Baki, A. A., 2000.** Cultivos de cobertura en la producción sostenible de alimentos. *Food Reviews International* , 16 (2), 121-157.
- Luo Z., Wang E. y Sun O. J. 2010.** Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: a review and synthesis. *Geoderma* 155: 211-223. Miller, WP & DE Radcliffe. 1992. Soil crusting
- Mahboubi A. A., Lal R. y Faussey N. R. 1993.** Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Sci Soc Am J* 57: 506-512.
- Mardhiah U., Caruso T., Gurnell A. y Rillig M. C. 2014.** Just a matter of time: Fungi and roots significantly and rapidly aggregate soil over four decades along the Tagliamento River, NE Italy. *Soil Biol. Biochem.* 75: 133-142.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. 2010.** Hacia una estrategia para el manejo integrado del agua de riego en la Argentina. ISBN 978-987-25476-3. Primera edición, Buenos Aires.
- Ministerio de Economía y Finanzas Publicas. 2014.** Secretaria de Política Económica y Planificación del desarrollo. Informe Productivo Provincial, Santiago del Estero.
- Ministerio de Modernización Presidencia de la Nación, 2018.** Subsecretaría de Agricultura, Dirección Nacional de Estimaciones, Delegaciones y Estudios Económicos. Estimaciones agrícolas: Serie de estadística agrícola por cultivo, campaña, provincia y departamento de la República Argentina con los siguientes datos: superficie sembrada, superficie cosechada, producción y rendimiento. Las superficies se muestran en hectáreas, la producción en toneladas y el rendimiento en kg/ha. <http://datos.gob.ar/dataset/estimaciones-agricolas>. Visitado el 25/04/2018

- Monti M., Delgado G., y Jozami D., 2012.** Utilización de la grama rhodes para el mejoramiento de bajos en la pampa húmeda. En www.sitioargentinodeproduccionanimal.com.ar. Pag 1- 5.
- Morán M., Costa J. L., Calviño P. y Rodríguez J. 2000.** Influencia del pastoreo de verdeos sobre algunas propiedades físicas del suelo y del cultivo de soja en un sistema de siembra directa. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. 2000.
- Morel J., L. Habib S. Plantureux y A. Guckert. 1991.** Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability. *Plant Soil*. 136: 111–119.
- Moret D. y Arrúe J. L. 2007.** Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil Till. Res.* 96: 103 - 113.
- Moro E. C., Venialgo C. A., Gutiérrez N. C., Drganc D., Asselborn A. y Oleszczuk J. D. 2016.** Efecto de las labranzas y rotaciones sobre la compactación de suelos en distintos sistemas productivos de la Provincia del Chaco-República Argentina. *Agrotecnia*, (12), 4-8.
- Morrás H., Bonel B., Fernandez P. L., Kraemer F. B. y Alvarez C. 2012.** Topsoil microstructural models in no-till Pampean Mollisols of Argentina. Morphology and development. Proceedings of the 14th International Working Meeting on Soil Micromorphology. Lleida, España.
- Moscuzza C., Pérez Carrera A., Garaicoechea J. y Fernández Cirelli A. 2003.** El agua en Iberoamérica; Aspectos de la problemática de las tierras secas. Edit. Alicia Fernández Cirelli y Elena Abraham. Publ. por CYTED XVII. 35-53
- Moscuzza C., Pérez Carrera A., Angella G., Prieto, D., Angueira C., López J., y Fernández Cirelli, A. 2005.** Evolución en el uso del territorio en la provincia de Santiago del Estero (Argentina). *El agua en iberoamérica*, 11, 41-54.
- Musso T. B., Cantú M.P., Becker A. R., 2004.** Efecto de distintos sistemas de labranza y de la fertilización sobre el carbono orgánico, N total y el pH de un Hapludol Típico del sur de Córdoba. XIX Cong. Arg. Cs. del Suelo. CD. 10 p.
- Nazar P. E. 2018.** Degradación de un suelo Molisol en la zona de riego del Proyecto Río Dulce. Su caracterización y recuperación mediante la aplicación de una práctica conservacionista. Trabajo final de intensificación para acceder al título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía y Agroindustrias. Universidad Nacional de Santiago del Estero.

