



FACULTAD DE AGRONOMÍA
Universidad Nacional de La Pampa

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA
ESCUELA PARA GRADUADOS – FACULTAD DE AGRONOMÍA
(Maestría en Producción Agropecuaria en Regiones Semiáridas)**

**IMPACTO DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA SOBRE PROPIEDADES
EDÁFICAS EN SECUENCIAS SOJA-SOJA EN HAPLUDOLES DEL OESTE DE LA
REGIÓN PAMPEANA**

Tesista

Ing. Agr. Sergio Néstor Rillo

Trabajo de Tesis para optar al Título de
MAGISTER EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA EN REGIONES SEMIÁRIDAS
FACULTAD DE AGRONOMÍA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Santa Rosa, La Pampa, Argentina

Julio de 2022

**IMPACTO DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA SOBRE PROPIEDADES
EDÁFICAS EN SECUENCIAS SOJA-SOJA EN HAPLUDOLES DEL OESTE DE LA
REGIÓN PAMPEANA**

Tesista

Ing. Agr. Sergio Néstor Rillo

Director

Ing. Agr. M. Sc. Dr. Cristian Álvarez
(UE y DT Gral. Pico INTA Anguil)

Co-director

Ing. Agr. M. Sc. Dr. Alberto Quiroga
(INTA Anguil-Fac. Agronomía, UNLPam)

Consejeros

Ing. Agr. Dr. Elke Noellemeyer
(Fac. Agronomía, UNLPam)

Ing. Agr. M. Sc Dr. Martin Diaz Zorita
(Fac. Agronomía, UNLPam)

Integrantes del Comité de Tesis (*)

Ing. Agr. (MSc., Dr.) Gonzalo Berhongaray

Ing. Agr. (MSc.) Cristian R. Cazorla

Ing. Agr. (MSc., Dra.) Romina Fernández

(*) Por orden alfabético



FACULTAD DE AGRONOMÍA
Universidad Nacional de La Pampa

**IMPACTO DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA SOBRE PROPIEDADES
EDÁFICAS EN SECUENCIAS SOJA-SOJA EN HAPLUDOLES DEL OESTE DE LA
REGIÓN PAMPEANA**

Tesista

Ing. Agr. Sergio Néstor Rillo

Aprobado por:

.....

Nombre y títulos

.....

Nombre y títulos

.....

Nombre y títulos

Prefacio

Esta tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de *Magister en Producción Agropecuaria en Regiones Semiáridas en la Escuela para graduados de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de la Pampa.*

La misma no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otras. El presente documento contiene los resultados obtenidos de investigaciones llevadas a cabo desde el año 2005 al 2015, inclusive, en la Escuela de agricultura y veterinaria L.M. y M.L. Inchausti - En el cuartel de Valdés, partido de 25 de Mayo (B.A) - Las determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos de la EEA INTA Pergamino Y Anguil. La dirección estuvo a cargo de Cristian Álvarez (Ing. Agr. M. Sc. Dr.UE y DT Gral. Pico e INTA Anguil); la co-dirección de Alberto Quiroga (Ing. Agr. M. Sc. Dr. INTA Anguil - Fac. Agronomía, UNLPam) y los Consejeros Ing. Agr. Dr. Elke Noellemeyer e Ing. Agr. M. Sc Dr. Martin Diaz Zorita (Fac. Agronomía, UNLPam).

Sergio Rillo 2022

"hay una hora de la tarde en que la llanura está por decir algo; nunca lo dice o tal vez lo dice infinitamente y no lo entendemos, o lo entendemos pero es intraducible como una música..."

J .L. Borges (El fin, en Ficciones.1944)

Dedicatoria: A mi hija Trinidad de María Rillo Rama

En recuerdo de: Mariana, Ana y Ciriaco.

Agradecimientos.

A Cristian Álvarez, director, quien, desde el primer momento, apoyó intelectual y humanamente todo el proceso.

A Alberto Quiroga, Co-director quién sostuvo y mantuvo siempre la luz y la templanza y me enseñó que los procesos deben madurar como los frutos bajo el sol, con la suave briza del tiempo. Además, por su vocación para transmitir, generosamente, el camino del conocimiento.

A Elke Noellemeyer, por sus precisos aportes intelectuales y noble confianza.

Al Ing. Agr. M. Sc Dr. Martin Díaz Zorita por sus aportes y consejos valiosos.

Al grupo de suelos de INTA Anguil por el acompañamiento durante el trabajo.

A todos los profesores de los cursos en la Maestría.

A todos los alumnos y compañeros que transitamos los cursos, en un ambiente de armonía y compañerismo sin igual.

Al Ing. Carlos Scianca (asesor privado), por el análisis de probabilidad de precipitaciones

A Eric. Scherger, Isabel Gigli, Francisco Babinec y Valeria Belmonte

A Silvia Gatica y al grupo de secretarias de la Escuela de Post grado.

Grupo Escuela LM y ML. Inchausti: Ricardo Cabassi y Héctor Pérez (Ex directores); Rubén Giovannini, (director presente); Mariano Mazzei, Zacarías, Nicora (Ing. Agrónomos); Walter Didier y Matías Rossi, del sector agricultura

Grupo Cooperativa agrícola ganadera de Dudignac Ltda.: A Miguel Amengual (ex Gerente); Martín, Longarini (Gerente actual); Ing. Agrónoma Susana Amengual y José Laporta (sector semillas)

He sido bendecido, me han acompañado muchas personas.

A todos; mi inconmensurable y eterno agradecimiento, sin vuestra colaboración e infinito afecto, este trabajo no hubiere sido posible.

Sergio Rillo 2022

ÍNDICE CONTENIDO

RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
2.1. Descripción del ambiente de trabajo	9
2.2. Tratamientos.....	11
2.3. Labores culturales	13
2.4. Evaluaciones.....	13
2.4.1. Precipitaciones, probabilidades de ocurrencia y profundidad hasta el nivel freático.....	13
2.4.2. Producción de materia seca de los cultivos de cobertura.....	14
2.4.3. Humedad edáfica, consumo de agua y costo hídrico de los cultivos de cobertura	14
2.4.4. Eficiencia de uso del agua	14
2.4.5. Eficiencia de barbecho	14
2.4.6. Nitrógeno en la materia seca aérea.....	15
2.4.7. Biomasa residual de los cultivos de cobertura.....	15
2.5. Efectos de los cultivos de cobertura sobre las propiedades edáficas	16
2.5.1. En el suelo al inicio y al final del estudio	16
2.5.2. Carbono orgánico total y carbono orgánico particulado.....	16
2.5.3. Infiltración.....	16
2.5.4. Tamaño de agregados y estabilidad estructural.....	19
2.5.5. Densidad aparente, porosidad total y porosidad de aireación.....	21
2.5.6. Resistencia mecánica a la penetración.....	21
2.6. Rendimiento del cultivo de soja	23
2.7. Efectos de los cultivos de cobertura sobre el desarrollo de las malezas...	23
2.8. Análisis estadístico.....	23
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
3.1. Disponibilidad hídrica.....	24
3.2. Producción de materia seca, uso y eficiencia de uso del agua en los cultivos de cobertura	26
3.3. Contenido de agua útil al final de los cultivos de cobertura y a la siembra del cultivo de soja	33
3.4. Eficiencia de barbechos.....	38

3.5.	Efectos de los CC sobre el carbono orgánico total y carbono orgánico particulado.....	42
3.6.	Efectos de los CC sobre la infiltración.....	46
3.7.	Efectos de los CC sobre tamaño de agregados y estabilidad.....	49
3.8.	Efectos de los CC sobre la densidad aparente	51
3.9.	Efecto de los CC sobre la resistencia mecánica a la penetración.....	58
3.10.	Rendimiento del cultivo de soja	61
3.11.	Eficiencia promedio en el uso del agua durante el período de estudio...	63
3.12.	Nitrógeno en la biomasa aérea de cultivos de cobertura.....	65
3.13.	Efecto de los cultivos de cobertura sobre el desarrollo de malezas.....	67
4.	CONCLUSIONES.....	72
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	75
6.	Anexo (Tabla de contenido de COT a masa equivalente y fotos).....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Rendimiento de materia seca (MS), uso consuntivo (UC) y eficiencia de uso del agua (EUA) por año	28
Tabla 2.	Contenido de agua útil al final de los CC y agua útil a la siembra de soja.....	35
Tabla 3.	Eficiencia de Barbecho de los tratamientos	41
Tabla 4.	Índice de inestabilidad estructural para 0-10 y 10-20 cm de suelo.....	51
Tabla 5.	Valores medios de (DA), (PT), (PA).....	52
Tabla 6.	Valores de resistencia mecánica a la penetración.....	59
Tabla 7.	Coeficiente de determinación R^2 (relaciones entre RMP y materia seca).....	59
Tabla 8.	Rendimiento del cultivo de soja, UC y EUA	62
Tabla 9.	EUA por año y promedio, del T y con cultivos de cobertura.....	64
Tabla 10.	Concentración de nitrógeno en la biomasa.....	66
Tabla 11.	Herbicidas utilizados en barbecho, pre siembra y en el cultivo de soja en el período 2005-2015.....	71
Tabla 12.	Contenido de COT referido a masa de suelo equivalente.....	89

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Precipitaciones mensuales promedios y 1961-2005.....	25
Figura 2. Probabilidad de ocurrencia de precipitación durante el ciclo de los cultivos de cobertura y soja	25
Figura 3. Usos consuntivos (UC) y costo hídrico (CH) de cultivos de cobertura de avena y rye grass.....	27
Figura 4. Costo hídrico de la inclusión de los cultivos de cobertura de avena y rye grass en función de la biomasa aérea acumulada.....	30
Figura 5. Precipitaciones en el ciclo de los cultivos de cobertura , y profundidad de la napa correspondientes al período 2005/2015.....	30
Figura 6. Porcentaje de materia seca remanente y avena y rye grass.....	32
Figura 7. Perfiles de humedad al final de los CC con menores precipitaciones Año 2009.....	34
Figura 8. Perfiles de humedad al final de los CC con mayores precipitaciones Año 2012.....	34
Figura 9. Perfiles de humedad a la siembra de soja con déficit de recarga hídrica Año 2009.....	37
Figura 10. Perfiles de humedad a la siembra de soja con adecuada recarga hídrica. Año 2012.....	37
Figura 11. Duración de los barbechos y precipitaciones.....	39
Figura 12. Eficiencia de barbechos y precipitaciones.....	39
Figura 13. Carbono orgánico total al inicio de la experiencia y luego de 5 años.....	43
Figura 14. Carbono orgánico total al inicio de la experiencia y al final.....	44
Figura 15. Relación entre COP/COT (%)	46
Figura 16. Infiltración en el 1°, 5° y 11° años.....	48
Figura 17. Proporción de agregados (<2, 2-3, 3-4, 4-8 y >8 mm).....	50
Figura 18. Densidad aparente inicial y al 5° año.....	54
Figura 19. Densidad aparente inicial y al final.....	54
Figura 20. Porosidad total (%) al 1°, 5° y 11° año en T.....	56
Figura 21. Porosidad total (%) al 1°, 5° y 11° años en CC.....	56
Figura 22. Valores de resistencia mecánica a la penetración.....	59
Figura 23. Análisis de componentes principales.....	61
Figura 24. Eficiencias de uso del agua de soja ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) y uso consuntivo..	64
Figura 25. Contenido de N en biomasa aérea (kg N ha^{-1})	66

Figura 26. Eficiencia de uso del agua ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) y contenido de N.....	67
Figura 27. Biomasa y número de malezas.....	68
Figura 28. Número de malezas de Rama negra y Pensamiento silvestre diferencia entre T y CC.....	70

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Localización sitio experimental.....	10
Foto 2. Perfil de suelo Hapludol éntico, serie Norumbega.....	10
Foto 3. Vista de los cultivos de cobertura (avena y rye grass).....	12
Foto 4. Momento de la siembra de soja sobre el cultivo de cobertura.....	12
Foto 5 Vista del permeámetro de disco sobre parcela de rye grass.....	18
Foto 6. Distribución de agregados en función de sus diámetros.....	20
Foto 7. Detalle del equipo utilizado para el tamizado en húmedo de los Agregados	20
Foto 8. Penetrómetro electrónico sobre parcela del tratamiento testigo.....	22
Foto 9. Vista del perfil del suelo de avena y testigo al momento de secado de los cultivos de cobertura.....	48
Foto 10. Agregación del suelo bajo pastura perenne de gramínea por más de 20 años, con porosidad total que supera el 60%. Serie de suelo Norumbega.....	57
Foto 11. Fotos sobre distintos aspectos del proceso de estudio.....	89

RESUMEN

En la Región Pampeana los sistemas agrícolas han incrementado su participación en el uso de la tierra respecto a los ganaderos. En la campaña 17/18 el 50 % de la superficie agrícola presentó alta proporción con soja en las secuencias de cultivos (Subsecretaría de agroindustria). La preponderancia de este cultivo, en los sistemas productivos también prolonga el tiempo que los lotes quedan sin cobertura entre el lapso de dos secuencias de siembra. Una manera de mitigar la disminución del aporte de residuos ya sea en forma de rastrojo o proveniente de raíces podría ser a través de la incorporación de especies gramíneas de crecimiento invernal. Es por ello que este trabajo de tesis tiene por objetivo evaluar la eficiencia de producción de biomasa aérea de avena (A) y rye grass (R) utilizados como CC, sobre algunas propiedades del suelo, determinando cambios temporales de las variables físicas y el carbono del suelo, y las consecuencias sobre el rendimiento de soja, la dinámica de uso ($UC \text{ mm ha}^{-1}$) y eficiencia del agua ($EUA \text{ kg mm ha}^{-1}$) sobre un suelo Hapludol éntico del Centro oeste de la provincia de Buenos Aires. Los resultados presentados tienen efecto acumulados de 11° campañas agrícolas en una secuencia con alta frecuencia de soja/soja e intervención con soja/CC/soja. Al evaluar la eficiencia de uso de agua y producción de materia seca de los cultivos se observaron diferencias significativas entre especies de CC y T con diferencias de aportes de biomasa invernales de $8000 \text{ kg Ms ha}^{-1}$ por parte de los CC. Estos aportes marcaron efectos positivos y significativos en el COT y COP en % tratamiento T. En promedio, A y R presentaron un incremento del 15 y del 50% de $Mg \text{ C ha}^{-1}$, en el COT y COP. Además, se observó una fuerte estratificación en la relación de COT y COP en todos los tratamientos de mayor magnitud en los primeros 5 cm en los tratamientos con CC. Estos cambios en CO se correlacionaron con una mayor infiltración en todas las campañas evaluadas, y en mayor magnitud en los tratamientos con CC, los cuales presentaron diferencias significativas respecto al testigo del 132%. Además, el CO se relacionó significativamente con la distribución de agregados y la estabilidad estructural. Siendo mayor la estabilidad de agregados en los tratamientos con CC. Los rendimientos de soja no variaron por la incorporación de CC respecto a la situación testigo, pero si las coberturas afectaron en un 100% la presencia y biomasa de malezas respecto de la situación testigo. Este tipo de práctica analizada en un periodo de 11° años permitió observar cambios en diferentes propiedades: dinámicas (agua e infiltración, nutrientes, malezas), y medianamente dinámicas como el COT y COP, estructura, porosidad, densidad aparente y resistencia mecánica) en los primeros centímetros del perfil. Se concluye que, en el largo plazo, la inclusión sistemática de CC

en las secuencias agrícolas dominadas por soja son altamente relevantes en suelos con altos contenidos de arena y bajos en arcilla como lo son los Hapludoles énticos, contribuyendo ampliamente a la sustentabilidad de los sistemas agrícolas en el oeste pampeano, con beneficios en las condiciones físicas superficiales y subsuperficial del suelo. Con mayor eficiencia de uso del agua global del sistema y sin costos físicos-económicos negativos para el cultivo principal.

Palabras claves: avena, rye grass, eficiencia de uso de agua, eficiencia de barbecho, infiltración, carbono, estabilidad estructural.

ABSTRACT

In the Pampa Region, agricultural systems have increased their participation in land as compared to livestock production. In the 17/18 growing season, 50% of the agricultural area presented a high proportion of soybeans in the crop sequences. The predominance of this crop in productive systems also extends the time that fields are left without vegetation between two cropping seasons. One way to mitigate the decrease of crop residue input, whether as stubble or roots, could be through the incorporation of winter-growing grass species (cover crops, CC). That is why this thesis intended to evaluate the efficiency of aboveground biomass production of oats (A) and rye grass (R) used as CC, and their effect on soil properties, determining temporal changes of soil physical variables and total and particulate carbon (TOC and POC, respectively), and the effect on soybean yield, water use dynamics (UC mm ha⁻¹), and water use efficiency (EUA kg mm ha⁻¹) on an entic Hapludol soil from the Central West of Buenos Aires province. The results presented have accumulated effect of eleven agricultural seasons in a sequence with high frequency of soybean / soybean (T) and intervention with soybean / CC / soybean (CC). When evaluating the efficiency of water use and dry matter production of the crops, significant differences were observed between CC and T species with differences in winter biomass contributions of 8000 kg dry matter ha⁻¹ by CC. These contributions marked significant effects on TOC and POC in% and mass with respect to treatment T. On average, A and R had an increase of 15 y 50 %, in the COT and COP of Mg C ha⁻¹, in addition to observing a strong stratification in the relationship of TOC and POC in all treatments of greater magnitude in the first 5 cm in treatments with CC. These changes in CO were correlated with a greater infiltration in all the evaluated seasons, and to a greater extent in the CC treatments, which presented an average significant increase compared to the control of 132%. Furthermore, TOC was significantly related to aggregate size distribution and structural stability, which were higher in the treatments with CC. Soybean yields did not vary due to the incorporation of CC compared to the control, but the CC affected the presence and biomass of weeds by 100% with regards to the control situation. This type of practice analyzed in a period of eleven years allowed to observe changes in different dynamic properties (water and infiltration, nutrients, weeds), and moderately dynamic properties such as TOC and POC, structure, porosity, apparent density and mechanical resistance) in the first centimeters of the profile. It is concluded that, in the long term, the systematic inclusion of CC in the

agricultural sequences dominated by soybeans are highly relevant in soils with high content of sand and low in clay such as Entic Hapludolls, widely contributing to the sustainability of the agricultural systems in the western Pampas, with benefits in the surface and subsurface physical conditions of the soil. With greater global water use efficiency of the system and without negative physical-economic cost (soybean yield) for the main crop.

Keywords: cover crop, oats, rye grass, water use efficiency, fallow efficiency, infiltration, carbon, structural stability.

IMPACTO DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA SOBRE PROPIEDADES EDÁFICAS EN SECUENCIAS SOJA-SOJA EN HAPLUDOLES DEL OESTE DE LA REGIÓN PAMPEANA

1. INTRODUCCIÓN

La producción de grano se ha duplicado en los últimos 50 años a partir del desarrollo de maquinaria más eficiente, avances en el mejoramiento genético, aportes de nutrientes por fertilización y un control más eficiente de plagas (Tilman *et al.*, 2002). Este desarrollo de tecnología ha favorecido la simplificación de los sistemas de producción, con una fuerte tendencia hacia la agriculturización y la monocultura (Aguilar *et al.*, 2015; Barzman *et al.*, 2015). En este contexto, el crecimiento de la agricultura en algunas regiones ha implicado una fuerte reducción de la superficie con pasturas perennes (Mignolet *et al.*, 2012; Peyraud *et al.*, 2014).

En Argentina, en las dos últimas décadas, se produjo una simplificación de los sistemas de producción con predominio del monocultivo de soja [*Glycine max* (L) Merrill] Esto trajo como resultado, una disminución de la superficie cultivada con pasturas (Ferrerías *et al.*, 2001). Se comprobó que en general los suelos con régimen de humedad Údico destinados a sistemas mixtos de producción, han evolucionado a secuencias continuas de cultivos anuales con predominancia de soja en la rotación (Díaz-Zorita *et al.*, 2002).

Estos cambios también han tenido lugar en la región pampeana, orientada fundamentalmente a la producción de soja [*Glycine max* (L)], maíz (*Zea mays* L.), trigo, (*Triticum aestivum* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.), la cual ha experimentado profundas transformaciones a partir de la década del noventa. No solo en cuanto a la expansión de la agricultura en detrimento de la superficie con pasturas, sino también a través de un aumento de su productividad debido a un mayor uso de tecnologías (Satorre, 2005; Zaniboni y Landa (2008) comprobaron, en 13 partidos del noroeste de la provincia de Buenos Aires, que un 60% de la superficie potencialmente cultivable se destina al cultivo de soja.

Este esquema productivo podría ocasionar efectos adversos sobre la sostenibilidad de los sistemas debido a que el predominio del cultivo de soja resultaría en menores tasas de secuestro de carbono orgánico (CO) por los escasos aportes de rastrojos y su baja relación C/N respecto al maíz (Bathke y Blake, 1984, Zhu *et al.*, 1989 y Scianca *et al.*, 2013). De esta manera los sistemas de producción con alta frecuencia de soja en la rotación presentan normalmente escasa cobertura de residuos (Cazorla, 2011), que

además se descompone rápidamente (Andriulo *et al.*, 1999). Una de las consecuencias en el corto plazo es la menor eficiencia de uso del agua (Martelloto *et al.*, 2011) mientras que en el largo plazo se mencionan efectos negativos sobre la materia orgánica (Forjan *et al.*, 2006; Cordone y Martínez, 2004) con balances también negativos en los niveles de nitrógeno (N) y fósforo (P) (Studdert y Echeverría, 2000).

Probablemente uno de los grandes desafíos agronómicos actuales es el de encontrar rotaciones de cultivos y sistemas de labranzas que mantengan o aumenten las reservas de carbono del suelo (Andriulo *et al.*, 2008). Si bien en algunas regiones es posible combinar el ciclo del cultivo de soja con el de trigo, el doble cultivo trigo/soja de segunda supone menores rendimientos del cultivo más rentable (Lavado, 2006). Considerando que el éxito y la sustentabilidad de los sistemas agrícolas del oeste de la región pampeana dependen en gran medida de la incorporación de CO a los suelos (Díaz-Zorita *et al.*, 1999 y 2002) y que la proporción del área dedicada al cultivo de soja está en continuo incremento, surge la necesidad de planificar nuevas estrategias de manejo que permitan conservar la calidad del suelo, aun manteniendo el predominio de soja en la rotación (Meriles, 2009, citado por Scianca, 2013).