- Nazar P.E. y Galizzi, F.A. 2018.** Degradación de suelos una zona de riego. Caracterización y recuperación mediante siembra directa. XXVI Congreso de Ciencia de Suelo. Tucumán, del 15 al 18 de mayo del 2018, Comisión 4 – Panel 92
- Norma IRAM- SAGPyA 29571-2. 2009.** Determinación de materia orgánica en suelos. Parte 2- Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla oxidante fuerte, escala semi-micro.
- Nouri A., Lee J., Yin, X., Tyler D. D., y Saxton A. M. 2019.** Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. *Geoderma*, 337, 998-1008.
- Novelli L. E. 2013.** Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados. Doctoral dissertation, Tesis de Doctor. Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. FAUBA. Argentina
- Novelli L., Caviglia O., Wilson M. G. y Sasal M. 2013.** Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*. 195–196: 260–267.
- Oades J. M. 1993.** The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. 56: 377-400.
- Ojeda G., Alcañiz J. M., y Le Bissonnais Y. 2008.** Differences in aggregate stability due to various sewage sludge treatments on a mediterranean calcareous soil. *Ecosys Environ*, 125:48 - 56.
- Oneto C. A., Fumagalli A., Cornachione M., Salgado J. M. y González Pérez M.A. 2005b.** Evaluación de parámetros físicos de suelo bajo pastoreo con alfalfa y verdeos en área semiárida bajo riego. Congreso Argentino de Ingeniería Rural (CADIR). Merlo, San Luis.
- Oneto C. A., Sokolic L. A., y Cáceres. H. 2005a.** Diferentes labranzas y evolución de parámetros físico-químicos de suelo sobre rendimiento de algodón bajo riego con rotación de verdeo. Congreso Argentino de Ingeniería Rural (CADIR). Merlo, San Luis.
- Oneto C. A. y Ferreiro A. 2011.** Resultados comparativos de uso a campo para penetrómetros estáticos manuales y dinámicos, diseñados. VII Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA. UNCa. Libro de resúmenes 8 páginas.

- Osinaga N., Castro J. E., Álvarez C. R. y Taboada M. A. 2014.** ¿Cómo influye la agriculturización sobre la calidad edáfica en el chaco subhúmedo? XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Bs As., Argentina. 5 al 9 de mayo de 2014.
- Paladino R. I. 2014.** Calidad de suelos y secuestro de carbono bajo distintos usos en hapludoles mono y poligenéticos de la pampa arenosa. Tesis para obtener el grado de Magister de la Universidad de Buenos Aires área Ciencias del Suelo otorgado por Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados.
- Pecorari C., Guerif J. y Stengel P. 1990.** Fitólitos en los suelos pampeanos argentinos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de los mecanismos elementales de la evolución de la estructura. *Cienc. Suelo (Argentina)* 8:135-141.
- Perroux K. M. y White I. 1988.** Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1205-1215.
- Piccolo A. y Mbagwu J. S. C. 1999.** Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1801–1810.
- Pinheiro E. F. M., Pereira M. G., y Anjos L. H. C. 2004.** Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. *Soil Tillage Res.* 77: 79–84.
- Pozzolo O. y Ferrari H. 2007.** El tránsito de maquinarias y la compactación de los suelos en siembra directa. Pp 75-80. En *Agricultura Sustentable en Entre Ríos*. Caviglia O, Paparotti O y M Sasal (eds). Ediciones INTA. 230 p.
- Quiroga A. R., Buschiazzi D. E. y Peinemann N. 1996.** Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argentinian Pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.
- Quiroga A. R., Buschiazzi D. E. y Peinemann N. 1999.** Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampa. *Soil Till. Res.* 52: 21-28.
- Quiroga A., Ormeño O. y Peinemann N. 2001.** Materia orgánica. Un indicador de calidad de suelos relacionado con la productividad de los cultivos. Boletín de divulgación técnica N° 70. Estación experimental agropecuaria Anguil. “Ingeniero Agrónomo Guillermo Covas”. INTA. ISSN 0325-2167. 27 páginas.
- Quiroga A. y Bono A, 2012.** Manual de evaluación de fertilidad y evaluación de suelos. Ediciones INTA 2012. EEA INTA Anguil Ing. Agr Guillermo Covas (6326) Anguil, La Pampa, Argentina. Capítulo IV, pag. 39-84