Varias opciones existen para diversificar los sistemas de producción con la finalidad de hacerlos más sostenibles, tales como utilizar mezclas de variedades, intercalar cultivos, incluir cultivos de cobertura (CC) y diversificar los cultivos de la rotación (Schipanski *et al.*, 2014; Ponisio *et al.*, 2015; Finney *et al.*, 2017). Una opción para mitigar los efectos adversos de las secuencias agrícolas dominadas por soja sería la utilización de las gramíneas de crecimiento invernal como cultivos de cobertura. Los CC se definen como aquellos que se implantan específicamente para mantener el suelo cubierto, protegiéndolo de la erosión, evitando la pérdida de nutrientes por lavado y escurrimiento y, en caso de ser leguminosa, incorporando N al sistema (Reeves y Touchton, 1991; Kuo y Jellum, 2002; Tonitto *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 1991). Se diferencian de una pastura o de un verdeo invernal porque no son de renta directa y se desarrollan dentro de una secuencia continua de cultivos anuales, entre el periodo de cosecha y siembra de los cultivos de verano (Scianca, 2010). La biomasa producida, luego de la suspensión del crecimiento con herbicidas o rolo, queda sobre la superficie brindando protección al suelo impactando directamente sobre variables relacionadas a los procesos de pérdida del suelo y mejorando el balance de CO (Baigorria *et al.*, 2019). Un incremento en el CO del suelo frecuentemente se traduce en una mejora de la estabilidad estructural y reduce la susceptibilidad de los suelos a la erosión (Villamil *et al.*, 2015; Johnson *et al.*, 2016).

Las gramíneas invernales usadas en climas con inviernos templados como avena (*Avena sativa*), rye grass (*Lolium multiflorum*), trigo (*Triticum aestivum*), centeno (*Secale cereale*), entre otras, se adaptan para su utilización como CC. No obstante, la inclusión de CC en la rotación se encuentra agrónomicamente limitado por el periodo que media entre cultivos de renta, por la temperatura invernal y por la disponibilidad de agua durante la estación de crecimiento de estos (Mansoer *et al.*, 1997). El principal problema de esta práctica es el uso del agua debido a que, si no existe recarga del perfil durante el período de barbecho posterior al CC, podría transformarse en una limitante para el cultivo sucesor (Stute y Posner, 1995; Corak *et al.*, 1991). En este sentido Ruffo (2003) sostiene que, la decisión de finalizar el crecimiento de los CC debe adaptarse a dos premisas fundamentales; (i) lograr una acumulación de biomasa que garantice cobertura y aportes de CO y, (ii) ajustarse a las precipitaciones de la región con la finalidad de garantizar la recarga del perfil.

Existen antecedentes respecto al uso de CC en el oeste de la región pampeana (Álvarez *et al.*, 2005, 2008, 2010; Carfagno *et al.*, 2008; Scianca *et al.*, 2008, 2010; Quiroga *et al.*, 1996, 1999; Fernández *et al.*, 2012). Estos trabajos estuvieron orientados principalmente al estudio de la adaptación de distintas especies utilizadas como CC a las condiciones edafo-climáticas de la región en términos de producción de biomasa y a la dinámica del agua en el suelo. Este punto es crítico para los ambientes bajo estudio, debido a que los CC pueden reducir la disponibilidad de agua para el cultivo de cosecha siguiente en la rotación. Sin embargo, debe considerarse que los CC pueden incrementar la tasa de infiltración, reducir el escurrimiento y aportar cobertura al suelo disminuyendo las pérdidas de agua por evaporación, la principal causa de reducción de la eficiencia de uso de las precipitaciones en ambientes semiáridos (Bennie y Hansley, 2000). Fernández *et al.* (2012, 2009 y 2005) determinaron que los CC realizaron un significativo aporte al balance de C en los sistemas agrícolas continuos, mientras que el costo hídrico para los cultivos sucesores fue de 30 a 60 mm. Muller *et al.* (2008) demostraron en suelos vertisoles, que los rastrojos de los CC disminuían las pérdidas de suelo, registrándose en los tratamientos con coberturas de rye grass y avena, menores pérdidas de suelo respecto al testigo sin cobertura, ajustándose a una regresión lineal. Similares resultados fueron presentados en Udoles de la región pampeana por Restovich *et al.* (2010 y 2006).

La captura de CO por los suelos es favorecida por aquellos sistemas de manejo que incorporen grandes cantidades de biomasa al suelo, causen disturbios mínimos, conserven el agua, mejoren la estructura, la actividad y la diversidad biológica del suelo,

y fortalezcan los mecanismos de ciclado de nutrientes. La incorporación de CC es una de las prácticas recomendadas para ello (Frasier *et al.*, 2019; Lal, 2004; Lal *et al.*, 1998; Jarecki y Lal, 2003). No obstante, en la literatura se hallaron resultados contradictorios. Muchos estudios muestran que la utilización de CC ha permitido incrementar los niveles de C de los suelos (Beale *et al.*, 1955; Patrick *et al.*, 1957; Kuo *et al.*, 1997; Nyakatawa *et al.*, 2001; Sainju *et al.*, 2002). Mientras que, en otros estudios, posiblemente condicionados por un menor número de años de efectos acumulados, no se han comprobado incrementos absolutos de CO, pero si una tendencia de incremento (Scianca, 2010). No obstante, Bronick y Lal (2005) reportaron que los CC pueden influir sobre propiedades del suelo a través de distintos mecanismos: (i) incremento de la cobertura superficial, (ii) incorporación de CO y (iii) presencia de sistemas radicales.

De esta manera los CC pueden mejorar las propiedades físicas de los suelos (Ruís y Blanco-Canqui, 2017), comprobándose efectos positivos sobre propiedades tan importantes como la estabilidad estructural (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). Al mejorar la estructura y agregación pueden aumentar la porosidad total y macroporosidad (Villamil *et al.*, 2006) y disminuir parámetros de compactación de los suelos como densidad aparente y resistencia a la penetración (Latif *et al.*, 1992). Este comportamiento estaría dado por la sensibilidad de estos parámetros a pequeños cambios en el CO que reducen la "compactabilidad"; por incremento en la resistencia del suelo a la deformación y/o por incremento en la elasticidad del suelo (Soane, 1990), dando lugar a una menor susceptibilidad de los suelos a la compactación (Díaz-Zorita y Grosso, 2000; Williams y Weil, 2004; Quiroga *et al.*, 1998). Se ha comprobado que los CC pueden reducir el encostramiento superficial, incrementar la tasa de infiltración (Unger y Vigil, 1998) y la retención y la transmisión de agua (aumentos de proporción de poros de almacenamiento) (Villamil *et al.*, 2006). Esto contribuye, en forma general, a incrementos en la fertilidad y en la actividad biológica de los suelos. Por ejemplo, Williams y Weil (2004) observaron en el sureste de los Estados Unidos raíces de soja creciendo a través de canales de raíces en descomposición de CC.

Los Udoles del oeste de la Región Pampeana se caracterizan por sus elevados contenidos de arena (Taboada *et al.*, 1998; Micucci y Taboada, 2006). En consecuencia, el comportamiento físico de estos suelos está determinado en gran medida por su contenido de CO (Díaz-Zorita *et al.*, 2002). Este componente juega un rol clave en la productividad a través de sus efectos positivos en la agregación del suelo, la capacidad de almacenamiento y suministro de agua y nutrientes y la disminución de la susceptibilidad a la compactación (Quiroga *et al.*, 1998; Díaz-Zorita y Grosso, 2000). El

uso de la tierra, el manejo y la textura del suelo son los factores más importantes que controlan los tenores de CO en el oeste de la región pampeana (Díaz-Zorita *et al.*, 2002). Los cambios en el uso de la tierra que tuvieron lugar en el oeste de la RP han impactado fuertemente sobre las propiedades físicas de los suelos (Díaz-Zorita *et al.*, 2002). La utilización de estos suelos con fines exclusivamente agrícolas ha provocado en el mediano plazo disminuciones significativas de CO de los suelos y de porosidad estructural en relación con rotaciones mixtas (cultivos anuales y pasturas perennes), revelado mediante incrementos en densidad aparente, cambios en la distribución de agregados, disminución de la infiltración y de la capacidad de almacenamiento de agua (Noellemeyer *et al.*, 2008). Si bien la adopción de la siembra directa disminuyó las tasas de mineralización contribuyendo a la conservación del CO, son necesarias prácticas que incrementen estos aportes. Esto es importante cuando se consideran sistemas productivos planteados mayormente en base al cultivo de soja, puesto que el mismo aporta al suelo, como se expuso anteriormente, poca cantidad de residuos de rápida mineralización. Es en este contexto que la incorporación de gramíneas de cobertura en los sistemas productivos del oeste de la región pampeana permitiría compensar la rápida descomposición de los residuos de soja, incrementar los niveles de cobertura y de CO y mejorar las propiedades físicas de los suelos. La reducción de la porosidad estructural (compactación) es un proceso recurrente de los suelos arenosos donde los porcentajes de arenas finas o muy finas superan el 30 % de la masa total del suelo (Álvarez *et al.*, 2010). Además, la siembra directa ha conducido, en algunos casos, a la formación de estructuras superficiales masivas (compactación superficial) y de agregados y poros laminares que limitan el ingreso de agua al perfil. En suelos con mayor proporción de arenas, la agregación está ligada a mecanismos bióticos, y por lo tanto, el CO tiene mayor influencia sobre la estructura (Kiem y Kandeler, 1997, Deneff *et al.*, 2002, Bronick y Lal, 2005). La inclusión de CC, principalmente cereales de invierno, durante el largo periodo de barbecho que media entre cultivos de verano podría constituir una alternativa para mejorar la condición física sin necesidad de recurrir a la remoción del suelo (Álvarez *et al.*, 2008, Williams y Weil, 2004, Chen y Weil, 2010). Distintos procesos están involucrados en el efecto de las raíces sobre la porosidad y la estructura del suelo (Six *et al.*, 2004, Ciarlo *et al.*, 2004). En principio, las raíces pueden explorar el suelo a través de los poros estructurales, crear nuevos espacios o mediante el agrandamiento de los poros ya existentes (Passioura, 2002). La generación de nueva porosidad dependería de las características de las raíces, (grado de ramificación, grosor, entrelazamiento y fuerza física), además de la densidad aparente, resistencia a

la penetración y de las condiciones hídricas del suelo, entre otras, (Bronick y Lal, 2005). Las raíces afectan la estabilidad estructural del suelo en forma directa, mediante la liberación de compuestos orgánicos hacia la rizósfera (efecto de adhesión o cementante) e indirecta mediante estimulación microbiana y las hifas de hongos. Otro efecto es el entramado de agregados por parte de las raíces (Tisdall y Oades, 1982; Deneff *et al.*, 2002), como así también de las hifas de hongos micorrícicos, frecuentemente asociados a las mismas, que pueden influir en la agregación del suelo, (Kabir, 2005; Rilling y Mummey, 2006). Además, la estructuración del suelo puede ser promovida también durante la descomposición de raíces muertas (Puget y Drinkwater, 2001; Gale *et al.*, 2000), en este caso, luego del secado de los CC. Las diferentes especies de gramíneas utilizadas en la región (avena, centeno y rye grass) presentan distintas tasas de desarrollo (Scianca *et al.*, 2008). En consecuencia, la cantidad de rastrojo aportado y la calidad de los mismos según las concentraciones de C, N, lignina, celulosa y de otras fracciones bioquímicas varían según las especies utilizadas. Debe considerarse que las distintas especies también generarán distintos niveles de cobertura y de cantidad de raíces que pueden variar en su calidad influenciando de distinta manera, remediaciones naturales, (bioporos) sobre las propiedades físicas (Martens, 2000; Dexter, 1991). En varios modelos conceptuales el incremento en la estabilidad de agregados luego de la adición de compuestos orgánicos al suelo está relacionado a la dinámica de la descomposición del sustrato adicionado (Silenci *et al.*, 1987; Golchin *et al.*, 1994; Chenu *et al.*, 2000; Six *et al.*, 2000a). Por ello, si los aportes de biomasa (aérea y de raíces) de los CC y su descomposición determinan cambios en la estabilidad estructural, puede suponerse que también se afectarán otras propiedades relacionadas. Tal es el caso de la porosidad estructural, encostramiento superficial, infiltración, conductividad hidráulica, susceptibilidad a la compactación y resistencia a la penetración. No obstante, Álvarez *et al.* (2008) comprobaron que si bien la incorporación de triticale como CC (*Triticum aestivum x Secale cereale*) incrementó el contenido de CO del suelo y la infiltración, no se registraron cambios significativos en la estabilidad de agregados de un Hapludol típico de la RP.

En base a lo expuesto existe coincidencia que un bajo aporte de residuos reduce los contenidos de CO del suelo, el cual se ha comprobado que en algunos casos puede ser parcialmente cubierto por la inclusión de CC (Ruís y Blanco-Canqui, 2017). Estos autores destacan que los estudios que evalúan los efectos de los CC sobre propiedades de suelos en sistemas de producción con bajo aporte de residuos son escasos y en general de corta duración. Que se requieren estudios con efectos acumulados por mayor

tiempo para evaluar convenientemente los efectos de los CC sobre propiedades de los suelos. La influencia de los CC sobre el CO del suelo normalmente no es detectada durante los primeros años de inclusión en la rotación. Además, los efectos pueden ser influenciados por varios factores como la textura del suelo, clima y la especie de CC utilizada. El amplio rango observado en la acumulación de CO en el suelo, por inclusión de CC (0 a 3,5 Mg ha⁻¹ año⁻¹), muestra el grado de variabilidad (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). Coincidentemente, distintos autores expresan que aspectos de la dinámica de propiedades físicas en sistemas agrícolas bajo CC han sido poco explorados, tanto a nivel nacional como internacional (Villamil *et al.*, 2006; Restovich *et al.*, 2010). Debe considerarse que, simultáneamente, los CC pueden modificar el balance hídrico del suelo mediante la reducción del escurrimiento y el incremento de las tasas de infiltración.

Considerando todos los antecedentes descriptos, se presentan como hipótesis que:

(i) Las gramíneas invernales utilizados como CC (avena y rye grass) incrementan el carbono orgánico total y particulado en Hapludoles énticos, como consecuencia de un mayor aporte de biomasa, respecto de la monocultura de soja.

(ii) Las gramíneas de invierno incluidos como CC en secuencias continuas de cultivos de soja mejoran, en relación con la monocultura, la captación del agua de las precipitaciones como consecuencia de una mayor infiltración y estabilidad estructural en Udoles franco arenosos.

(iii) Los cultivos de avena y rye grass incluidos como CC en monoculturas de soja contribuyen a mejorar la eficiencia de uso de agua y a reducir la presión de especies vegetales consideradas malezas.

El **objetivo general** fue evaluar los efectos acumulados a través de una experiencia de larga duración de la inclusión de avena y rye grass como CC sobre propiedades edáficas (carbono orgánico, infiltración, estabilidad estructural, densidad aparente, resistencia a la penetración) y presión de malezas en un Hapludol franco arenoso de la región pampeana bajo monocultivo de soja.

Objetivos específicos:

(i) evaluar cambios en los contenidos de carbono orgánico total y particulado por efecto acumulado (11 años) de inclusión de avena y rye grass como CC en Hapludoles del oeste de la región pampeana.

(ii) cuantificar la captación del agua de las precipitaciones, la estabilidad estructural y la resistencia mecánica a la penetración a través de la incorporación de avena y rye grass como de CC en monoculturas de soja sobre un Hapludol franco arenoso de la región pampeana.

(iii) evaluar la eficiencia de barbecho, de uso del agua de los CC y el cultivo de soja y la presión de malezas en planteos de monoculturas de soja con y sin inclusión de CC.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del ambiente de trabajo

El estudio se realizó sobre un ensayo de cultivos de cobertura (CC) en rotación con soja con 11 años de efectos acumulados (efecto sobre las mismas parcelas) que tuvo sus comienzos en el año 2005. El sitio experimental (Foto 1) está ubicado en la Escuela de Ganadería y Agricultura M.C. y M.L. Inchausti - Facultad de Agronomía y Veterinaria – Universidad Nacional de La Plata, (S 35°35'38,0'' - W 60°33'46,5''), en Valdés (partido de 25 de Mayo, provincia de Buenos Aires, Argentina). El ambiente provenía de una historia agrícola de 10 años en soja continua (periodo 1995 a 2005), de los cuales los últimos 4 (2002 a 2005) fueron realizados en siembra directa (SD).

El suelo fue clasificado como Hapludol éntico perteneciente a la serie Norumbega (Foto 2), originado a partir de materiales eólicos arenosos con un perfil profundo, pobremente desarrollado y de textura franca-arenosa (INTA, 1993). El clima es subhúmedo, con una precipitación media anual de 1000 mm (serie histórica 1961 - 2016). Presenta un período con mayores precipitaciones entre los meses primavera-estivales, y un periodo seco que comprende los meses invernales. La temperatura media anual es de 16,4 °C, con un período medio libre de heladas de 240 días. Según la clasificación de Papadakis (1952), la zona tiene un coeficiente de humedad que corresponde al grupo mesofítico húmedo, es decir que las necesidades de agua son casi como las precipitaciones ocurridas, por lo que el valor es aproximado al índice óptimo de 100 establecido por Thornthwaite (1948).

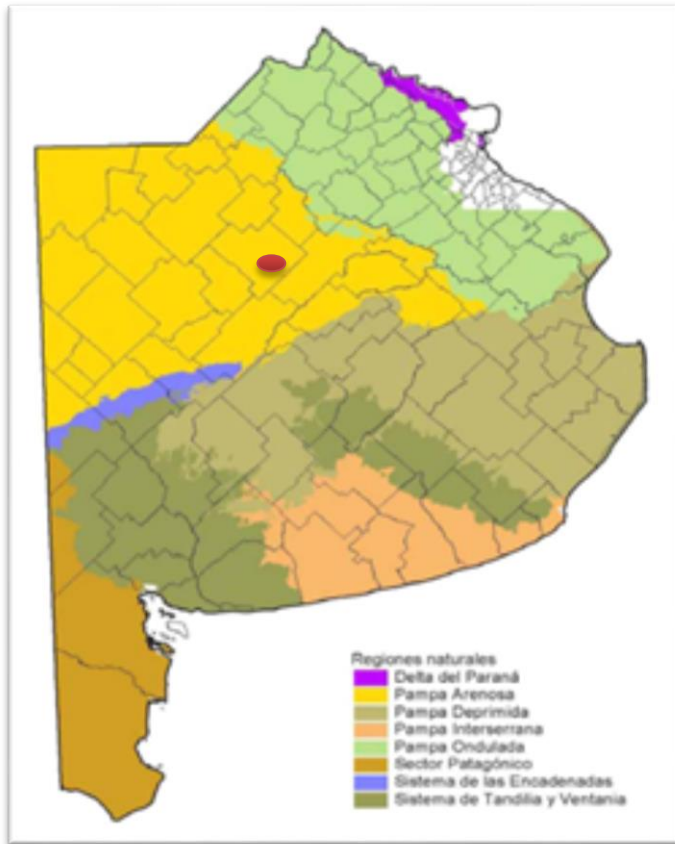


Foto 1. Localización sitio experimental.



Foto 2. Perfil de suelo Hapludol éntico, serie Norumbega.

2.2. Tratamientos

Se evaluaron 3 tratamientos: 2 con cultivo de cobertura 1-avena (CV Calén) (A) y 2-rye grass (CV Barturbo) (R), y un control que permaneció libre de vegetación durante el barbecho largo que media entre cultivos sucesivos de soja (6 a 7 meses). Con la finalidad de conocer la dinámica y población de malezas durante el mencionado barbecho se dejó una parte de la parcela testigo sin aplicación de herbicidas. Los cultivos de cobertura fueron establecidos en SD, en parcelas de 420 m² (14 x 30 m, Foto 3) utilizando sembradora con cuerpos distanciados a 21 cm.

La suspensión del crecimiento de los CC se realizó con herbicidas en emergencia de inflorescencias (Zadoks, 4,49). El mismo presenta un diseño en bloques al azar con tres repeticiones por cada tratamiento y especie utilizada. La siembra de los CC se realizó entre el 15 al 20 de abril de cada año y las fechas de secado entre el 8 al 15 de octubre.

Los cultivos de soja fueron sembrados en SD (Foto 4) con distancia entre hileras de 35 cm, y la fecha de siembra fue entre el 20 y el 30 de noviembre, empleándose la variedad DM 3700 en los años 2005 al 2009 y DM 3810, a partir de la campaña 2009, con una densidad de 48 plantas por m². El lapso entre secado y siembra fue planificado a la espera de precipitaciones que recarguen el perfil del suelo para no impactar sobre el coeficiente de logro a la siembra CC.

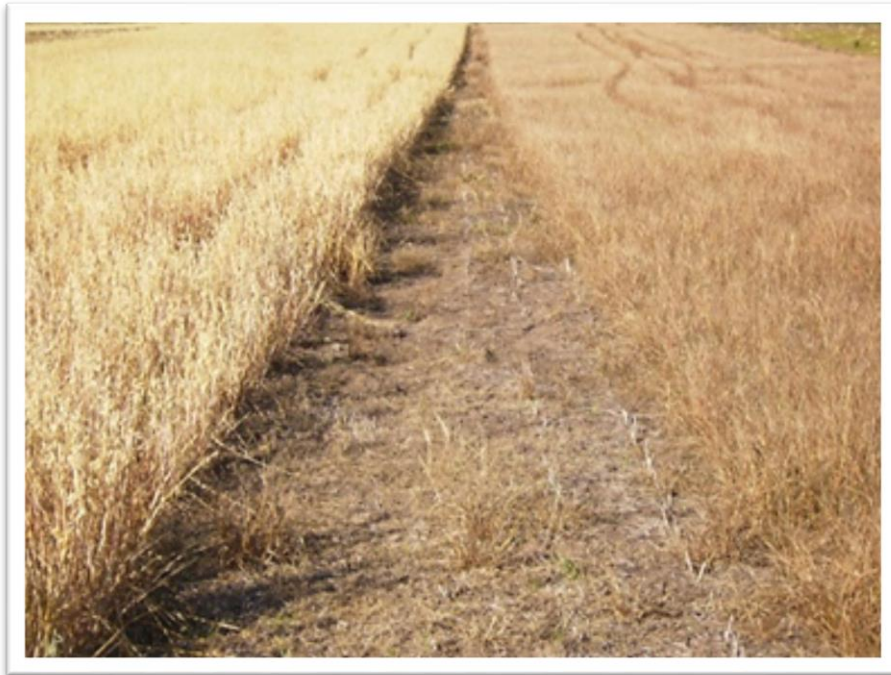


Foto 3. Vista de los cultivos de cobertura (avena y rye grass) al final del periodo de barbecho.