- Radrizzani A. 2000.** Los sistemas productivos del área de riego del río Dulce: Una visión desde la sustentabilidad. Universidad Internacional de Andalucía.
- Ramsperguer B. 1992.** Veränderung des Bodenzustandes durch Nutzungswechsel am Beispiel von Regosols aus Löss im Chaco seco, Argentinien. Tesis de grado. Univ. Hohenheim. Stuttgart. Alemania. 114 pág.
- Rasaily R. G., Li H., He J., Wang Q. y Lu C. 2011.** Influence Of No Tillage Controlled Traffic System On Soil Physical Properties In Double Cropping Area Of North China Plain. *African Journal Of Biotechnology* 11: 856-864.
- Restovich S. B., Torti M. J., Colombini D. A. y Andriulo A. E. 2010.** Evolución de algunas propiedades físicas y químicas edáficas durante la implementación de cultivos de cobertura en la secuencia soja maíz. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario.
- Restovich S., Andriulo A. y Améndola C. 2011.** Introducción de los cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: efecto sobre algunas propiedades de suelo. *Ciencia del Suelo* 29(1): 61-73.
- Reynolds W. D., Bowman B. T., Brunke R. R., Drury C. F., Tan C. S. 2000.** Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(2), 478-484.
- Reynolds W. D., Bowman B. T., Drury C. F., Tan C. S. y Lu X. 2002.** Indicators of good soil quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110: 131-146.
- 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: 252-263.
- Rillig M.C., Aguilar-Trigueros C. A., Bergmann J., Verbruggen E., Veresoglou S. D. y Lehmann A. 2014.** Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation. *New Phytol* 205: 1385-1388.
- Rojas J. M. 2012.** Indicadores de calidad de suelos desmontados y destinados a la producción agrícola en el Área Piloto de la Ecorregión Chaqueña. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias- Orientación: Producción Sostenible, UNT, Tucumán. Argentina. 151 pp.
- Rojas J. M., Roldán M. F., y Guevara G. S. 2015.** Influencia de rotaciones en la calidad del suelo en la zona central del chaco y su relación con la producción de algodón. *Ciencia del suelo*, 33(2), 0-0.

- Roldán S., Lorenz G., y Bonelli. L. 2000.** Aspectos de calidad de la materia orgánica del suelo en función del uso de la tierra en el centro este santiagueño. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. 11 al 14 de abril del 2000. Resúmenes. Comisión I – Panel N° 54.
- Rovira P. y Vallejo V. R. 2002.** Labile and recalcitrant pools of carbón and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma* 107 (1-2): 109-141
- Rubio, V., Bidegain, M. P., Beretta A., Barolini E. y Quincke A. 2019.,** Impacto de propiedades físico-químicas en la estabilidad estructural de Molisoles. *Cienc. Suelo*. 37 (2): 367-371.
- Sainz Rozas H. R., Echeverria H. E. y Angelini H. P. 2011.** Niveles de carbono orgánico y ph en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del suelo* 29: 29-37.
- Samouelian A., Cousin I., Richard G., Tabbagh A., y Bruand A. 2003.** Electrical Resistivity Imaging for Detecting Soil Cracking at the Centimetric Scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:1319–1326.
- Sanchez M. C. y Arrigo N. 2006.** Modificación del carbono orgánico del suelo por efecto del uso agrícola en un Entisol de Santiago del Estero (Tesis de maestría). Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina
- Sanzano G., Agustín, C., Hernández, M., Morandini, F., Sosa, H., Rojas Quinteros, C., Sotomayor y Romero J. 2012.** Evaluación de la compactación de suelos en siembra directa en la Llanura Chacopampeana de la provincia de Tucumán, R. Argentina. *Revista Ciencia del suelo*. Tucumán vol.89 no.1
- Sasal, M. C., Andriulo, A. E, Taboada, M. A., 2006.** Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Till. Res.* 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 & Till. Res.* 108: 24-29.
- Sasal M. C. 2012.** Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua (Doctoral dissertation, Tesis Doctoral. Área Ciencias Agropecuarias. Escuela para Graduados FAUBA).

- Sayago J. M. 1977.** Reconocimiento de Suelos en el establecimiento “La María”. Departamento Capital. Provincia Santiago del Estero. Informe técnico. INTA Santiago del Estero. Informe técnico: 1-7.
- Serril D. L., Boccolini M., Oberto R., Chavarria D., Bustos N., Vettorello C., Apezteguia H., Miranda J., Álvarez E. C., Galarza C., Chifalo S., Manrique M., Sueldo R., Belmonte M. C. F., Mattalia L., Cholaky C. y Vargas Gil S. 2018.** Efecto de la agriculturización sobre la calidad biológica del suelo. Revista Cienc. Del Suelo (Argentina) 36 (2): 92-104, 2018
- Shaver T.M., Peterson G.A. y Sherrod L.A. 2003.** Cropping intensification in dryland systems improves soil physical properties: regression relations. *Geoderma* 116:149-164.
- Sherrod L.A., Peterson G.A., Westfall D.G. y Ahuja L.R. 2003.** Cropping intensity enhances soil organic carbon and nitrogen in a no-till agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1533-1543.
- Silberman J. E., Anriquez A. L., Domínguez Núñez J. A., Kunst C. G., y Albanesi A. S. 2015.** La cobertura arbórea en un sistema silvopastoril de Chaco y su contribución diferencial al suelo. *Ciencia del Suelo* 33: 19-29.
- Silva Rossi M. 2004.** Evaluación de la Estabilidad Estructural en Superficie, A través de las Propiedades Hidráulicas. Pp. 121-130. En: Filgueira, R., Micucci, F. (eds.). *Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría*. Editorial Edulp.
- Six J., Callewaert P., Lenders S., Gregorich y Paustian K. 2002 a.** Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1981-1987.
- Six J., Feller C., Deneb K., Ogle S., Moraes J., y Albrecht A. 2002 b.** Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no tillage. *Agron. J.* 22: 755-775.
- 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, 7-31.
- Six, J y Paustian K. 2014.** Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry* 68, A4-A9.
- Slepetiene A. y J. Slepetys. 2005.** Status of humus in soil under longterm tillage systems. *Geoderma* 127: 207-215.