Foto 4. Momento de la siembra de soja sobre cultivo de cobertura.

2.3. Labores culturales

En el momento de la siembra de los CC se realizó la aplicación de herbicida Metsulfurón y 2,4-D (éster isobutílico del ácido 2,4 diclorofenoxiacético, 100 % PC) a razón de 0,005 g + 0,300 l ha⁻¹. Para el secado de los CC se aplicaron 3,0 l ha⁻¹ de glifosato (Ácido N- fosfometil glicina, 48 % PC), con el agregado de coadyuvantes. Luego de la siembra de soja se adicionó clorimuron. En el 4 año se empleó además el herbicida Brodal (Difluflencan 50 SC) y en el período del 5° a 11° años se adicionó Spider (Diclosulam 84%), estos herbicidas hubo que agregarlos para controlar malezas que escapaban a los anteriores herbicidas (*Viola Arvensis-viola* y *Conyza bonariensis*-rama negra,). En el estadio de 5 hojas de los cultivos de soja se aplicó 3,0 l ha⁻¹ de glifosato (Ácido N- fosfometil glicina, 48 % PC) con el agregado de coadyuvantes. Todos los años, con el propósito de mantener al cultivo con baja población del complejo de Nezara Viridula (chinchas) y Agrotis malefida, Rachiplusia Nun y Spodoptera frugiperda (orugas defoliadoras) en la fase de inicio de formación de vainas (R₃), se aplicaron preventivamente 600 cc ha⁻¹ de endosulfán (hexacloro-endometileno-biciclohepteno.bis oximetileno sulfito 35 % PC) y 50 cc ha⁻¹ de zetametrina 18% EC. Excepto en las campañas 2005 y 2008, en el estadio de R₃ se aplicó para el control de enfermedades foliares de fin de ciclo, fungicidas; Azoxistrobina y Cyproconazole con coadyuvantes.

2.4. Evaluaciones

2.4.1. Precipitaciones, probabilidades de ocurrencia y profundidad hasta el nivel freático.

Durante el período del estudio, se registraron las precipitaciones y la profundidad del nivel freático a una distancia de aproximadamente 2000 m del sitio experimental. Además, se analizaron las precipitaciones durante los 11° años de experimentación y se compararon los promedios históricos, a partir del promedio de precipitaciones entre 1961 y 2015 (datos estación meteorológica colegio Inchausti). Se realizó un estudio de probabilidad de precipitaciones mensuales (probabilidad del 80 y 50 % de ocurrencia), abarcando las precipitaciones anuales total, y para el periodo de desarrollo de los cultivos de cobertura y de soja (Scianca, 2002), con la finalidad de contrastar las mismas con los usos consuntivos de los CC de invierno, soja y con las eficiencias de barbecho.

2.4.2. Producción de materia seca aérea de los cultivos de cobertura

La producción de biomasa aérea anual (materia seca - MS) de cada CC y de la vegetación del testigo (malezas - *Conyza Bonariensis* y *Viola Arvensis*) se realizó cortando el material vegetal de 1 m² de superficie al ras del suelo, en el momento de secado de los CC. (Realizando cortes compuestos de cuatro submuestras de (1/4 m²) por unidad experimental.

Las muestras frescas luego de pesadas se llevaron a estufa a 65 °C hasta peso constante para obtener la producción de MS por hectárea (kg MS ha⁻¹).

2.4.3. Humedad edáfica, consumo de agua y costo hídrico de los cultivos de cobertura

Los contenidos de agua de los suelos (HG, método gravimétrico) fueron evaluados anualmente en los diferentes tratamientos en el momento de la siembra, al suspender el desarrollo de los CC y al sembrar y cosechar los cultivos de soja. Se tomaron muestras cada 20 cm hasta los 200 cm de profundidad del perfil. Para calcular la lámina de agua, cada estrato evaluado, se multiplicaron los valores de HG por la DA y por el espesor de suelo considerado. El contenido de agua de cada perfil se calculó a partir de la suma de las láminas de cada estrato de suelo evaluado. En cada espesor se determinó la DA la cual varió entre 1,34 y 1,37 g cm⁻³.

Se calculó el uso consuntivo (UC) a partir de las determinaciones del contenido hídrico del perfil en el momento de la siembra más las precipitaciones durante el desarrollo de los cultivos menos el contenido hídrico al momento del secado o de la cosecha. El costo hídrico (CH) de los CC se cuantificó por la diferencia entre los contenidos hídricos del testigo menos el contenido hídrico del suelo en los momentos de secado de los CC y a la siembra de los cultivos de soja.

2.4.4. Eficiencia de uso del agua

La eficiencia de uso de agua (EUA) de los CC se calculó realizando el cociente entre la MS producida y el uso consuntivo (UC) en avena y en rye grass, obteniendo de esta manera la eficiencia de uso del agua en kg MS ha⁻¹ mm⁻¹.

$$EUA = MS (\text{cultivo, kg MS ha}^{-1}) / UC (\text{mm}).$$

2.4.5. Eficiencia de barbecho.

Para determinar la eficiencia de barbecho (EB), la humedad del suelo se determinó gravimétricamente cada año a la siembra del CC, a los diferentes momentos de secado y a la siembra del cultivo sucesor para los intervalos de 0-20 hasta los 200 cm.

La EB se calculó empleando la fórmula de Mathews y Ammy (1960)

$$EB = HF - HI / (pp)^{-1} \times 100$$

Donde HF es la humedad final y HI humedad inicial del perfil y pp precipitaciones registradas en el período de barbecho.

Además, se realizaron análisis de correlación lineal para la variable dependiente EB y variables independientes (días de barbecho, precipitación, en los diferentes cultivos y cobertura del suelo medida por la biomasa aérea producida por los CC).

2.4.6. Nitrógeno en la materia seca aérea

Todos los años se determinó el porcentaje de nitrógeno total (N) (método de Kjeldahl) en la biomasa aérea total y, por cálculo relacionando la producción de MS con la concentración de N, se estimó el total del N captado por cada CC (N kg MS ha⁻¹).

2.4.7. Biomasa residual de los cultivos de cobertura

En el primer año se evaluó la tasa de descomposición y la biomasa residual de la MS aérea de cada CC. En 3 momentos: a los 100, 180 y 277 posteriores al secado, se recolectó una superficie de 1,26 m² de MS remanente de avena y de rye grass. Cada muestra se pesó y luego se llevó a estufa a 65 °C hasta peso constante para la determinación de MS. Relacionando la MS inicial y el tiempo transcurrido se obtuvo la tasa de descomposición media, los datos resultantes se ajustaron con el modelo exponencial negativo propuesto por Álvarez *et al.* (1991):

$$R = R_0 - e^{-kt}$$

Donde R: rastrojo remanente, R₀: rastrojo inicial, k pendiente o proporción del material descompuesto por unidad de tiempo (t).

Además, anualmente, en el momento de la cosecha del cultivo de soja, se recolectaron muestras de material de cada CC en 1 m² de cada parcela se secaron a estufa hasta peso constante y se calculó la materia seca remanente anual.

2.5. Efectos de los cultivos de cobertura sobre las propiedades edáficas

2.5.1. En el suelo al inicio y al final del estudio

En los meses de abril de los años 2005 y 2015, se realizaron muestreos de suelo de los primeros 20cm del perfil (muestra compuesta de 20 submuestras de todos los tratamientos). Sobre estas muestras se realizó análisis de las siguientes propiedades edáficas: N de nitratos Ac. Cromotrópico (West, 1966), fósforo (Bray y Kurtz, 1945), S de sulfatos (extracción con acetato de amonio a pH 5,0 y determinación por turbidimetría

con BaCl_2 , Fontanive *et al.*, 2004), cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónica (CIC) por extracción con acetato de amonio a pH 7 (Hendershot & Lalonde, 2006). La cuantificación de los cationes se realizó mediante titulación con EDTA (Ca y Mg, Suárez, 1996) y fotometría de llama (Na y K, Helmke y Sparks, 1996). También se realizaron determinaciones de zinc, manganeso, cobre, hierro, boro y pH en agua 1:2.5 (método potenciométrico). En 2005 para caracterizar situación inicial y en 2015 para observar su evolución.

2.5.2. Carbono orgánico total y carbono orgánico particulado

Los contenidos de carbono orgánico total (COT) y carbono orgánico particulado (COP) se determinaron en muestras de los espesores de 0 a 20 cm y estratificado en muestras de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm del suelo. En 2005, al inicio del experimento y luego de la cosecha del cultivo de soja se evaluó el COT, determinaciones que se reiteraron a los 5 (2010) y 11 años (2015) de acumular efectos de los distintos tratamientos (testigo, avena y rye grass). Las comparaciones de los contenidos de COT y COP además, se efectuaron considerando la masa de suelo de cada espesor a partir de la DA en cada uno de los tratamientos.

Las determinaciones de COT se realizaron por el método de combustión húmeda (Walkley y Black, 1934), y el COP fue determinado por el método de fraccionamiento granulométrico, considerando el carbono de la fracción de agregados entre 100 - 2000 μm (Cambardella y Elliot, 1982).

2.5.3. Infiltración

La tasa de infiltración básica se evaluó con permeámetro de disco simple, durante los años 2005, 2010 y 2015, coincidiendo con los momentos en que fueron evaluadas las propiedades edáficas. El permeámetro de disco está formado por un cilindro metálico de 21 cm de diámetro y 12 cm de altura y 0,041 cm de espesor y un disco soporte con discos de plástico de un diámetro mayor al cilindro metálico y un reborde (Gil, 2006). Este disco soporte tiene una perforación central que permite la conexión con un recipiente o botella graduada invertida (Foto 5). Este dispositivo se introduce en forma uniforme en el suelo utilizando una placa de acero tal de evitar la formación de grietas. La lámina de agua que infiltró (I) en el suelo en un tiempo (t), es la cantidad de agua que ha entrado en el suelo en ese tiempo, en un área de la sección transversal, correspondiente a la del disco.

La Infiltración parcial (I_n) se calcula a partir de cada una de las lecturas registradas usando la siguiente relación: $I_n = (L_n - L_{n-1}) \cdot f$.

f L_n y L_{n-1} son una lectura y su inmediata anterior en los tiempos t_n y t_{n-1} respectivamente; y f es el factor de calibración del equipo: 0,1292.

La Infiltración acumulada (I_a), es la suma para cada uno de los valores de I_n .

$$I_a = I_n + I_{n+1}$$

La Velocidad de Infiltración (I_v), en un instante determinado será la relación entre la I_p y t_p , (gráfico 1), es decir: $I_v = (L_n - L_{n-1}) \cdot f / (t_n - t_{n-1})$

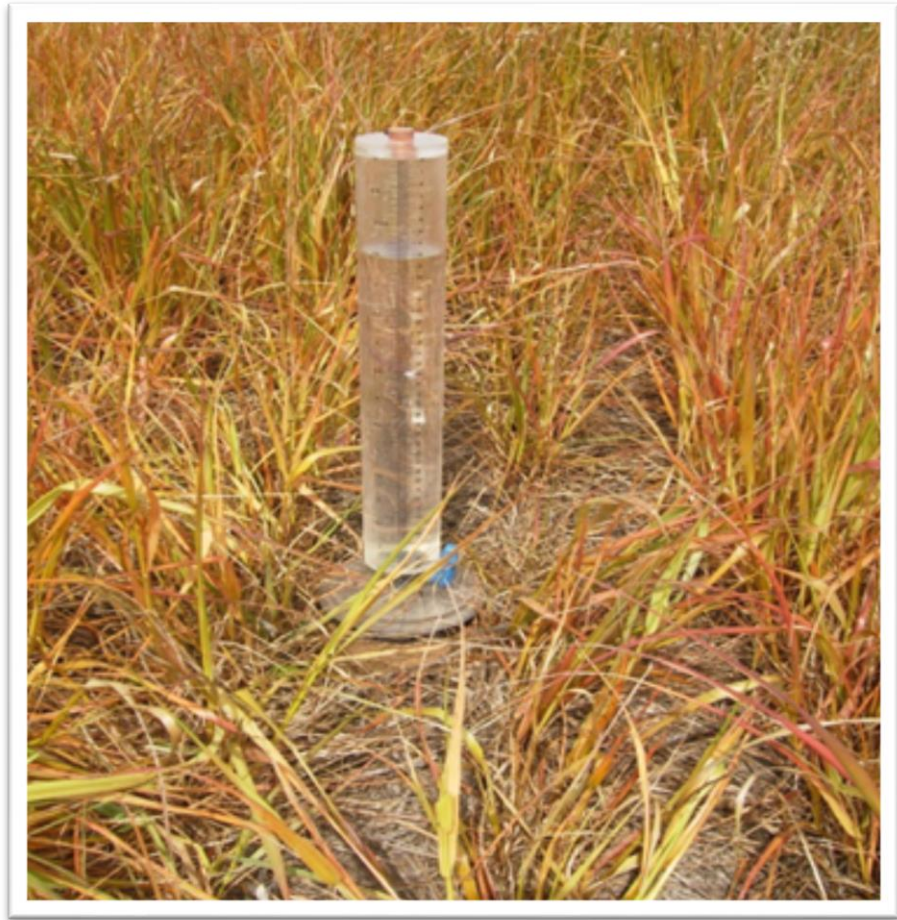


Foto 5. Vista del permeámetro de disco sobre parcela de rye grass.

2.5.4. Tamaño de agregados y estabilidad estructural

El análisis de estabilidad estructural (EE) se realizó en el año 2015, luego de 11 años de efectos acumulados, sobre muestras de 0 a 10 y 10 a 20 cm de profundidad, correspondientes a los tratamientos testigo, CC avena y CC rye grass. Las muestras fueron extraídas después de cosecha de soja, con un contenido de humedad cercano a capacidad de campo. Se realizaron 3 muestreos compuestos cada uno de 3 submuestras. Cada muestra se desmenuzó manualmente en función de los planos de fragilidad de los agregados y se dejaron secar al aire. Luego se tamizaron por mallas de 8, 4, 3 y 2 mm de aberturas, obteniendo agregados menores de 2, entre 2 y 3, 3 y 4, 4 y 8 y mayores a 8 mm de diámetro (Tabla 1, Foto 6). Teniendo en cuenta la proporción de cada fracción de agregado en el total de la muestra de suelo y su diámetro medio se calculó el diámetro medio ponderado en seco (DMPs) y luego de haber sometido los agregados a tamizado en húmedo (DMPH). La diferencia entre ambas determinaciones (DMPH – DMPs) representa la inestabilidad estructural según la metodología propuesta por De Boodt y De Leenheer (1967). Esta técnica utiliza los agregados de 4 a 8; 3 a 4; 2 a 3 mm, determinando el DMPs de cada fracción y de las fracciones en conjunto. Las mismas fracciones de agregados también se tamizaron en húmedo (Foto 7), con humedecimiento previo de los agregados, utilizando aspersor manual y llevando a humedad de capacidad de campo. Luego del tamizado en húmedo y secado en estufa con el peso de estos agregados se calculó el DMPH.



Foto 6. Distribución de agregados en función de sus diámetros en distintas categorías (< 2mm, 2-3, 3-4, 4-8 y > 8mm).



Foto 7. Detalle del equipo utilizado para el tamizado en húmedo de los agregados de acuerdo con la metodología propuesta por De Boodt y De Leenheer (1967).

2.5.5. Densidad aparente, porosidad total y porosidad de aireación

Para realizar estas determinaciones se utilizaron cilindros de acero inoxidable de (300 cm³, Burke *et al.*, 1986) y sobre las mismas muestras se obtuvieron las constantes hídricas de los contenidos de humedad en capacidad de campo (CDC) y en el punto de marchitez permanente (PMP) con 4 repeticiones por profundidad evaluada. Las metodologías empleadas para las determinaciones fueron, olla extractora de presión 0,33 atmosferas y placa extractora de presión a 15 atmosferas para CDC y PMP, respectivamente. Las muestras fueron extraídas de una calicata en espesores de 20 cm hasta los 120 cm de profundidad del suelo. Además, se extrajeron muestras estratificadas en espesores de 5 cm hasta los 20 cm de espesor. Las mismas fueron extraídas en el mes de abril del 2005, 2010 y 2015 en los 3 tratamientos evaluados. Estas fueron enviadas al Laboratorio de Gestión Ambiental de Suelos y Agua de la EEA INTA Pergamino. A partir de la DA, se estimó la porosidad total (PT) y la porosidad de aireación (PA):

$$DA = \text{Peso de masa} / \text{Volumen cilindro}$$

$$PT = 1 - DA (DP)^{-1}$$

$$PA = PT - HV$$

Dónde DP es la densidad de las partículas (2,65 Mg m⁻³), HV es la humedad volumétrica calculada a partir del producto entre la humedad gravimétrica (HG) y la DA.

La DA la cual varió entre 1,34 y 1,37 g cm⁻³. La capacidad de campo que resultó de 28 % en los primeros 20 cm y de 24 % en el resto del perfil, y el PMP que fue de 13 % (0-20cm) y 10% para el resto del perfil.

2.5.6. Resistencia mecánica a la penetración

Resistencia mecánica a la penetración (RMP) fue evaluada en el año 2015 (11 años del estudio) empleando un penetrómetro electrónico (Field Scout, modelo SC 900, Foto 8) registrando cada 2,5 cm de espaciamiento los valores de RMP del suelo hasta los 50 cm de profundidad. Esta medición se realizó en cada unidad experimental (parcela), estableciendo una transecta perpendicular a la línea de siembra, y realizando mediciones en el entre surco después de la cosecha de soja. Al momento de realizar las mediciones de RMP se determinó el contenido gravimétrico de humedad en estratos de 5 cm hasta los 50 cm de profundidad del perfil.



Foto 8. Penetrómetro electrónico sobre parcela del tratamiento testigo.

2.6. Rendimiento del cultivo de soja

La producción de granos de soja se determinó recolectando manualmente las plantas de una superficie de 1,26 m² y su posterior trilla en una máquina estacionaria. Luego de limpiar y zarandear los granos se pesaron y se corrigió su peso a humedad de recibo de comercialización (13,5 % humedad en granos). Además, se evaluaron los componentes de rendimiento de peso y número de granos por unidad de superficie.

2.7. Efectos de los cultivos de cobertura sobre el desarrollo de las malezas

Se evaluó en las parcelas testigos sin aplicación de herbicidas las malezas presentes al final del ciclo de los cultivos de coberturas.

2.8. Análisis estadístico

Los resultados se analizaron por ANVA y la comparación de diferencias de medias (CC de avena y CC de rye grass comparado con el tratamiento testigo) mediante la prueba de diferencias mínimas significativas LSD de Fisher con un nivel de significancia $p \leq 0,05$. Para relacionar contenidos y concentración de COT, de COP, de RMP y de HV con la producción de MS de cada CC y de soja se realizaron análisis de regresión. También se utilizó, para analizar las relaciones entre los niveles de MS de los CC y de soja con las variables agua del suelo, precipitaciones durante el ciclo y profundidad del nivel freático. Se realizó análisis de componentes principales (ACP) de las variables de suelo y biomasa aérea. El estadístico utilizado para todos los análisis fue Infostat (Di Rienzo, 2011).

A través del programa Octave 3.0.1 (2008) y utilizando la función de gama incompleta se calculó la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones. Este programa requiere para su correcto funcionamiento series de datos históricas de por lo menos 30 años, los datos aportados son de registros serie entre 1961 y 2015 de la agencia INTA 9 de julio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Disponibilidad hídrica

De la comparación de los promedio del período en estudio y el de la serie 1961-2015, (Figura 1) se desprendió que las precipitaciones resultaron similares durante el ciclo de los CC (abril-septiembre: 326 y 334 mm), durante el barbecho largo (abril-octubre: 428 y 441 mm) y durante el barbecho corto (septiembre-octubre: 179 y 176 mm). Mientras que, durante el ciclo del cultivo de soja las precipitaciones (517mm) resultaron algo inferiores que el promedio histórico (560 mm).

El análisis preliminar de la precipitación promedio mostró que, la inclusión de CC (abril-septiembre) entre cultivos de verano (noviembre-abril) no implicaría un riesgo importante para la disponibilidad de agua a la siembra del cultivo sucesor. De acuerdo al estudio de probabilidad de ocurrencia de precipitaciones (probabilidad del 80 y 50%), durante el periodo de los cultivos de cobertura (abril-septiembre) y durante el ciclo del cultivo de soja (noviembre-marzo) (Figuras 2 a y b). Se comprende que durante el periodo de desarrollo de los CC (abril a septiembre) las precipitaciones alternarían entre 290 mm (80 %) y 360 mm (50 %) (Figura 2a). Este régimen de precipitaciones resultaría suficiente en el 80% de los años para cubrir los requerimientos de usos consuntivos de los CC, (Scianca, 2010; Carfagno, 2008 y 2013).

Para el ciclo del cultivo de soja las probabilidades de ocurrencia de precipitaciones serían de 570 y de 710 mm, para el 80 y 50 %, respectivamente (Figura 2b). Según Andriani (2000) el cultivo de soja debería disponer de 500 a 550 mm para condiciones de desarrollo hídrico no limitante. De manera similar a lo expuesto durante el ciclo de los CC, la probabilidad que las precipitaciones cubran los requerimientos de agua de soja es superior al 80%. Para los CC y soja; no se ha considerado el contenido de agua útil en el perfil del suelo al momento de la siembra o inicio de cada periodo, que podría resultar clave para cubrir situaciones de una inadecuada distribución de las precipitaciones.