- Slutzky D. 2003** A propósito de Censo Nacional Agropecuario 2002. Realidad Económica N° 196: 76-83, IADE, Buenos Aires.
- Soane B. D. 1990.** The role of organic matter in soil compaction: A review of some practical aspects. Soil Till. Res. 16: 179-201. Soil Sci. Soc. Am. J. 73:1519-1529.
- 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 Till. Res. 109, 18–22.
- Steinbach H., y Alvarez, R. 2005.** Cambios en los contenidos de carbono de los suelos pampeanos por introducción de la siembra directa. Informaciones Agronómicas, 25, 16-23.
- Stengel P. y Bourlet, M. 1987.** Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage: effet de l'humectation. Pp. 95-110 en Monnier, G. y Goss, M.J. (eds) Soil compaction and Regeneration, Balkema, Rotterdam, Boston.
- Stengel P., Douglas, J.T., Guerif, J., Goss, M.J., Monnier, G. y Cannel, R.Q. 1984.** Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. Soil Till. Res., 4: 35-53.
- Stevenson F. 1986.** Cycles of Soil. Wiley y Sons, Inc. New York. EEUU. 380 pp.
- Stockmann M. A., Adams U., Crawford J. W., Field D. J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A. B., Courcelles V., Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D. A., Baldock J., Bird M., Brookes P. C., Chenu C., Jastrow J. D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A. G., Parton W. J., Whitehead D., Zimmermann M. 2013.** The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. Agriculture, Ecosystems and Environment 164: 80-99.
- Strudley M. W., T. R. Green J. C. y Ascough II. 2008.** Tillage effect on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. Soil Till. Res. 99: 4-48.
- Studdert G. A., Domingo M., Garcia G. V., Monterubbianesi M. G. y Domínguez G. F., Zagame M. C. 2017.** Carbono orgánico del suelo bajo sistemas de cultivo contrastantes y su relación con la capacidad de proveer nitrógeno. Ciencias del Suelo (Argentina) 35(2): 285-299,
- Studdert G. A., Domínguez G. F., Zagame M. C. y Carabaca J. C. 2015.** Variación estacional de carbono orgánico particulado y nitrógeno. Ciencia del Suelo (Argentina) 33: 65-78.

- Sullivan L. A. 1990.** Soil organic matter, air encapsulation and waterstable aggregation. *Journal of Soil Science*, 41: 529-534.
- Suwardji P y Eberbach P. L. 1998.** Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf Red Kandosol after 16 years of direct drilling or conventional cultivation. *Soil Till. Res.* 49: 65-77.
- Taboada M. A., Cosentino D. J., Micucci F. G. y 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: 57-63.
- Taboada M. A., Barbosa O., Rodríguez M. y Cosentino D. 2004.** Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233-244.
- Taboada M. A.; Alvarez, C. R. 2008.** Fertilidad física de los suelos. 2da Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires
- Taboada-Castro M. M., Rodríguez-Blanco M. L., Taboada-Castro M. T. y Oropeza-Mota J. L. 2011.** Vulnerabilidad estructural en suelos de textura gruesa bajo cultivo y huerta. *Terra Latinoamericana*. 29: 11–21.
- Tan Z., Lal R., Owens L., y Izaurralde R.C. 2007.** Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil Till. Res.* 92: 53-59.
- Tardieu F. 1984.** Influence du profil cultural sur l'enracinement du maïs. Thèse. DDI,INA-PG. Paris.
- Tejedor M. T., Galizzi F. A., y Sánchez M. C., 2015.** Efecto de prácticas de manejo sustentable sobre propiedades químicas y biológicas de un suelo. X Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA Salta, 21 y 22 de Mayo de 2015. Marianella de Paul Camacho y Selva del valle Guanuco (Eds.).
- Tisdall J. M. y Oades J. M. 1982.** Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Tissera E. M. J. 2016.** Rotaciones de cultivo en siembra directa: efectos en las fracciones de carbón del suelo. Trabajo final de intensificación para acceder al título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía y Agroindustrias. Universidad Nacional de Santiago del Estero. 71 páginas.