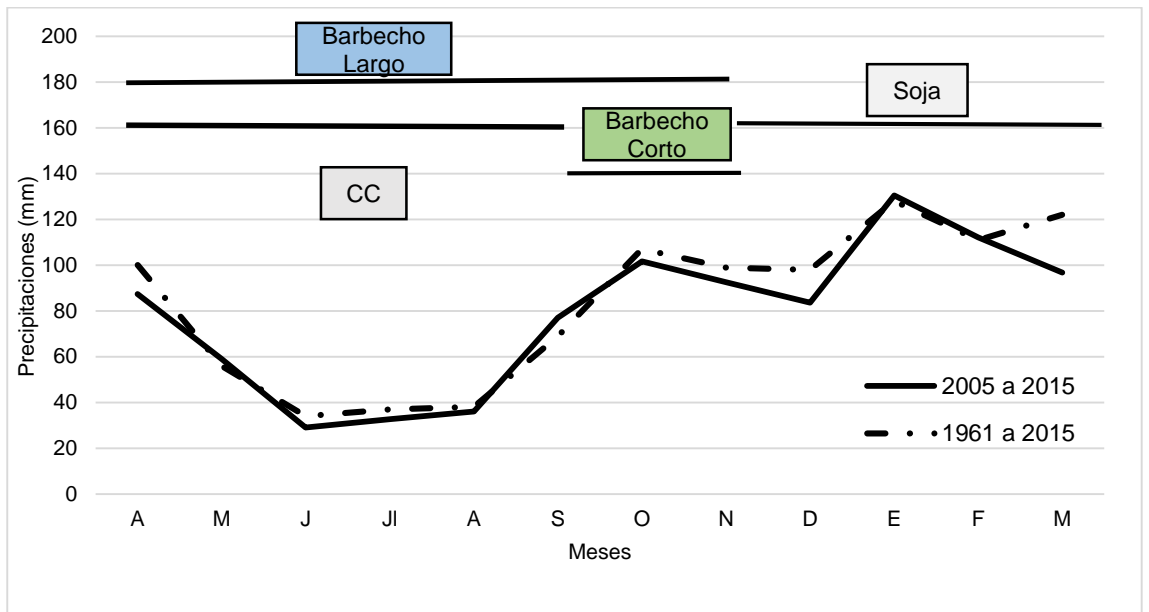
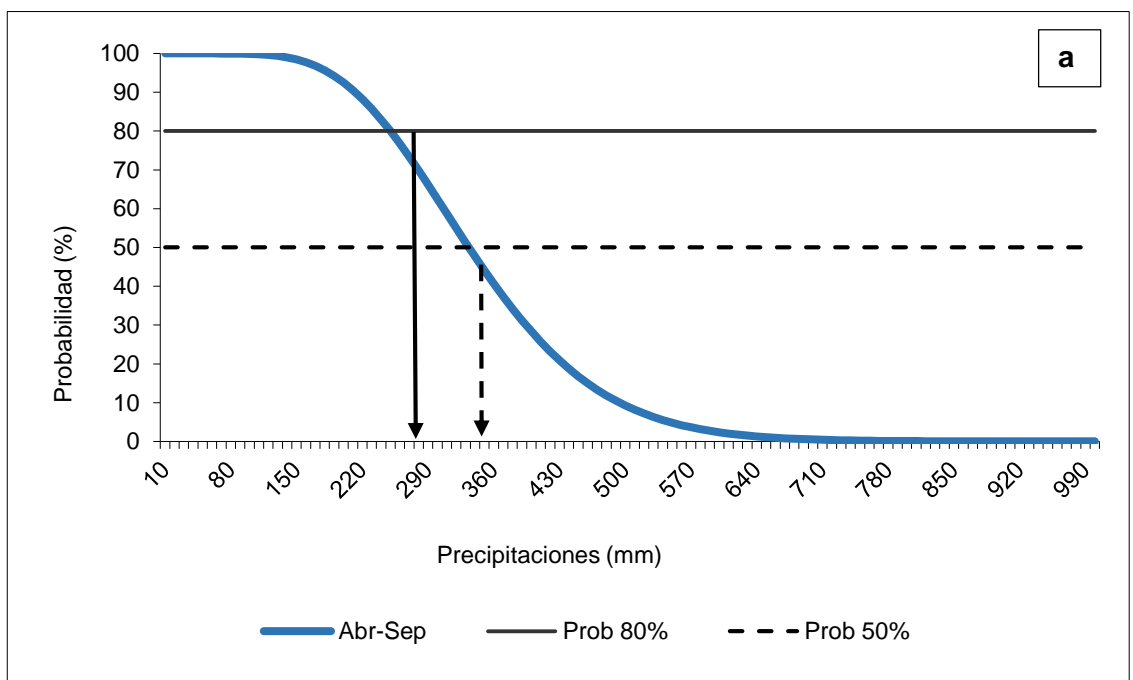


Figura 1. Precipitaciones mensuales promedio (mm) correspondientes a los periodos 2005-2015 y 1961 - 2015.



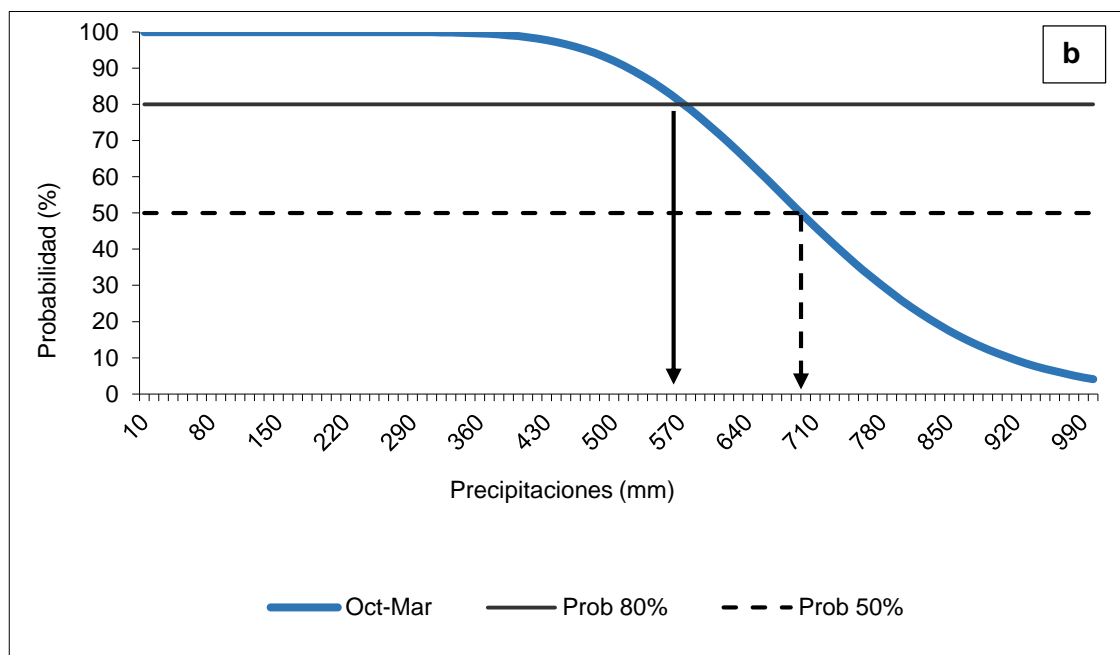


Figura 2. (a) Probabilidad de ocurrencia de precipitación durante el ciclo de los cultivos de cobertura.(b) Probabilidad de ocurrencia de precipitación durante el ciclo del cultivo de soja (1961-2015). Línea entera indica a probabilidad del 80%, línea de guiones probabilidad del 50%.

3.2. Producción de materia seca, uso consuntivo y eficiencia de uso del agua en los cultivo de cobertura

Los usos consuntivos (UC) de los CC resultaron en promedio significativamente menores en A (243 mm) que en R (213 mm) (Figura 3). Por su parte en el tratamiento sin CC la pérdida de agua, durante el mismo periodo, resultó en promedio de 256 mm. Esta pérdida de agua puede tener varios componentes: evaporación (Carfagno *et al.*, 2013 y 2014), infiltración profunda por debajo de la sección control (200 cm) y escurrimiento (Casas *et al.*, 2015; Jobaggy *et al.*, 2010). En base a estos resultados y restando a los usos consuntivos el agua “perdida” en el tratamiento testigo (en barbecho y sin CC), se obtuvo el valor del costo hídrico (CH). El mismo representa el gasto adicional de agua, por la inclusión de CC, en relación con haber mantenido el suelo en barbecho. El CC de R tuvo, en promedio, significativamente mayor CH que A; (43 mm vs. 12 mm).

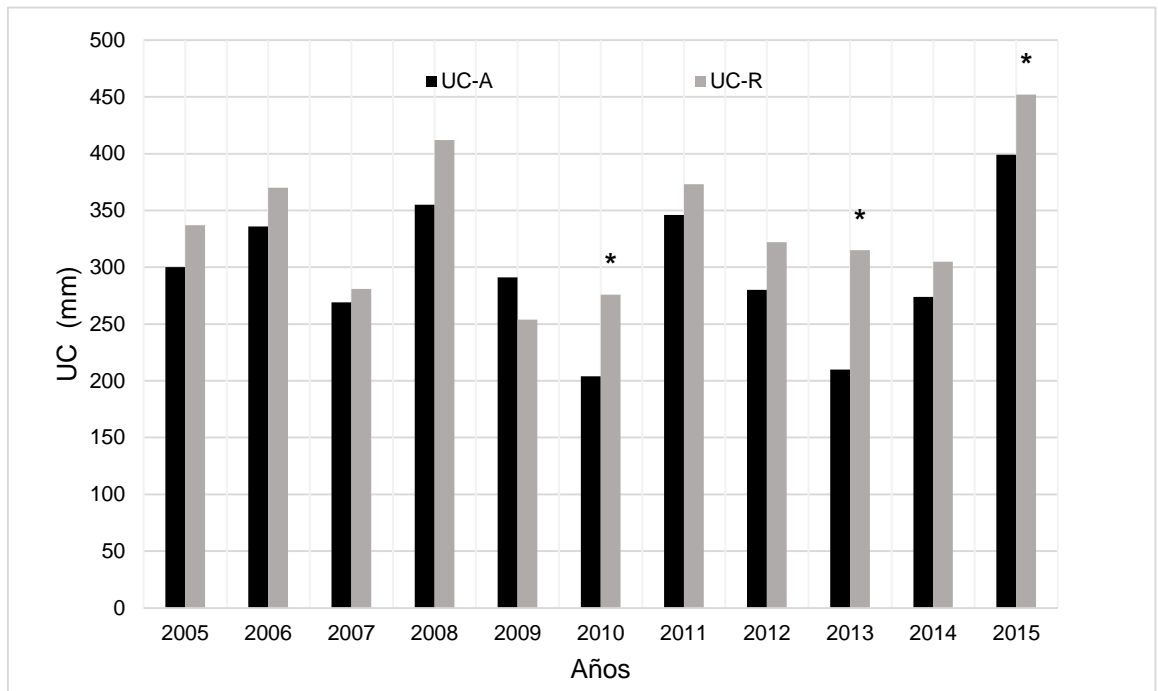


Figura 3. Usos consuntivos (UC) de cultivos de cobertura de avena (A) y rye grass (R) establecidos sobre un Hapludol de la región pampeana. * indican diferencias significativas entre usos consuntivos. ($p \leq 0,05$).

Tabla 1. Rendimiento de materia seca (MS) y eficiencia de uso del agua (EUA) por año. Promedio del periodo 2005 a 2015, del testigo sin CC (T), con CC de avena (A) y de rye grass (R). Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Año	MS (kg ha ⁻¹)			EUA (kg MS ha ⁻¹ mm ⁻¹)		
	T	A	R	T	A	R
2005	1160 c	12777 a	11552 b	5,0 b	43,0 a	34,0 a
2006	2462 b	7575 a	7122 a	7,6 b	22,5 a	22,0 a
2007	542 c	6382 a	4111 b	3,4 c	24,3 a	16,0 b
2008	1699 c	4529 a	3230 b	6,0 b	13,0 a	8,0 b
2009	1116 b	4668 a	3460 a	3,8 c	18,7 a	13,6 b
2010	295 b	4093 a	3219 a	1,3 c	20,4 a	11,5 b
2011	283 b	5411 a	4647 a	1,3 b	15,7 a	12,7 a
2012	1546 c	12516 a	8589 b	6,3 c	46,0 a	27,0 b
2013	1646 c	10063 a	6856 b	7,3 b	50,0 a	22,6 b
2014	1200 c	8493 a	6777 b	3,2 b	34,1 a	22,6 a
2015	861 b	7590 a	8254 a	1,8 b	18,1 a	18,9 a
Promedio 2005 a 2015	1300 c	8969 a	7195 b	4,3 c	27,9 a	18,8 b

Los CC generaron una biomasa promedio de 8969 y 7195 kg MS ha⁻¹ (A y R, respectivamente), variables también en un amplio rango entre años: 4093-12777 y 3219-11552 kg MS ha⁻¹ (A y R, respectivamente). En 6 de los 11 años la biomasa de A fue significativamente mayor a la producida por R.

Los resultados mostraron que el costo hídrico por la inclusión de los CC tiende a ser menor a medida que la biomasa aérea sea mayor (Figura 4). Esta tendencia no se comprobó al considerar solo los primeros 5 años de experimentación. Por ello es importante destacar alguna de las consideraciones realizadas en la introducción, sobre la importancia de los ensayos de larga duración, para que se expresen indicadores de procesos que muestren cambios en el mediano a largo plazo. Es posible que el menor CH a mayor efecto acumulado guarde relación con los efectos de los CC sobre propiedades edáficas relacionadas con la dinámica hídrica, en procesos como la captación (infiltración), distribución y almacenaje del agua (estabilidad estructural, porosidad, cobertura).

Además, A presentó menor uso consuntivo que R y, de la combinación de ambos parámetros, mayor biomasa y menor consumo de agua, A registró significativamente mayor eficiencia en el uso del agua (Tabla 1). Estos resultados coinciden con los reportados por estudios anteriores (Scianca, 2010; Carfagno, 2010 y 2013; Lardone, 2014), donde A tuvo mayor EUA (29 mm) respecto a R (17 mm).

Las precipitaciones durante el ciclo de los CC no fue una variable que pudiese haber condicionado, de manera significativa, la producción de biomasa. Por ejemplo, cuando se compararon periodos con similares precipitaciones se obtuvieron producciones muy distintas: con precipitaciones de 295 mm (2005) se alcanzan biomásas de 12000 kg ha⁻¹, y con 301mm (2010) biomásas de 4000 kg ha⁻¹. La localización del nivel freático podría haber influenciado en mayor grado sobre estas diferencias en producción. En 2005 se localizaba a 1,5 m de profundidad, mientras que en 2010 se encontraba a 3,9 m (Figura 5). Otras explicaciones distribución de precipitaciones, días e intensidad de heladas y las temperaturas medias durante el ciclo de los CC.

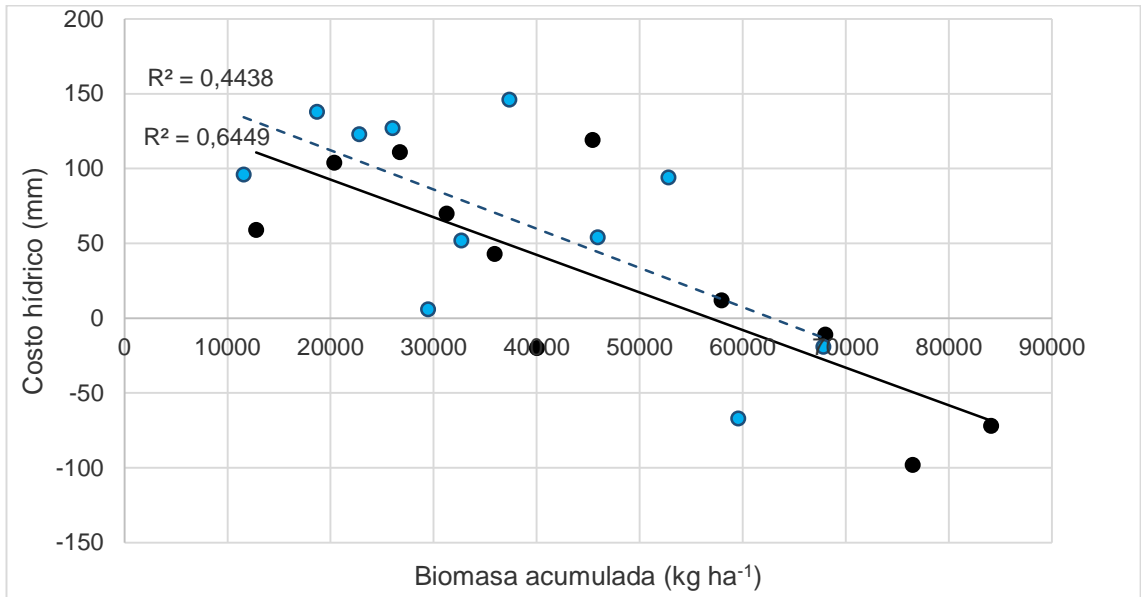


Figura 4. Costo hídrico (CH, mm) de la inclusión de cultivos de cobertura de A y R en función de la biomasa aérea acumulada. Referencias: círculo negro (A); azul (R)

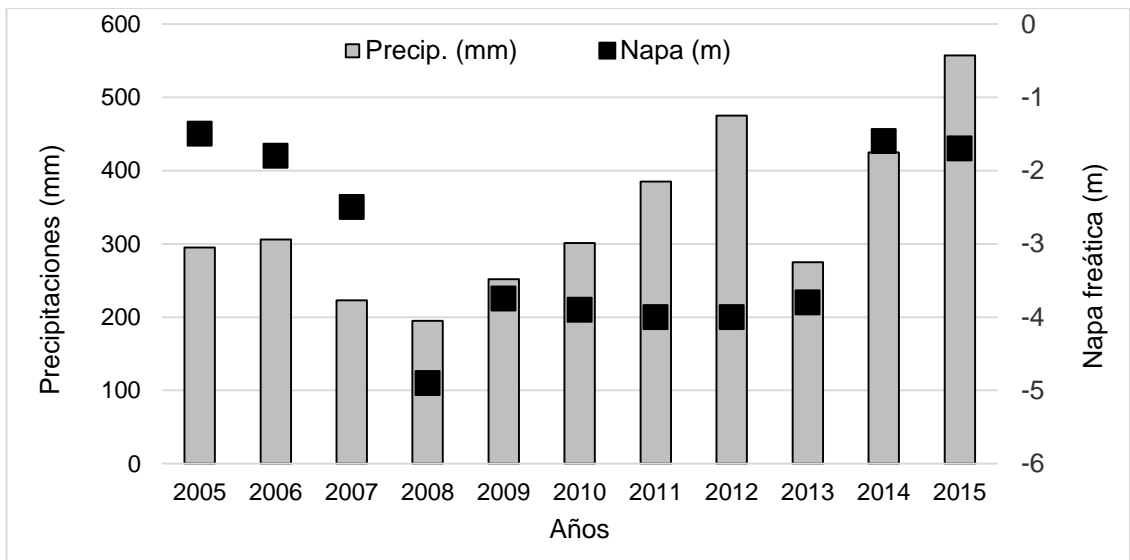


Figura 5. Precipitaciones (mm) en el ciclo de los cultivos de cobertura (CC), y nivel freático (cm) correspondiente al periodo 2005 al 2015.

A pesar de la variabilidad en la producción de biomasa registrada (Tabla 1), los resultados en promedio resultan coincidentes con los reportados por distintos estudios (Ronconi *et al.*, 2008; Scianca *et al.*, 2006 y 2008 y Quiroga *et al.*, 2008), de manera similar a lo comprobado con la EUA, en ambas especies. En base a Álvarez y Steinbach (2006), se determinó, que el aporte equivalente de carbono por la biomasa de los CC y soja resultó de 51 y de 43 Mg ha⁻¹ en las secuencias soja-CCA-soja y soja-CCR-soja, respectivamente. En el monocultivo soja-soja los aportes fueron de 16 Mg ha⁻¹.

Respecto a la dinámica de descomposición de los residuos, en el 1° año de estudio, se determinó, en post secado de los CC (270 días de secado) que el remanente de biomasa de A fue del 16,5 % y de R del 11,0 %. No se encontraron diferencias entre los CC, para cada momento de evaluación. Además, el tiempo necesario para descomponer el 50 % de la materia seca, según el modelo exponencial negativo propuesto por Álvarez *et al.* (1991), fue de 95 y de 99 días para los residuos de A y de R, respectivamente (Figura 6).

Sin embargo, el promedio de MS remanente en los 11° años, evaluada en el momento previo a la cosecha del cultivo de soja fue del 25% para A y R, respectivamente, evidenciando, el impacto sobre la disminución de la evaporación y mejoras en la EUA.

La dinámica de descomposición de la biomasa de los CC comprobada en este trabajo fue similar con lo hallado por Ronconi *et al.* (2008) quienes determinaron una rápida degradación de la biomasa residual del rye grass, entre los 50 y los 100 días posteriores al secado. Los autores atribuyeron esta dinámica a que la biomasa residual del rye grass en las fases iniciales del cultivo de soja está más expuesta a la acción de los factores climáticos (luz, temperatura, precipitaciones).

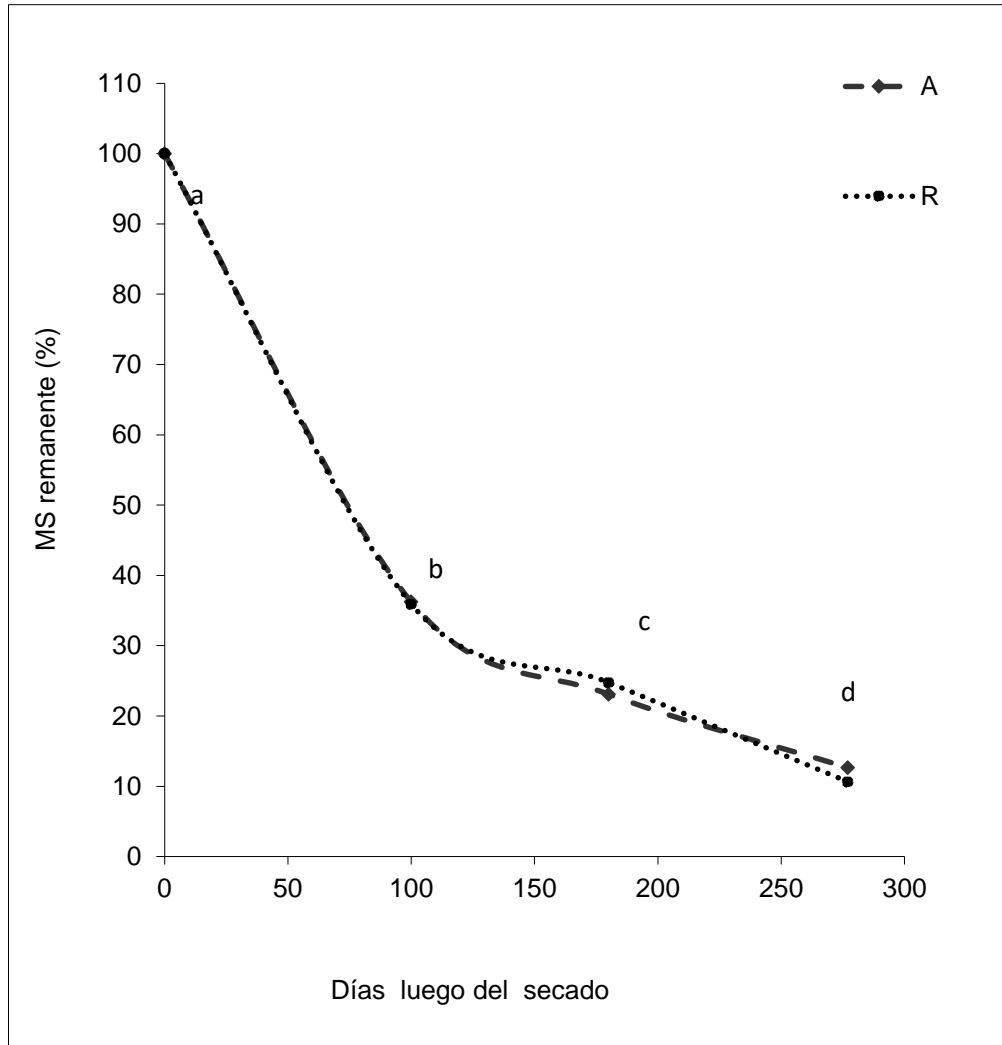


Figura 6. Porcentaje de materia seca remanente (%) de avena (A) y rye grass (R), evaluado a los 100, 180 y 277 días, luego de la suspensión de los CC (1° año trabajo experimental). Letras distintas indican significancias significativas, ($p \leq 0,05$), para cada momento de evaluación.

3.3. Contenido de agua útil al final de los cultivos de cobertura y a la siembra del cultivo de soja.

Al momento de secado de los CC, los contenidos de agua útil resultaron, en promedio, significativamente menores en R (213 mm) respecto al T (256 mm), mientras que A (244 mm) no se diferenció de ambos tratamientos (Tabla 2). En promedio R y A tuvieron 43 y 12 mm menos de agua respecto al T. Durante la campaña 2011 se registraron diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$), los suelos bajo CC presentaron significativamente menor contenido de agua (A=80 y R=69 mm) respecto al tratamiento T (190 mm). Por otra parte, en años con menores precipitaciones durante los CC, los perfiles al momento del secado presentaron bajos contenidos de agua útil (30 a 55 mm) sin diferencias entre tratamientos (Figura 7). Mientras que, durante periodos con mayores precipitaciones los contenidos de agua útil superaron los 200 mm y se registraron diferencias entre tratamientos (Figura 8).

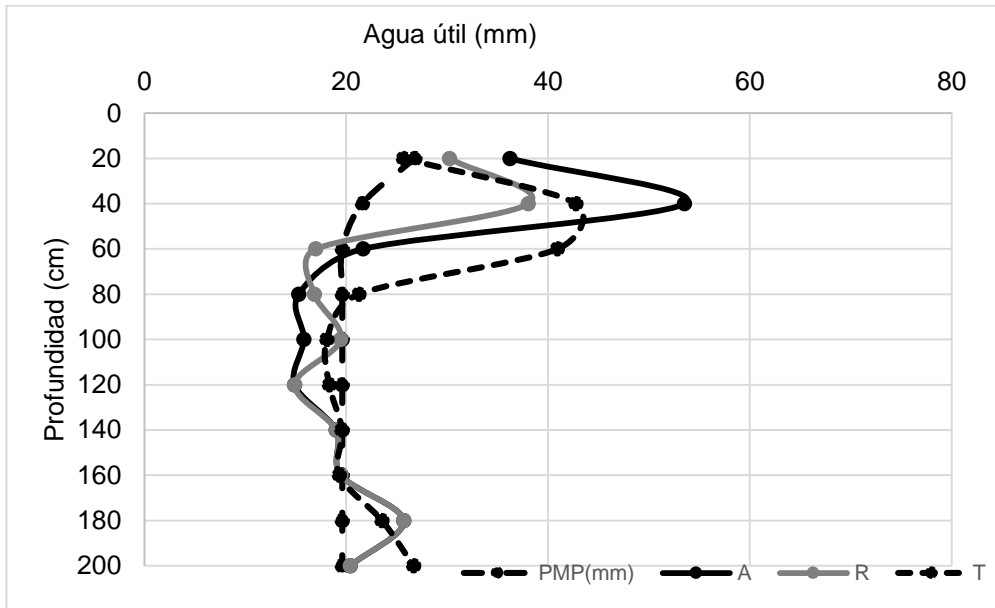


Figura 7. Agua útil en el perfil al final de los CC con menores precipitaciones. Año 2009. CV: 42,64

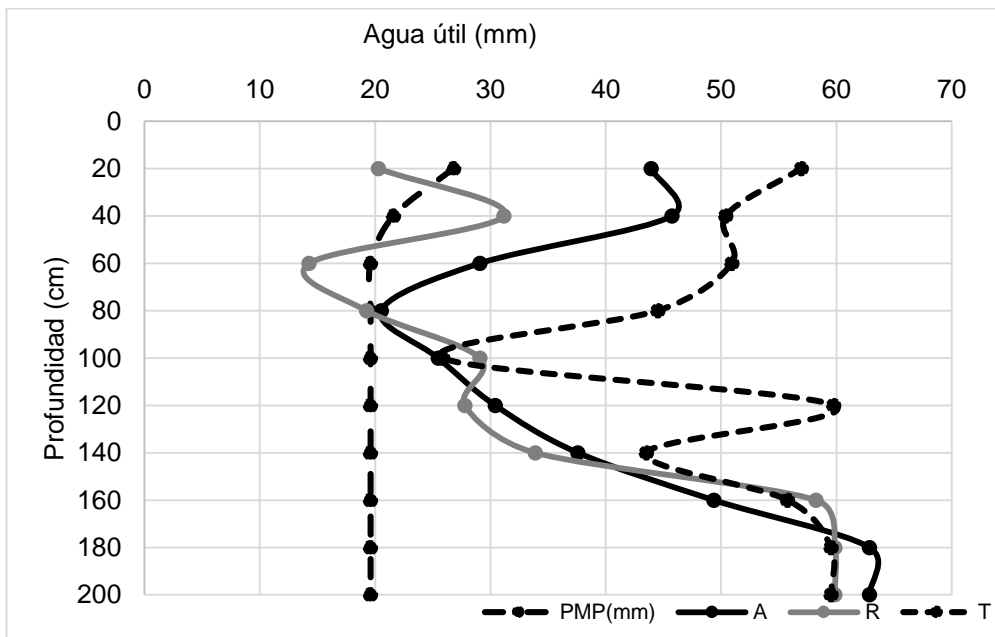


Figura 8. Agua útil en el perfil al final de los CC con mayores precipitaciones. Año 2012. CV: 8,91

Tabla 2. Contenido de agua útil al final de los CC y agua útil a la siembra de soja (AUSsj) en mm hasta los 200 cm. Diferencia en el contenido de agua de A, R y T al momento del secado de los CC y a la siembra del cultivo de soja, para cada año y promedio global de la serie analizada, en (% y mm), (2005-2015). Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) - CV: 31,67 y 24,45 para AUFcc y AUSsj, respectivamente R^2 ajustado 0,76.

Año	Tratamiento	AUFcc	AUSsj	Diferencia de agua con el testigo			
				Final de los CC		Siembra de soja	
				mm	%	Mm	%
2005	T	310	304				
	A	252	313	-58	-19	+9	-2,88
	R	217	267	-93	-30	-37	-14,4
2006	T	281	413				
	A	254	386	-27	-14,50	-27	-6,53
	R	183	357	-98	-35	-56	-13,55
2007	T	236	272				
	A	190	223	-46	-19,50	-49	-18,0
	R	166	217	-70	-29,70	-55	-20,0
2008	T	142	179				
	A	118	124	-24	-17	-55	-30,70
	R	38	74	-104	-73	-105	-59,77
2009	T	36	112				
	A	55	132	+19	+53	+20	+17,85
	R	36	103	---		-9	-8,92
2010	T	174	209				
	A	162	182	-12	-5,74	-27	-12,91
	R	148	168	-26	-12,44	-41	-19,61
2011	T	192 b	226 a				
	A	80,5 a	192 a	-115,5	-51,0	-34	-15,00
	R	69,0 a	145 a	-123	-54,5	-81	-35,85
2012	T	437	385				
	A	457	422	+20	+5,20	+37	+9,60
	R	423	404	-14	-3,63	+19	+4,93
2013	T	274 b	sd				
	A	291 b	sd	+17	+6,2	Sd	sd
	R	207 a	sd	-67	-24	Sd	Sd
2014	T	393	370				
	A	438	352	+44	+11,90	-18	-4,86
	R	442	413	+48	+13,00	-43	-11,62
2015	T	345	524				
	A	357	450	+12	+2,30	-74	-14,12
	R	410	476	+65	+12,40	-48	-9,16
PROMEDIO GLOBAL 2005 – 2015							
Promedio	T	256 b	398 b				
	A	244 ab	377 ab	-12,0	-4,68	-21,0	-5,27
	R	213 a	361 a	-43,0	-16,79	-37,0	-9,29

Los contenidos de agua útil al momento de la siembra de soja resultaron en promedio mayores en el T (398 mm) diferenciándose estadísticamente con R (361mm), mientras que A (377 mm) no mostró diferencias respecto de ambos tratamientos. En general los estratos superficiales del perfil del suelo bajo CC presentaron mayores contenidos de agua útil al momento de la siembra de la soja (Figuras 9 y 10). En la Figura 9, los contenidos de agua entre 80 y 200 cm del perfil se aproximan a punto de marchitez permanente (PMP) en todos los tratamientos, evidenciando las escasas precipitaciones durante la parte final del barbecho que no posibilitaron la recarga del perfil y dejan expuesto al cultivo de verano a la oportunidad de las precipitaciones de primavera, (año 2009). Por su parte la Figura 10 muestra una condición hídrica contrapuesta (año 2012), con perfiles que a partir de los 80 cm se encuentran en sus máximos contenidos de agua útil y que solo muestran diferencias entre tratamientos en el estrato superficial. Los CC presentaron entre 11 y 18 mm más de agua que T en los primeros 20 cm del perfil, a la siembra de soja. No obstante R presentó en algunos años menor contenido de agua entre 60 y 100 cm, como se muestra en la Figura 10.

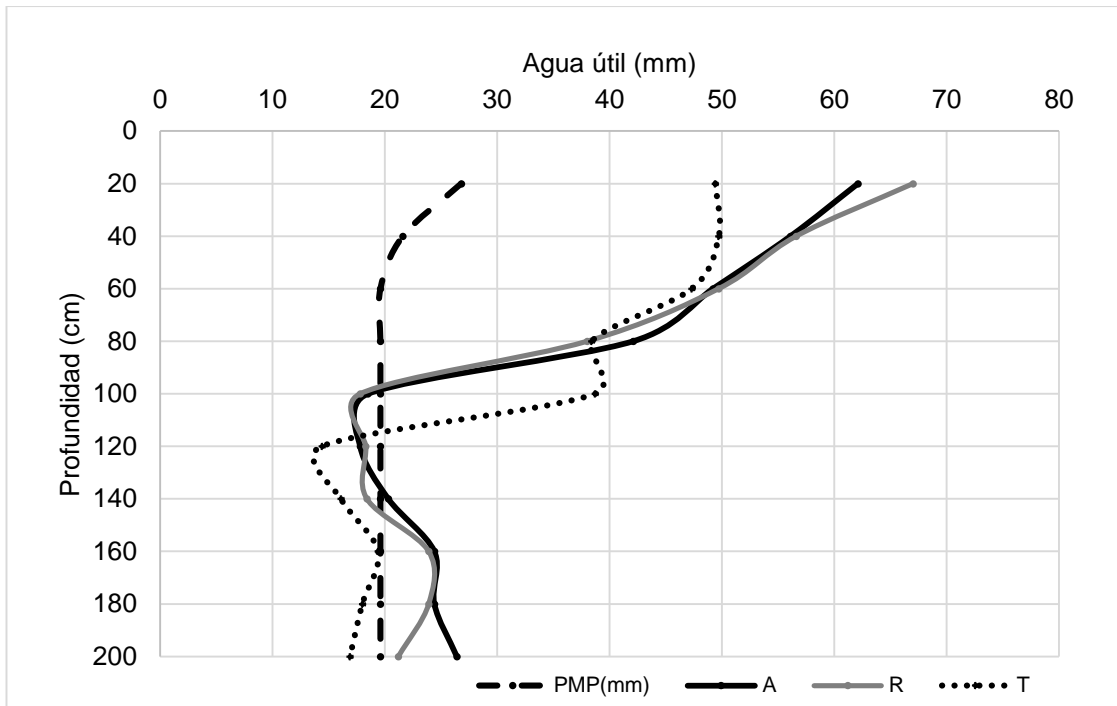


Figura 9. Agua útil en el perfil, a la siembra de soja, con déficit de recarga hídrica. Año 2009. CV.15,75

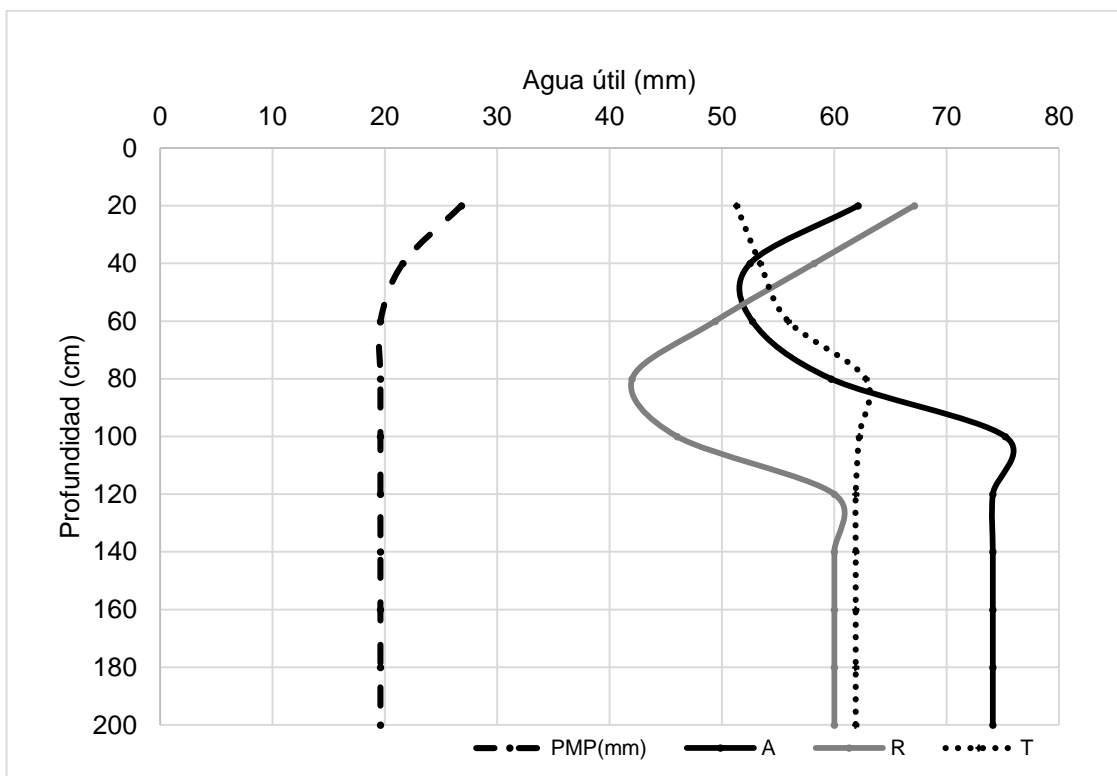


Figura 10. Agua útil en el perfil, a la siembra de soja, con adecuada recarga hídrica. Año 2012. CV.19,50

A pesar de las diferencias en la disponibilidad de agua, el rendimiento de soja no mostró relación con los contenidos de agua al momento de la siembra (R^2 : 0,22), mientras que, cuando se consideró la oferta hídrica total (inicial más precipitaciones durante el ciclo de soja) la relación fue significativa (R^2 : 0,53). Por otra parte, al discriminar las precipitaciones por periodos durante el ciclo del cultivo, las que sucedieron en torno al período crítico de formación de vainas y granos tuvieron mayor influencia (R^2 : 0,62 p: 0,047).

Scianca (2010), analizando diferentes periodo CC- soja, comprobó que las precipitaciones registradas entre el período de siembra hasta floración de soja explicaron el 94 % del rendimiento del cultivo. Cuando el análisis se extendió hasta madurez fisiológica la correlación entre precipitaciones y rendimiento disminuyó al 78%. En parte, la escasa relación obtenida entre el agua almacenada en el suelo y el rendimiento de soja puede deberse a diferencias en la distribución de los contenidos de agua útil a través del perfil de suelo y disponibilidad en el periodo crítico del cultivo.

3.4. Eficiencia de barbechos (EB)

El período de barbecho, en la monocultura de soja, fue de 210 días, mientras que en la rotación con CC este período se redujo a 40 días (Figura 11), con una producción anual promedio de 8000 kg MS ha⁻¹ y con una eficiencia promedio en el uso del agua de 23,5 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹. La Figura 12 muestra, además, que la precipitación durante el barbecho largo, expresada como oferta hídrica diaria fue de 2,1 mm⁻¹ día⁻¹ siendo superior al uso consuntivo promedio de los CC (1,8 mm⁻¹ día⁻¹). Estos datos permiten concluir sobre la viabilidad de la inclusión de CC en monocultura de soja sin comprometer la disponibilidad de agua del cultivo sucesor. Además, mostraron la muy baja eficiencia del barbecho largo para almacenar el agua de las precipitaciones (437mm) y transferirlas al ciclo del cultivo sucesor (Figuras 11 y 12).

La eficiencia promedio de transferencia de agua durante el barbecho largo fue del 11%, es decir que unos 50 mm de los 437mm precipitados fueron transferidos al cultivo de soja. La sección control sobre la cual se evaluó la EB fue de 200 cm no obstante, habría que considerar que la profundidad efectiva de las raíces de los cultivares de soja utilizados en la región (grupos 3 y 4) podrían no llegar a esa profundidad.

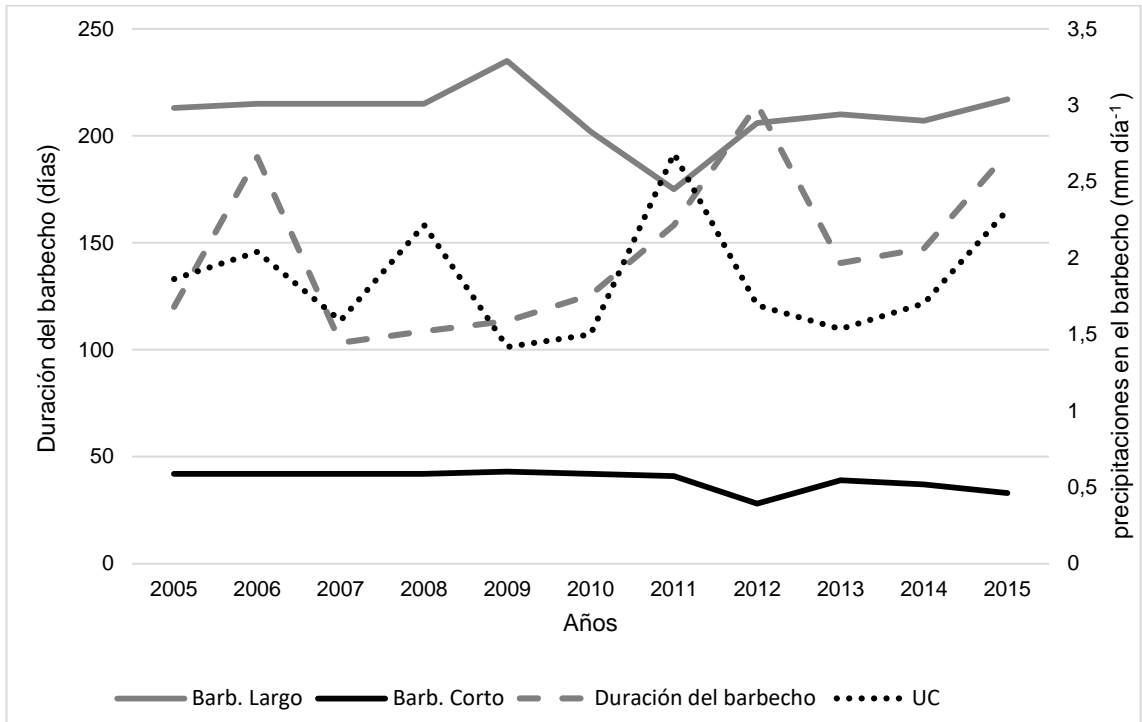


Figura 11. Duración de los barbechos en monocultura de soja (barbecho largo) y en la secuencia soja-CC-soja (barbecho corto) y precipitaciones promedio durante el barbecho largo y uso consuntivo de los CC (mm día⁻¹) para el periodo 2005/2015.

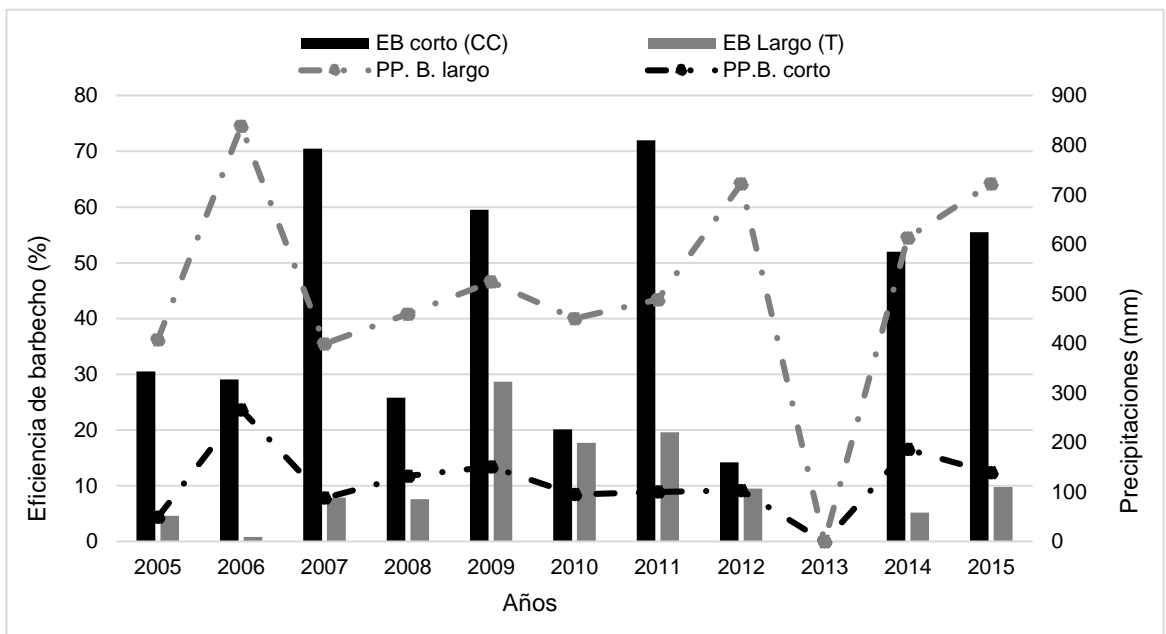


Figura 12. Eficiencias de barbechos [corto (CC) y largo (T)] y precipitaciones durante el barbecho largo (210 días) y barbecho corto (40 días) para un periodo de 11° años.

En cambio, la EB promedio (Tabla 3), durante el periodo que media entre el secado de los CC y la siembra de soja (40 días) fue de 43%. Es decir que de los 137mm de las precipitaciones registradas, en promedio, durante el barbecho corto; 59 mm fueron transferidos al cultivo de soja. Por ello, como se mostró en apartados anteriores, los estratos superiores del perfil pueden llegar con más humedad a la siembra de soja después de un barbecho corto respecto a un barbecho largo. Según Kruger y Quiroga (2013), los residuos de la superficie del suelo además de reducir la temperatura y la cantidad de radiación solar directa que llega al suelo, evitan la insolación, reducen la velocidad del viento que influye en disminución de las pérdidas de agua por evaporación, erosión, encostramiento superficial, compactación, penetración de las raíces y fertilidad. Scianca (2010) determinó en Udoles de la Región Pampeana que el tratamiento sin CC (barbecho largo) presentó EB cercanas a 0 e incluso negativas, hipotetizando que los CC tendrían el potencial uso estratégico para que las precipitaciones ocurridas durante su ciclo desarrollen biomasa aérea y radicular, capturar carbono, mejorar el balance de MO y reducir pérdidas de nutrientes por lixiviación, sin comprometer el cultivo de renta. Similares resultados fueron observados por Álvarez *et al.* (2006) quienes registraron también bajas EB (11,4%) en un Hapludol típico de textura franca en el noroeste de Buenos Aires. En tanto que Basanta *et al.* (2008) registraron EB negativa sobre un suelo de textura franco-limosa en la región central de Córdoba, coincidente con lo señalado anteriormente por Scianca (2010) para Udoles de la Región Pampeana. Por otro lado, en ambientes de menor disponibilidad hídrica, tal como los Ustoles de la pampa arenosa, la incorporación de CC invernales en las secuencias de cultivos anuales podrían condicionar mediante su uso consuntivo la recarga del perfil y afectar el establecimiento del cultivo sucesor o comprometer su rendimiento (Fernández y Quiroga, 2020).

Tabla 3. Eficiencia de Barbecho de los tratamientos. S/CCA/S, S/CCR/S y S/S durante los ciclos 2005 al 2015. S/CCA/S (secuencia soja.CC de avena /soja), S/CCR/S (secuencia soja CC de rye grass/soja y S/S (secuencia soja/soja) SD = sin datos. Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Año	Secuencia de cultivos Eficiencia de barbecho (%)		
	S/CCA/S	S/CCR/S	S/S
2005	24,5 a	36,6 a	4,6 b
2006	26,6 a	31,6 a	0,8 b
2007	85,0 a	56,3 b	7,9 c
2008	26,7 a	25,0 a	7,6 b
2009	62,0 a	57,0 a	28,7 b
2010	25,9 a	12,3 a	17,7 a
2011	78,7 a	65,3 a	19,6 b
2012	4,9 b	23,4 a	9,5 b
2013	SD	SD	SD
2014	45,2 a	58,8 a	5,2 b
2015	53,8 a	57,2 a	9,8 b
Promedio	43,5 a	42,5 a	11,2 b

Los resultados mostraron que la EB disminuyó a medida que se extendió el período de barbecho. A mayor longitud del barbecho menor eficiencia (R^2 : -0,71 $p=0,03$). Esto es coincidente con Bonvechi *et al.* (2013) y con la mayoría de los estudios que fueron citados. A mayor duración de la fase de barbecho (>200 días), mayor ineficiencia para almacenar y transferir el agua de las precipitaciones a los cultivos sucesores.

3.5. Efectos de los CC sobre el carbono orgánico total (COT) y carbono orgánico particulado (COP).

En las evaluaciones realizadas al 5° año, se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en los contenidos del COT y COP, resultando superiores en los tratamientos con CC respecto del T (Figura 13). Las mayores diferencias se observaron en el estrato superior del perfil, con una mayor estratificación del COT bajo CC. La relación COT 0-5/15-20 cm fue de 1,75 bajo CC en relación con el valor de 1,31 para el T al inicio de la experiencia.

Las diferencias entre tratamientos persistieron en las evaluaciones realizadas a los 11 años (Figura 14). La estratificación se mantuvo bajo los tratamientos de CC (1,77) y, en el T resultó, algo superior (1,41) respecto a su valor inicial (1,31).

Giron *et al.* (2014), determinaron, una mayor estratificación del COT en CC respecto al T, en los espesores 0-5 y 5-10 cm, presentando los CC un 30,41% más de COT en el estrato 0-5 cm, que el tratamiento T, siendo la estratificación del 1,86 y 1,73 en A y R, respectivamente.

En este estudio, cuando se analizaron estos cambios refiriéndolos a masa de suelo, los valores iniciales de COT ($38,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) mostraron un leve incremento bajo CC ($41,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) y disminución en el T ($35,7 \text{ Mg ha}^{-1}$). Al comparar concentraciones los suelos bajo CC tuvieron un 15% más de COT respecto del T. Sin embargo, al referirlas a cantidades las diferencias resultaron del 13,3%, sin embargo, las diferencias en la concentración en el COP fueron del 50% (para en promedio de los espesores de suelo). Ambas concentraciones correlacionaron con la biomasa aérea de los CC (R^2 : 0,52 y 0,67 para COT y COP, respectivamente).

Las asimetrías entre COT y COP, según las unidades en que se expresen, están dadas por la menor densidad aparente del suelo bajo CC.

Si bien las diferencias por efectos acumulados resultaron de $5,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (aproximadamente 10 Mg ha^{-1} de MO), las mismas no solo fueron por incrementos del

COT por la inclusión de los CC, sino que también se debieron a disminuciones en el T, durante la prolongación de los efectos de la monocultura de soja. El 56% de la variación registrada se produjo por la disminución en el T (disminución promedio $0,34 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y el 44% a incrementos por inclusión de los CC (incremento promedio de $0,21 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

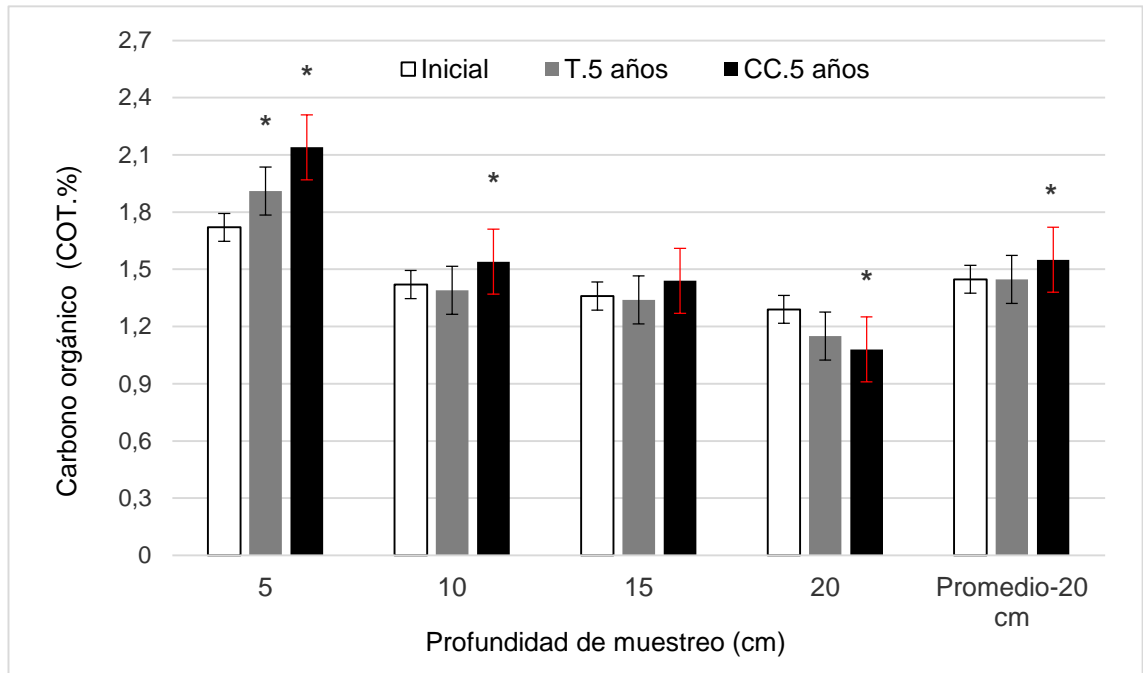


Figura 13. Carbono orgánico total (COT: %) al inicio de la experiencia y luego de 5 años de efectos acumulados para los tratamientos testigo (T) y promedio de los cultivos de cobertura (CC: avena y rye grass). Determinados para los espesores de suelo 0-5; 5-10; 10-15 y 15-20 cm. * indica diferencias significativas entre tratamiento a igual profundidad evaluada ($p < 0,05$). CV: 5 cm: 17,6%; 10 cm: 16,4%; 15 cm: 21,5%; 20 cm: 26,0 % y 0-20 cm: 20,3%.

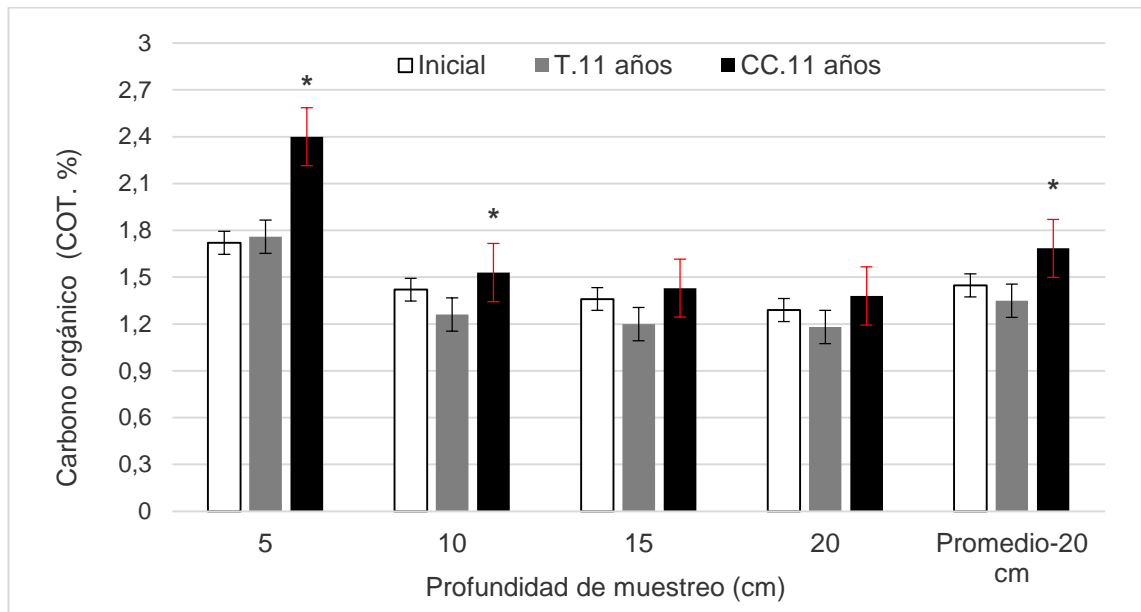


Figura 14. Carbono orgánico total (COT: %) al inicio de la experiencia y luego de 11 años de efectos acumulados para los tratamientos testigo (T) y promedio de los cultivos de cobertura (CC: avena y rye grass). Determinados para los espesores de suelo 0-5; 5-10; 10-15 y 15-20 cm. * indica diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). CV: 5 cm: 7,1%; 10 cm: 10,5%; 15 cm: 13,0%; 20 cm: 16,0 % y 0-20 cm: 11,6%.

La Figura 15 muestra la relación COP/COT (%), comprobándose una mayor acumulación de C en los espesores superficiales del perfil (0-5 y 5-10 cm). Esta observación coincide con Álvarez *et al.* (2014), que documentaron que la siembra directa y los CC, favorecerían la acumulación de C en los espesores superficiales del perfil. Además, la inclusión de los CC podría incrementar el COT a expensas del COP. Asimismo el aumento en la concentración del C en superficie estaría relacionado a la retención de N por los CC, mitigando su potencial lixiviación.

La estratificación en los espesores superficiales del suelo se podría atribuir a la mayor concentración de raíces de los CC (Frasier *et al.*, 2007, 2014, 2016 y 2019) determinaron que el 80 % de la biomasa radicular de las gramíneas invernales se localiza en los primeros 20 cm del perfil del suelo y la concentración de C en su materia seca es del 40%, en consecuencia es razonable encontrar una mayor concentración de C en los espesores superficiales del suelo. La captura de C por la inclusión de los CC en suelos franco arenosos tendría una estrategia fundamental dado que estarían colaborando a la constitución de indicadores de salud del suelo - los CC estarían cubriendo la ausencia de rotación con pasturas y de cultivos anuales voluminosos (maíz) que aporten biomasa aérea y radical -

Una recopilación sobre trabajos con CC y sus efectos, en la Región Pampeana (Sá Pereira y Galantini, 2018) determinó que los CC, en promedio, capturaron 2120 kg ha⁻¹ de C a partir del retenido en su biomasa aérea y radicular. Sin embargo, Fernández *et al.* (2020), no encontraron efectos positivos sobre el COT y el COP, luego de 5 años de estudios en la Región Semiárida Pampeana, con CC de centeno en una secuencia en rotación con soja.

Adetunjia *et al.* (2020), reportaron que en la mayoría de los estudios, realizados en diferentes condiciones climáticas, los CC aumentaron significativamente las concentraciones de COT del suelo en comparación con parcelas sin CC.

En este estudio, se determinaron diferencias significativas a favor del R. Podría inferirse que, a la suspensión de los CC el R presente una menor precocidad en su desarrollo teniendo un reparto más proporcional de biomasa aérea y radical respecto de A y menor relación C/N, favoreciendo la actividad biológica y una mayor eficiencia de transformación del C. En este sentido Restovich *et al.* (2008) y Frasier *et al.* (2016), determinaron que cuando los CC tienen relaciones C/N bajas la mineralización supera a la inmovilización y los nutrientes captados por la biomasa aérea y radicular estarán más disponibles para la biota del suelo. Estos conceptos también han sido reportados por Blanco-Canqui *et al.* (2015) y Adetunjia *et al.* (2020).

Esta relación COP/COT (%) comprueban cambios atribuidos a la gestión; la inclusión de los CC de A y R, favorecieron la capturan C en los espesores superficiales (0-10 cm).

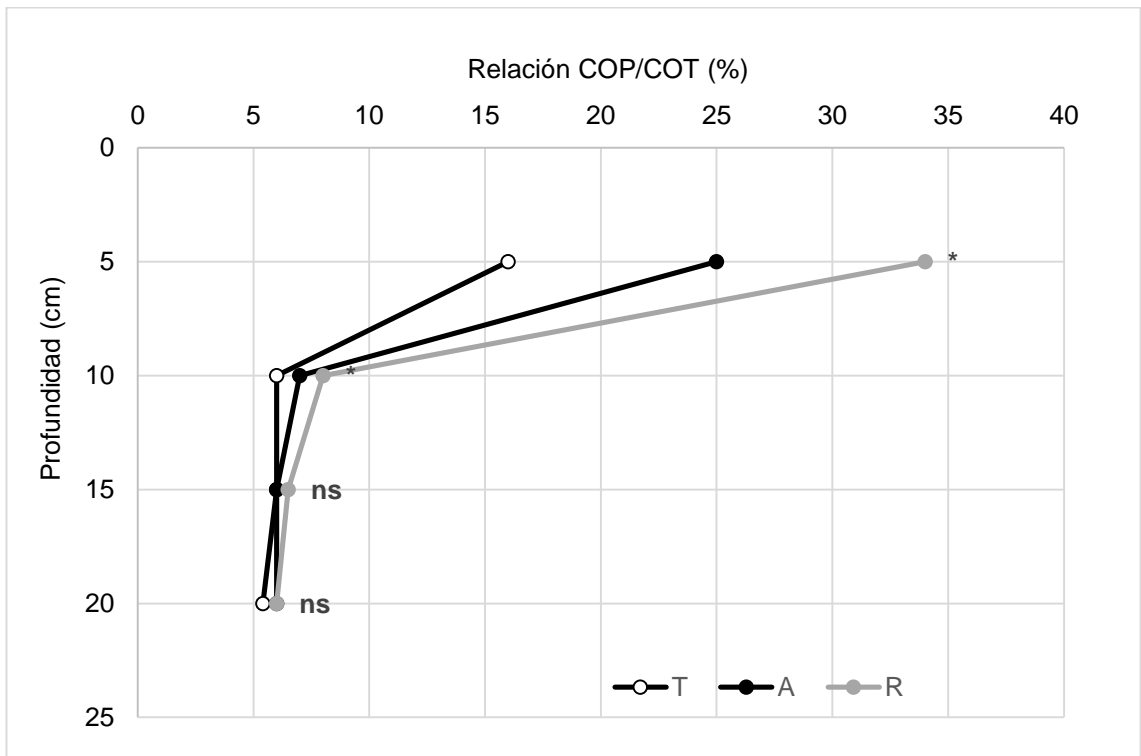


Figura 15. Relación entre COP / COT (%) del testigo (T) y los cultivos de cobertura de avena (A) y rye grass (R). Para los espesores 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm del suelo al 11º de efectos acumulados de la monocultura de soja (T) y de la secuencia CC-soja. * indica diferencia significativa entre tratamiento a la misma profundidad ($p < 0,05$). CV: 31,5; 30,3; 47,8 y 51 % para los espesores de suelo de 0-5; 5-10; 10-15 y 15-20 cm. CV: 40,2 % para el promedio del espesor 0-20 cm.

3.6. Efectos de los CC sobre la infiltración

Cuando la infiltración básica fue evaluada en el primer año, luego del secado de los CC no se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre el T y los CC, aunque el suelo bajo CC mostró una tendencia de mayor infiltración que T (Figura 16).

En cambio, en la evaluación realizada en post cosecha del cultivo de soja, los CC se diferenciaron significativamente del testigo ($p \leq 0,05$). En términos porcentuales la infiltración de los CC fue entre 31 y 34 % mayor respecto al T. En el 5° año, la infiltración de los CC fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$). Claramente se apreció una reducción del 70 % en la infiltración del tratamiento T con respecto al promedio de los tratamientos con CC. En las determinaciones realizadas a los 11° años, se pudo validar que la infiltración en el T siguió siendo significativamente menor (39 mm h^{-1}) que la de los CC. La mayor infiltración se logró con CC de R (96 mm h^{-1}). No obstante, no difirió de la observada con CC de A. En promedio, al final, los CC tuvieron mayor tasa de infiltración (132%), respecto al T. Varias pueden ser las causas de la disminución de la infiltración bajo monocultura de soja, en este estudio se determinó una correlación lineal y positiva con la biomasa aérea de los CC ($R^2: 0,69$). Sin embargo, la biomasa de raíces aportadas por los CC y su efecto sobre la macroporosidad del suelo podrían ser factores que cooperasen a mantener la tasa de infiltración (Frasier *et al.*, 2019). Además, las raíces de las gramíneas estarían generando estructura en el sistema (porosidad) y una mayor interconexión del sistema poroso, permitiendo el ingreso del agua (Fernández *et al.*, 2012). Mientras que, el bajo aporte de biomasa de la monocultura de soja y la baja permanencia de sus residuos en el suelo (baja relación C/N) condicionarían a una menor tasa de infiltración. Asimismo, diversos estudios reconocen que las coberturas con residuos de cosechas o bien las que se establecen con vegetación viva tienen alta eficacia para mitigar la susceptibilidad de ruptura de los agregados por el impacto de las gotas de lluvia y el posterior proceso de dispersión de partículas y oclusión de los macroporos, además de favorecer la biota, contribuyendo a la generación de bioporos estables y profundos sobre los estratos superiores del perfil.

Es importante destacar que, si bien, no se planteó como objetivo evaluar biomasa radicular, a fin de comprender la relación biomasa aérea y biomasa radicular se realizaron evaluaciones visuales del sistema radicular de los CC (distribución) y del testigo (Foto 9). En la misma, se observa mayor cantidad y distribución del sistema radicular en el perfil de suelo del CC de A. Esto permitiría explicar la magnitud de algunos parámetros que se cuantificaron en este trabajo, como por ejemplo mayor

concentración de carbono, mejoras en infiltración y estabilidad de agregados en estos 11 años de evaluación del ensayo de larga duración.

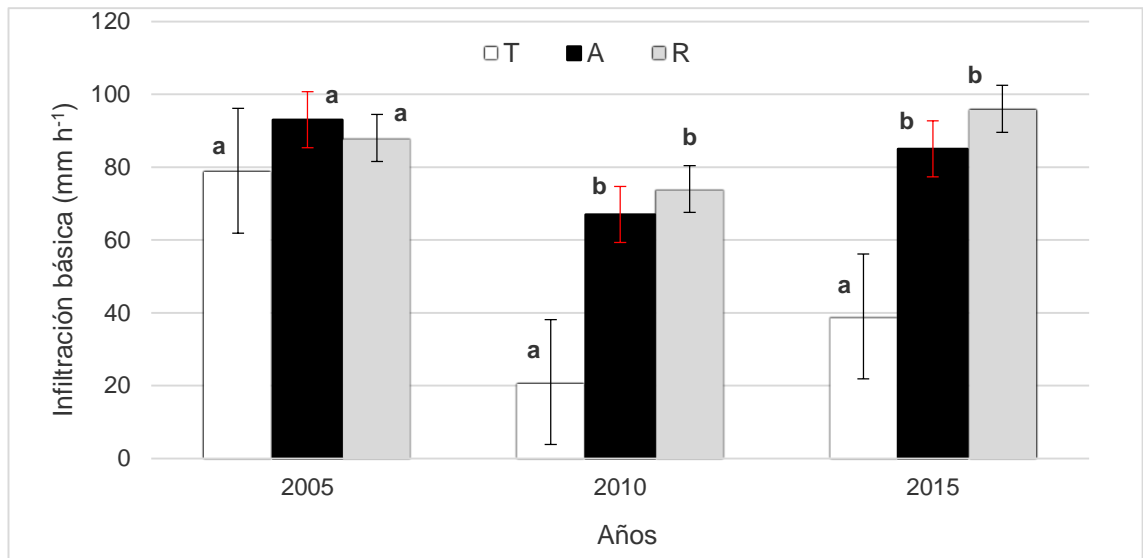


Figura 16. Infiltración evaluada en el 1er año luego del secado de los CC y luego de 5 y 11 años de efectos acumulados. Testigo (T) sin CC, con CC de avena (A) y con CC de rye grass (R). Letras distintas indican diferencias significativas para el test de LSD Fisher. ($p \leq 0,05$). CV: 27,6; 20 y 30 % para el promedio de infiltración de los años 2005, 2010 y 2015, respectivamente. CV: 37, 28 y 25,50% para los tratamientos T, A y R, respectivamente.



Foto 9. Vista del perfil del suelo de avena y testigo al momento de secado de los cultivos de cobertura.

3.7. Efectos de los CC sobre tamaño de agregados y estabilidad estructural (EE)

En los tratamientos con CC la proporción de agregados mayores a 8 mm fue significativamente mayor y la proporción de los menores a 2 mm fue menor, respecto al T sin CC (Figura 17 a y b). En promedio la cantidad de los agregados >8 mm fue de 21,5 y 15,7 % mayor en A y R en los espesores de suelos de 0 a 10 y de 10 a 20 cm con respecto al T. Mientras que los agregados <2 mm el T presentó mayor cantidad de agregados (28,3 y 31,4 %), en los espesores de suelo de 0-10 y 10-20 cm, que A y R ($p < 0,05$). Estas diferencias sobre los agregados estarían relacionados a las raíces de los CC que además influyen sobre el COP del suelo en los estratos superiores del perfil y los suelos responden al cambio del manejo realizado en el mediano plazo, Giron *et al.* (2014). No obstante, Ruis *et al.* (2020), luego de una revisión de 4 años de estudios sobre CC, sostienen que para manifestar cambios en la concentración del carbono y la estabilidad de los agregados en el suelo, la producción de biomasa de los CC debe ser suficientemente elevada, probablemente $> 3 \text{ Mg ha}^{-1}$.

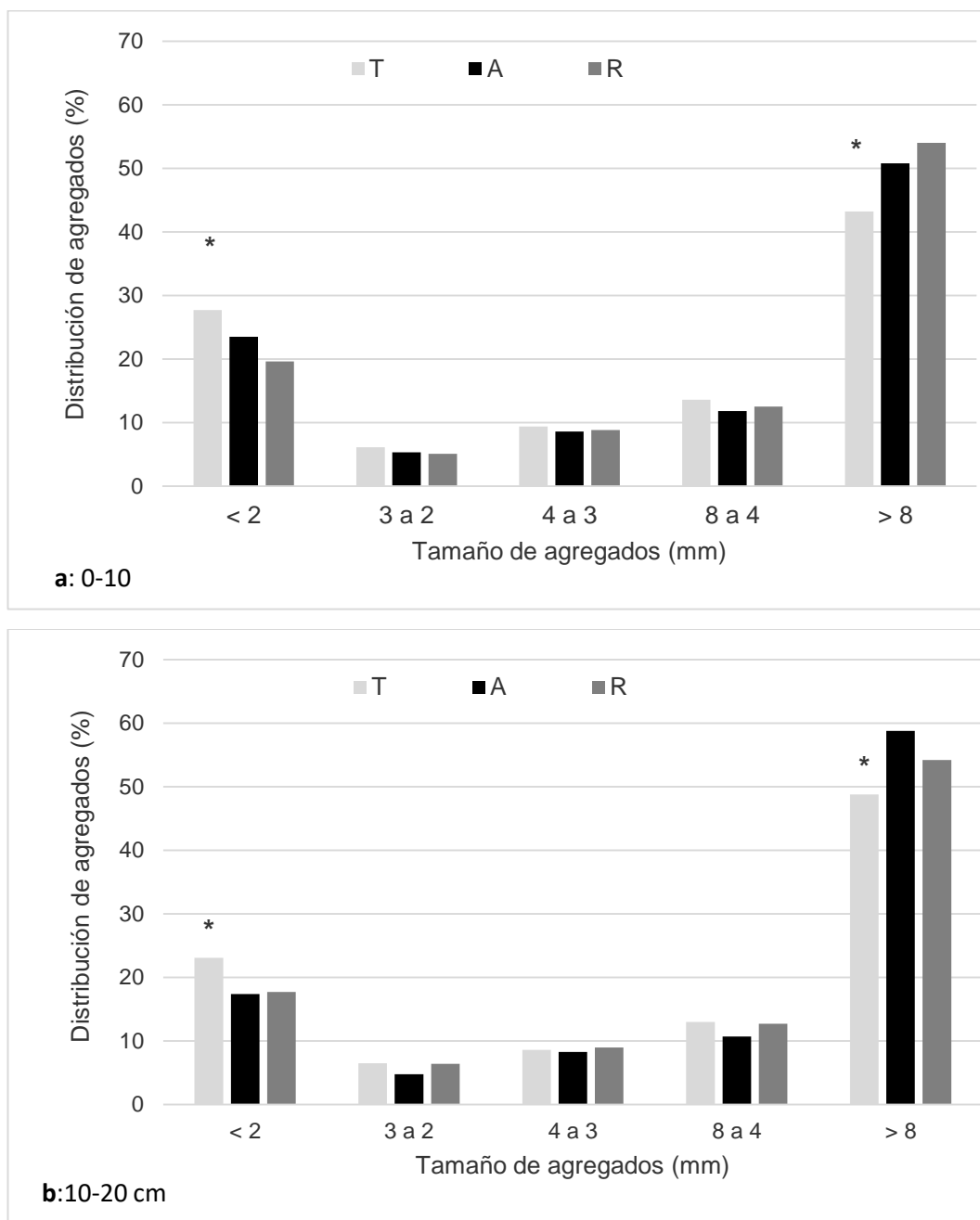


Figura 17. **(a)** Proporción de agregados (%) de diferentes diámetros (<2, 2-3, 3-4, 4-8 y >8mm) en el estrato de suelo de 0-10 cm, bajo monocultura de soja (T) y con inclusión de cultivos de cobertura de avena (A) y rye grass (R). **(b)** Proporción de agregados (%) de diferentes diámetros (<2, 2-3, 3-4, 4-8 y >8mm) en el estrato de suelo de 10-20 cm, bajo monocultura de soja (T) y con inclusión de cultivos de cobertura de avena (A) y rye grass (R). * indica diferencias significativas entre tratamiento en el mismo tamaño de agregado ($p < 0,05$). CV para **a**: 0-10 cm 12,5; 21,4; 21,0; 22,7 y 14% para los agregados >8; 8-4; 4-3; 3-2 y <2 mm. CV para **b**: 10-20 cm 11,50; 16,8; 21,7; 37,5 y 18% para los agregados >8; 8-4; 4-3; 3-2 y <2 mm.

El índice de inestabilidad estructural en los estratos de 0-10 y 10-20 cm (Tabla 4) presentó valores medios significativamente mayores en T respecto a los CC, los cuales

no se diferenciaron entre sí. Esto pone de manifiesto la mayor inestabilidad de los agregados (2 a 8 mm) en el suelo bajo monocultura de soja y como a partir de la inclusión de CC puede mejorarse esta condición física. El tratamiento T registró valores de inestabilidad en promedio 23% y 25% mayores que los CC, en los estratos de 0-10 y 10-20 cm, respectivamente.

Tabla 4. Índice de Inestabilidad estructural para 0-10 y 10-20 cm de suelo. Bajo los distintos tratamientos T (testigo sin CC), A (avena) y R (rye grass). Letras diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas entre tratamientos a igual profundidad ($p < 0,05$). CV 0-10 cm: 11,35% y R^2 : 0,70. CV 10-20 cm: 11,03% y R^2 : 0,72.

Profundidad (cm)	T	A	R
0 a 10	0,50 A	0,38 B	0,39 B
10 a 20	0,65 A	0,46 B	0,51 B

Además en el estrato de 0-10 cm, se comprobó una relación positiva entre los valores de EE y los contenidos de COT y la biomasa aérea tanto en los tratamientos con CC de A (R^2 : 0,42) como de R (R^2 : 0,64), en coincidencia con Colazo y Buschiazzo (2010). Si bien son varios los factores que inciden sobre la EE, la relación de COP/COT podría ser una de las principales causas de la mayor estabilidad de los agregados en los tratamientos con CC. Se observó, que los CC influenciaron positiva y significativamente sobre el COP, se diferenciaron del testigo en un 58,3%. De acuerdo a la mayor proporción de agregados > 8 y menor de < 2 mm, determinados en los CC de A y R respecto al T que tuvieron un impacto positivo sobre el índice de inestabilidad en los tratamientos, se podría sostener la importancia fundamental que tendría la incorporación de los CC de gramíneas, por el aporte de MS sobre y dentro de los espesores superficiales en suelos de baja calidad textural, y, cómo fue expuesto en la introducción, estos procesos tienen lugar por efectos acumulados y solo pueden ser comprobados a través de experimentos de larga duración, de acuerdo a lo reportado por estudios previos (Olchin *et al.*, 2008; Frasier *et al.*, 2016; Blanco-Canqui *et al.*, 2015 y 2017; Deagustini *et al.*, 2017 y Sasal *et al.*, 2017).

3.8. Efectos de los CC sobre la densidad aparente (DA)

Al inicio del experimento los valores medios de DA para el espesor 0-20 cm no se distinguieron significativamente entre unidades experimentales. Tampoco se comprobaron diferencias al comparar los valores medios de cada tratamiento en diferentes estratos del perfil del suelo (Tabla 5). Esta condición inicial es deseable e indica cierta uniformidad del sitio experimental y/o una adecuada distribución de las unidades experimentales.

Tabla 5. Valores medios de las variables densidad aparente (DA), porosidad total (PT), porosidad de aireación (PA) para los tratamientos testigo y CC al inicio del experimento, para los espesores 0-5; 5-10; 10-15 y 15-20 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada profundidad (LSD Fisher, $p \leq 0,05$). CV: 5 cm: 7,4%; 10 cm: 4,2%; 15 cm: 6,5%; 20 cm: 6,0 %.

Año de evaluación	Profundidad (cm)	Tratamientos	DA (g cm ⁻³)	PT (%)	PA (%)
1º	0 - 5	CC	1,25 a	52,92 a	31,9 a
		T	1,25 a	52,73 a	31,7 a
	5 - 10	CC	1,36 a	48,58 a	27,6 a
		T	1,34 a	49,93 a	28,4 a
	10 - 15	CC	1,38 a	48,12 a	27,1 a
		T	1,41 a	46,79 a	25,8 a
	15 - 20	CC	1,36 a	48,77 a	27,8 a
		T	1,35 a	49,06 a	28,1 a

En la Figura 18 se presentan las determinaciones iniciales de DA y las realizadas durante el 5° año. No se registraron diferencias entre CC por lo que se representa el valor promedio de los mismos. Solo en la profundidad de 0-5 cm se comprobó diferencia significativa entre CC y el T, lo cual implicó una diferencia de 8% en la PT. Si bien en todas las profundidades la tendencia fue a menor DA bajo CC, las mismas resultaron no significativas.

Similares resultados fueron registrados en Hapludoles francos a franco arenosos de la Región de la Pampa Arenosa, donde la inclusión de CC por periodos inferiores a 5 años de efectos acumulados no influyó significativamente sobre la DA (Barraco *et al.*, 2012; Álvarez *et al.*, 2008a y 2008b; Lardone *et al.*, 2011 y 2012; Varela *et al.*, 2010). En cuanto a la PA, teniendo en cuenta la PT y los contenidos de agua a capacidad de campo, todos los tratamientos y profundidades evaluadas se ubicaron por encima de valores considerados críticos. El crecimiento de las raíces se limitaría con menos del 10 % del espacio poroso (Taboada y Micucci, 2008).

En la Figura 19 se presentan los resultados de DA iniciales y el correspondiente a evaluaciones realizadas durante el 11° año, los menores valores de DA de los CC estuvieron relacionados a la biomasa aérea ($R^2:0,60$). Bajo monocultura de soja se mantuvieron los valores iniciales mientras que bajo CC la tendencia es a una disminución en todas las profundidades, resultando solo significativa en el estrato superior.

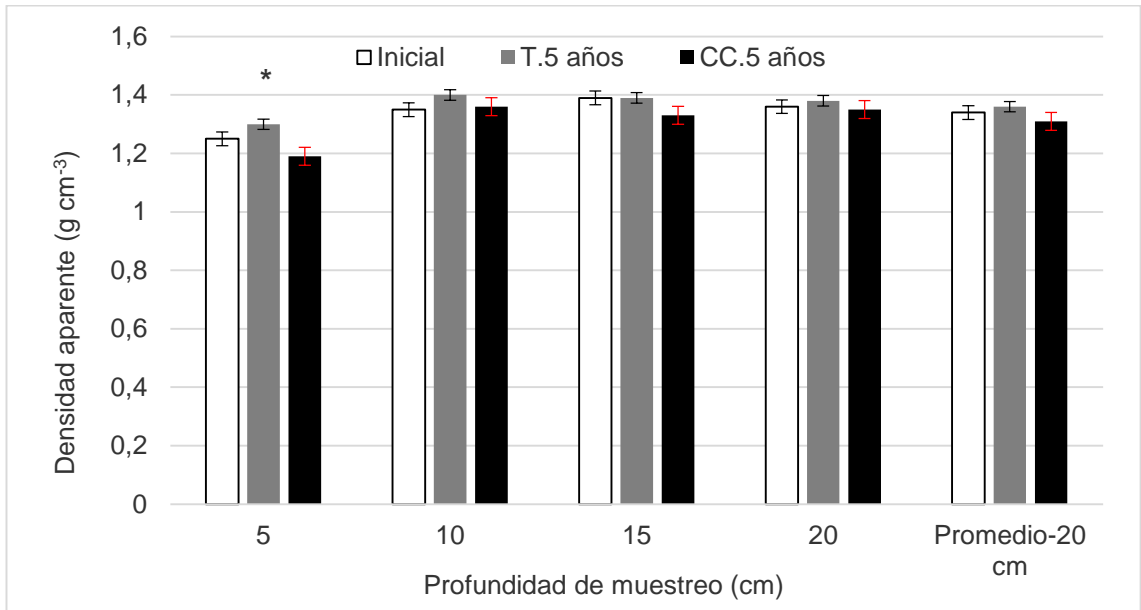


Figura 18. Densidad aparente inicial y al 5º año de efectos acumulados para los tratamientos testigo y con CC, evaluada a distintas profundidades del perfil del suelo. * indica diferencias significativas entre tratamientos en cada espesor evaluado ($p \leq 0,05$). CV: 5 cm: 5,28%; 10 cm: 3,54%; 15 cm: 6,0%; 20 cm: 5,50 % y 0-20 cm: 5,08%

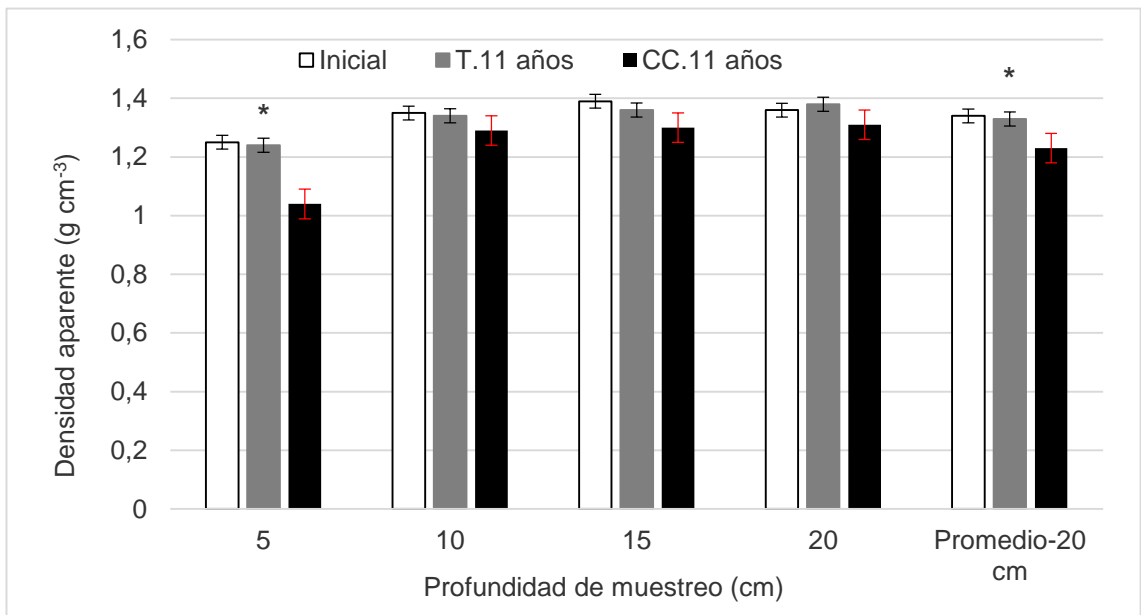


Figura 19. Densidad aparente inicial y al 11º año de efectos acumulados para los tratamientos testigo y con CC, evaluada a distintas profundidades del perfil del suelo. * indica diferencias significativas entre tratamientos a igual espesor evaluado ($p \leq 0,05$). CV: 5 cm: 7,0%; 10 cm: 5,0%; 15 cm: 5,0%; 20 cm: 5,0 % y 0-20 cm: 5,22%.

Si bien para la profundidad de 0-5 cm los valores de DA fueron bajos para todos los tratamientos, el T se diferenci6 de los CC por tener mayor densidad. Es importante destacar que si se compara con la situaci6n inicial (1^o a^o) A y R tuvieron una menor DA ($p \leq 0,05$). Estas diferencias estarían relacionadas con cambios en los contenidos de materia orgánica debido al aporte de biomasa de los CC. (Hamza y Anderson, 2005; Quiroga *et al.*, 2016) donde incrementos en la misma reducen la susceptibilidad a la compactaci6n por mayor resistencia a la deformaci6n y/o en la elasticidad, incrementándose la porosidad total principalmente a expensas de la macroporosidad. Al respecto, Quiroga *et al.* (1999) comprobaron, para Molisoles de la Regi6n Semiárida Pampeana, que disminuciones significativas en la conductividad hidrúlica estuvieron asociadas con descensos en los contenidos de materia orgánica. En base al estudio sobre indicadores físicos de compactaci6n donde fueron evaluados suelos bajo monocultura de soja de 9 de Julio y Bolívar (Quiroga *et al.*, 2016), y considerando los valores de densidad aparente máxima (aproximadamente $1,55 \text{ gr cm}^{-3}$) se puede establecer que la misma se corresponde con un 42 % de PT. En las Figuras 20 y 21 se han representado los perfiles de porosidad total para los tratamientos T y CC; al inicio, 5^o y 11^o a^o. En la misma se ha representado la PT correspondiente a la densidad aparente máxima, valor considerado crítico para un adecuado desarrollo de las raíces y al cual se hace referencia cuando se calcula la compactaci6n relativa (Taboada y Micucci, 2008). De la misma manera, Quiroga *et al.* (2016) evaluaron la densidad aparente bajo pastura de gramínea perenne de más de 20 a^os, localizada próxima al sitio experimental y sobre la misma serie de suelos (Norumbega). Bajo esta condici6n, considerada de referencia a buen manejo, se determin6 un valor promedio de PT de 62%, el cual también es representado en las Figura 21.

Este alto valor de PT normalmente se encuentra asociado a estructuras de tipo granular con una importante actividad biológica y presencia de raíces. En la Foto 10 se ilustra sobre el estado estructural del suelo en la condici6n de referencia mencionada.

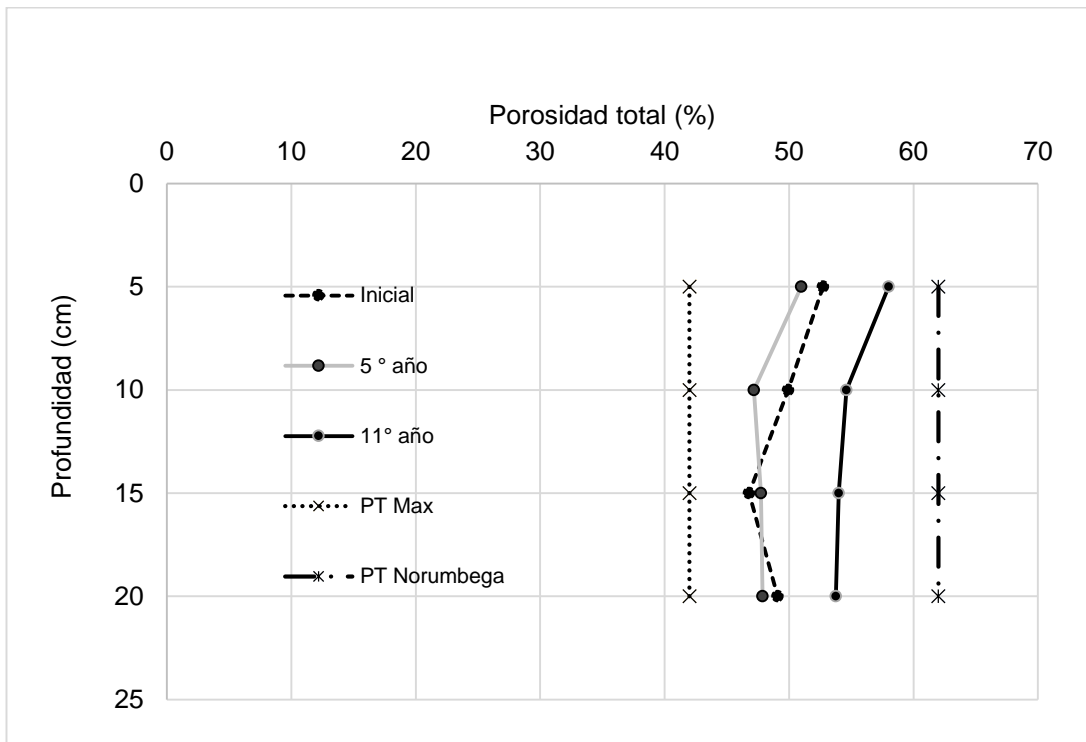


Figura 20. Porosidad total (%) a distintas profundidades evaluadas al inicio, 5° y 11° año de efectos acumulados en el tratamiento testigo con monocultivo de soja (T).

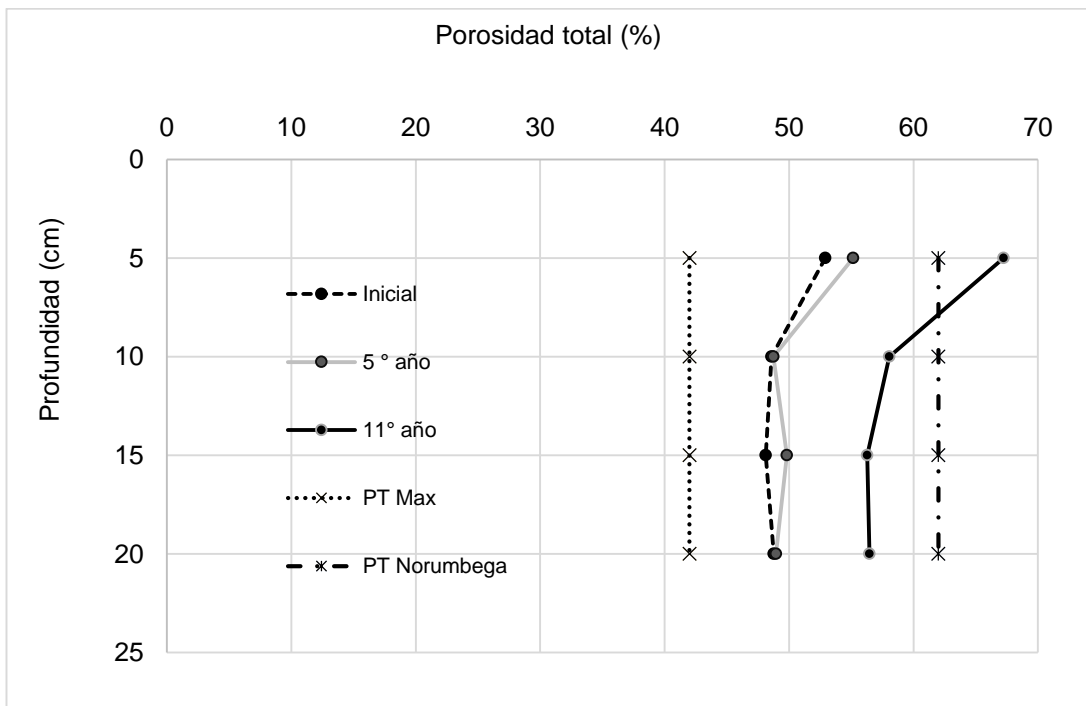


Figura 21. Porosidad total (%) a distintas profundidades evaluadas al inicio, 5° y 11° año de efectos acumulados en el tratamiento con inclusión de cultivo de cobertura (CC).



Foto 10. Agregación del suelo bajo pastura perenne de gramínea por más de 20 años, con porosidad total que supera el 60%. Serie de suelo Norumbega.

3.9. Efecto de los CC sobre la resistencia mecánica a la penetración (RMP)

La Figura 22 muestra la variación de la RMP en el perfil, para los distintos tratamientos, con contenidos de humedad del suelo superiores al 80% de agua útil: Humedad volumétrica de 31% (0-20 cm), 29% (20-40 cm) y 26% (40-60 cm).

Los resultados evidenciaron que el suelo bajo CC presentó menores valores de RMP que bajo monocultura de soja, sin diferencias significativas entre A y R. En el estrato de 15-20 cm se registraron valores de RMP que superaron los 1500 KPa, a partir de los cuales pueden presentarse restricciones para el desarrollo de las raíces de algunos cultivos. Valores que oscilan entre 2000 KPa (Gil *et al.*, 2005) y 2500 KPa (Hamza y Anderson, 2005) son mencionados como críticos para el normal desarrollo radicular. Si bien estos valores no se alcanzaron en ninguno de los tratamientos, es importante destacar que, en promedio, el testigo presentó un 23,2 % más de RMP respecto de los CC de A y R (0-50 cm espesor de suelo). Además se encontraron diferencias ($p \geq 0,10$) entre CC respecto al T hasta el espesor 0-10 cm, sin embargo no se registraron diferencias significativas entre A y R. En el estrato de 0 – 5 cm la diferencia entre los CC y el T fue de 189% y del 44% en el estrato de 5 -10 cm (Tabla 6).

Cuando se realizó un análisis de regresión lineal simple a todo el perfil del suelo no se comprobó relación entre la RMP con biomasa aérea aportada ($MS \text{ kg ha}^{-1}$) por los CC ni con los contenidos de humedad del suelo (R^2 : 0,04 y 0,05, respectivamente). Sin embargo, cuando se realizó el análisis, por estrato de suelo (intervalos de 2,5 cm) se observaron relaciones significativas positivas con MS hasta el espesor 12,5 cm (Tabla 7).

En función de distintos factores que inciden sobre la RMP (humedad, porosidad, textura, densidad aparente, materia orgánica) los resultados obtenidos por diversos investigadores no permitió concluir, sobre los efectos de los CC. Por ejemplo, Scianca (2010) determinó sobre un Hapludol de Gral. Villegas que los CC tuvieron en promedio una mayor RMP que el testigo sin CC, diferencias que en un 70% fueron explicadas por variaciones en la humedad del suelo. Sin embargo, cuando realizó evaluaciones sobre los mismos tratamientos establecidos sobre un Argiudol de la localidad de Florentino Ameghino, comprobó que los mayores valores de RMP correspondieron al tratamiento testigo y que no se registró relación significativa con los contenidos de humedad del suelo.

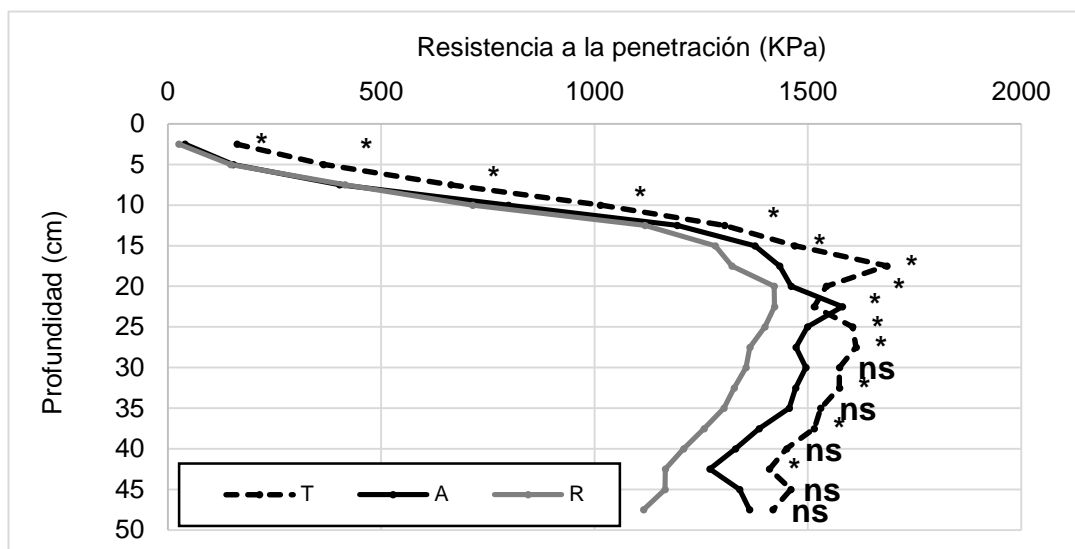


Figura 22. Valores de resistencia mecánica a la penetración (KPa) luego de 11^o años de efectos acumulados de los distintos tratamientos: T = control sin CC, A = con CC de avena, R = con CC de rye grass. * indican diferencias significativas entre tratamientos y ($p \geq 0,10$) a igual nivel de profundidad. CV: 23,52%

Tabla 6. Valores de resistencia mecánica a la penetración luego de 11^o años de efectos acumulados: T = control sin CC, A = con CC de avena, R = con CC de rye grass. Medias con letra distinta son significativamente diferentes ($p \geq 0,10$, entre tratamientos a igual nivel de profundidad).

Profundidad	T	A	R
(cm)	RMP (KPa)		
0 - 2,5	162 b	40 a	26 a
2,5 – 5	365 b	153 a	147 a
5-7,5	663 b	402 a	415 a
7,5-10	1014 b	798 a	714 a

Tabla 7. Coeficiente de determinación R^2 para distintos estratos del perfil del suelo donde se comprobaron relaciones significativas entre RMP y biomasa aérea de los CC ($MS\ kg^{-1}\ ha^{-1}$).

Profundidad (cm)	Correlación (R^2) entre Biomasa aérea ($MS\ kg\ ha^{-1}$) y RMP
2,5	0,90
5,0	0,94
7,5	0,97
10,0	0,77
12,5	0,65

En este estudio, los menores índices de RMP registrados bajo CC en los estratos superiores del suelo, (Figura 22) están relacionadas con el aporte de biomasa aérea

(Tabla 7), Sin embargo, la mayor concentración de raíces de las gramíneas en estratos superiores del perfil (0-20 cm) tienen un efecto positivo sobre la porosidad del suelo (Fernández *et al.*, 2016 y , Oderiz *et al.*, 2017) en estudios realizados sobre Ustoles del este de La Pampa comprobaron en cereales de invierno utilizados como CC que la biomasa de raíces fue equivalente al 40-60 % de lo producido por la parte aérea. Además, Frasier *et al.*, 2014 y 2016), determinaron en Éntisoles y Molisoles de la Región Semiárida Pampeana que el 80% del aporte de las raíces tiene lugar en los primeros 20 cm del perfil. En otro estudio, Fernández *et al.* (2016) atribuyeron que el CC de R presentó hasta los 20 cm de profundidad valores significativamente inferiores de RMP, atribuyéndole, a las raíces el “efecto descompactador”. Naturalmente, la inclusión de CC tendría un rol fundamental en la sostenibilidad de los sistemas de producción, principalmente en suelos con alta proporción de arena donde los bajos contenidos de coloide inorgánico condicionan un escaso desarrollo de la estructura de los suelos (Quiroga *et al.*, 2016).

El aporte de biomasa aérea y radicular por parte de los CC resultaría estratégico en la conservación en suelos de baja calidad textural, principalmente cuando son expuestos a monocultivos con bajos aportes de residuos y niveles de cobertura.

Análisis de componentes principales (ACP)

Con la finalidad de interpretar el grado de asociación entre variables edáficas y la distribución de los tratamientos en el plano de las componentes principales, se realizó el correspondiente análisis que se presenta en la Figura 23. Teniendo en cuenta que los principales efectos de los CC sobre las propiedades edáficas han tenido lugar en el estrato superior del perfil, el ACP se realizó con los resultados del mismo. Las primeras 2 componentes CP1 (75%) y CP2 (10%) explicaron el 85% de la variabilidad. La CP1 se encuentra determinada en mayor grado por la infiltración (INF-0,95), inestabilidad estructural (IE-0,91), densidad aparente (DA-0,90), eficiencia de barbecho (EB-0,91) y resistencia a la penetración (RP-0,86). Por su parte en CP2 se encuentra determinado principalmente por la concentración de carbono orgánico total (COT-0,60).

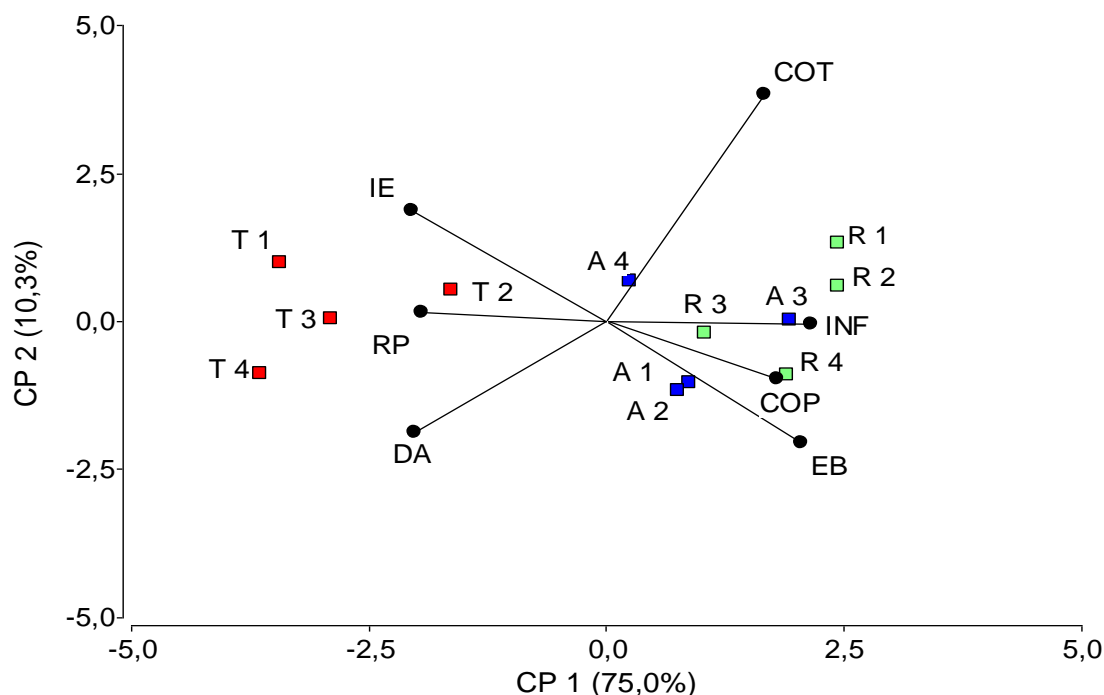


Figura 23. Análisis de componentes principales. Distribución de los tratamientos (T: testigo, A: avena y R: rye grass) en el plano de las primeras dos componentes principales. DA (densidad aparente g cm^{-3}), INF (infiltración mm h^{-1}), RP (resistencia a la penetración KPa), COP (carbono orgánico particulado, %), COT (carbono orgánico total, %), IE (inestabilidad estructural), EB (eficiencia de barbecho, %).

Los resultados muestran que la captación del agua (INF) se relaciona positivamente con el COP (p 0,09) y negativamente con la DA (p 0,0001) y la IE (p 0,003). Variables como la DA, IE y RP se relacionan positiva y significativamente entre si y negativamente con el COP. Por su parte la eficiencia de almacenaje de agua durante el barbecho se relaciona positivamente con la captación del agua (p 0,0003) y el COP (p 0,009) y negativamente con la DA (0,01). En este contexto, la distribución de los tratamientos en el plano de las CP muestra que los suelos de ambos CC (estrato superficial del perfil) se diferencian del testigo por presentar mayor COP e INF. Por su parte el testigo (representado a partir de cada unidad experimental) se localiza en el sector de mayor DA, RP e IE y valores más bajos de COP, INF y EB. A partir del ACP es posible integrar información que permite visibilizar los efectos acumulados en 11 años de la inclusión de CC en monocultura de soja establecida sobre un Hapludol franco arenoso. Es importante aclarar, como se expresó en apartados anteriores, que teniendo en cuenta la condición inicial parte de las diferencias en algunas variables se deben al efecto positivo de los CC (mejora respecto a la condición inicial) y parte al efecto negativo de la monocultura (cambios negativos respecto a la condición inicial). Si bien en la mayoría

de las variables no se comprueban diferencias significativas entre ambos CC, la tendencia es a una mejor condición del suelo bajo R.

3.10. Rendimiento del cultivo de soja

El rendimiento del cultivo de soja no fue afectado ($p \geq 0,05$) por la inclusión de CC, para el promedio general. Si bien, en promedio para los 11^o años, el rendimiento acumulado de soja presentó valores superiores sobre CC de avena, las diferencias no fueron significativas (Tabla 8). Asimismo, las secuencias soja-CC tuvieron mayor eficiencia de uso del agua. Cabe aclarar que el agua inicial del cultivo de soja comprende las del barbecho corto para los tres tratamientos.

Tabla 8. Rendimiento del cultivo de soja, uso consuntivo (UC) y eficiencia de uso de agua (EUA) en el periodo 2005-2015. Sin CC (T), avena (A) y rye grass (R). Letras diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas entre tratamientos para cada año evaluado y promedio. ($p \leq 0,05$).

* R.R: rendimiento relativo.

Año	Rendimiento (kg ha ⁻¹)			UC (mm)			EUA (kg grano ha ⁻¹ mm ⁻¹)		
	T	A	R	T	A	R	T	A	R
2005	3098 a	3051 a	3193 a	682 a	593 b	595 b	4,5	5,1	5,4
2006	4395 a	3840 b	4555 a	748 a	736 a	750 a	5,9	5,2	6,1
2007	4125 a	4290 a	4125 a	568 a	605 b	566 b	7,3	7,1	7,3
2008	1995 a	1979 a	1995 a	384 a	364 a	243 b	5,2	5,4	8,2
2009	4338 a	4120 a	4125 a	730 a	700 a	629 b	5,9	5,9	6,6
2010	4039 a	4255 a	4286 a	517 a	385 b	354 b	7,8	11,1	12,1
2011	3413 b	3853 a	3380 b	582 a	517 b	460 b	5,9	7,5	7,3
2012	4010 a	4195 a	4120 a	708 a	700 a	670 a	5,7	6,0	6,1
2013	4124 c	4792 ab	4454 b	665 a	732 b	614 b	6,2	6,5	7,3
2014	4477 b	5190 a	4771 b	492 a	516 a	489 a	9,1	10,1	9,8
2015	4883 b	6263 a	5900 ab	685 a	502 b	585 b	7,1	12,5	10,1
Acumulado	42897	45828	44904						
R.R. (%)	93,60	100	98,0						
Promedio 2005-2015	3900 a	4166 a	4136 a	615 a	577 a	541 a	6,4 a	7,5 b	7,8 b

CV para el promedio: 24,82; 23,91 y 29,24 % para rendimiento, UC y EUA, respectivamente.

Al considerar los usos consuntivos de soja sobre antecesores CC se comprobó un amplio rango de variación principalmente entre años (243 a 750 mm). Por su parte la eficiencia de uso del agua para los mismos tratamientos resultó menos variable (entre

5,1 y 12,5 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹) mostrando una tendencia del cultivo a ser más eficiente ante restricciones hídricas o bien más ineficiente ante mayores ofertas hídricas. En la Figura 24 se han representado los valores de EUA en función del uso consuntivo, comprobándose que a un menor UC se alcanzaron las mayores eficiencias en el uso del agua.

3.11. Eficiencia promedio global en el uso del agua durante el periodo de estudio

En todos los años la EUA fue mayor en la secuencia de CC - soja con respecto a la secuencia soja – soja (Tabla 9). Además, en el promedio de años, la mayor eficiencia la obtuvo la secuencia CC/A-soja, luego CC/R-soja y por último la secuencia soja-soja. Siendo 3,3 y 2,5 veces mayor la EUA en la secuencia con CC de A y de R que el T, respectivamente - EUA global, en el tratamiento T, se contempla el desarrollo de la vegetación espontánea durante la fase de barbecho largo - El tratamiento con CC/A-soja obtuvo una EUA de 35,3; CC/R-soja de 26,8 y el T de 10,7 kg Ms ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente. Similares resultados fueron obtenidos por Carfagno *et al.* (2013) sobre Hapludoles franco arenosos de 30 de Agosto, comprobando una mejora en la EUA por la inclusión de CC de A (32 kg Ms ha⁻¹mm⁻¹), CC de R (18,1 kg Ms ha⁻¹mm⁻¹) respecto al barbecho largo (8,5 kg Ms ha⁻¹mm⁻¹) en monocultivo de soja. El aporte de los CC, en la fase de barbecho, con el desarrollo de biomasa aérea y radicular resultó relevante para una mayor eficiencia en la captación, conservación y uso del agua de las precipitaciones. La inclusión de CC puede modificar significativamente la relación transpiración/evaporación Kruger y Quiroga (2013), especialmente durante el largo periodo de barbecho que media entre dos cultivos de soja sucesivos, evitando el principal factor de pérdida del agua a la atmósfera por evaporación, haciendo que pase por el proceso de transpiración generando biomasa a través de los CC. La EUA es un parámetro importante que define la productividad de los cultivos, especialmente en ambientes de oferta hídrica limitante y está muy influenciada por factores que afectan la transpiración y la asimilación a nivel de las hojas y de los cultivos (Carfagno *et al.*, 2013).