- Topp G.C., Wires K. C., Angers D.A., Carter M. R., Culley J. L. B., Holmstrom, D. A., Kay B. D., Lafond G. P., Langille D. R., McBride R.A., Patterson G.T. Perfect E., Rasiah V., Rodd A. V. y Webb K. T. 2002.** Changes in Soil Structure. <http://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/.html>
- Torrán E. A. 2007.** Impacto de las plantaciones de *Eucalyptus grandis* sobre el contenido de humedad del suelo. Análisis de un caso en el Noreste de la Provincia de Entre Ríos. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Concepción del Uruguay.
- Torres P. A., Abril A. B. y Bucher E. H. 2005.** Microbial succession in litter decomposition in the semi-arid Chaco woodland. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 49-54.
- Trumbore S. E. 1993.** Comparison of carbon dynamics in tropical and temperate soils using radiocarbon measurements. *Global Biogeochem. Cycles* 7: 275-290.
- Vallejos M., Volante J., Mosciaro M., Vale L. y Paruelo J. 2015.** Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco eco-region: A plot level geo-database from 1976 to 2012. *Journal of Arid Environments* 123: 3-11.
- Van Veen, J. A. y Kuikman, P.J. 1990.** Aspectos estructurales del suelo de la descomposición de materia orgánica por microorganismos. *Biogeoquímica*, 11 (3), 213-233.
- Varela, M. F., Fernández P. L., Alvarez C., Scianca C. y Rubio G. 2010.** Propiedades físicas que varían por la incorporación de cultivos de cobertura en Hapludoles franco arenosos. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario.
- Vázquez M. 2008.** Incidencia de la vegetación sobre aspectos cuantitativos y cualitativos de la materia orgánica del suelo. En: Galantini, J. A. "Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina", Edición literaria. 1ª ed. Bahía Blanca, Universidad Nacional del Sur, Ediuns, 2008. 309 p.
- Vázquez M., Berasategui L., Chamorro E., Taquin, L., y Barberis L. 1990.** Evolución de la estabilidad estructural y diferentes propiedades químicas según el uso de los suelos en tres áreas de la pradera pampeana. *Ciencia del Suelo* 8: 203-210.
- Venialgo C., Ingaramo O., Ibaló S., Roldán M. F., Banzhaf G. y Gutiérrez, N. 2004.** Índice de Cono, humedad presente y densidad aparente en diferentes labranzas y rotaciones. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2004. A-076.

- Villareal 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 en Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Argentina.
- Volante J. N., Paruelo J. M., Poclava M. M., y Vale L. 2009.** Dinamica espacial y temporal de la deforestación en la región Chaqueña del Noroeste Argentino en el periodo 1977–2007. XIII Congreso Forestal Mundial.
- Voorhees W. B. 1983.** Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:129–133.
- Walkley A. y Black I. A. 1934.** An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29–38.
- Wickings K., Grandy A. S., Reed S. C., y Cleveland, C. C. 2012.** The origin of litter chemical complexity during decomposition. *Ecology letters*, 15(10), 1180-1188.
- Wilson M., Peparotti O., Paz González A. y Díaz Ucha E. 2006.** Ecuaciones de ajuste entre la resistencia a la penetración y el contenido hídrico de un lote en siembra directa. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. I Reunión de Suelos de la Región Andina Salta-Jujuy. Septiembre (2006). Resúmenes: página 108. Resumen Expandido en un CD 5 Páginas.
- Wilson M., Oszust J., Sasal M. C. y Paz González A. 2010.** Variación espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con estados estructurales del suelo bajo distintas secuencias de cultivos. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Santa Fe, Argentina. 31 de mayo al 4 de junio.
- Wood C. W., Westfall D. G. y Peterson G. A. 1991.** Soil carbon and nitrogen changes on initiation of no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:470-476
- Wright S. F., Green V. S. y Cavigelli M. A. 2007.** Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. *Soil Till. Res.* 94: 546-549.
- Wright S. F., Starr J. L. y Paltineanu I. C. 1999.** Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1825-1829.
- Wright A. y F. Hons. 2005.** Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Sci. Soc. Am. Journal* 69: 141-147.

Zanettini, J., Díaz-Zorita, M. Barraco, M. y Buschiazso, D. E. 2014. Cambios en un Hapludol Tipico luego de diez años de labranza cero. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo.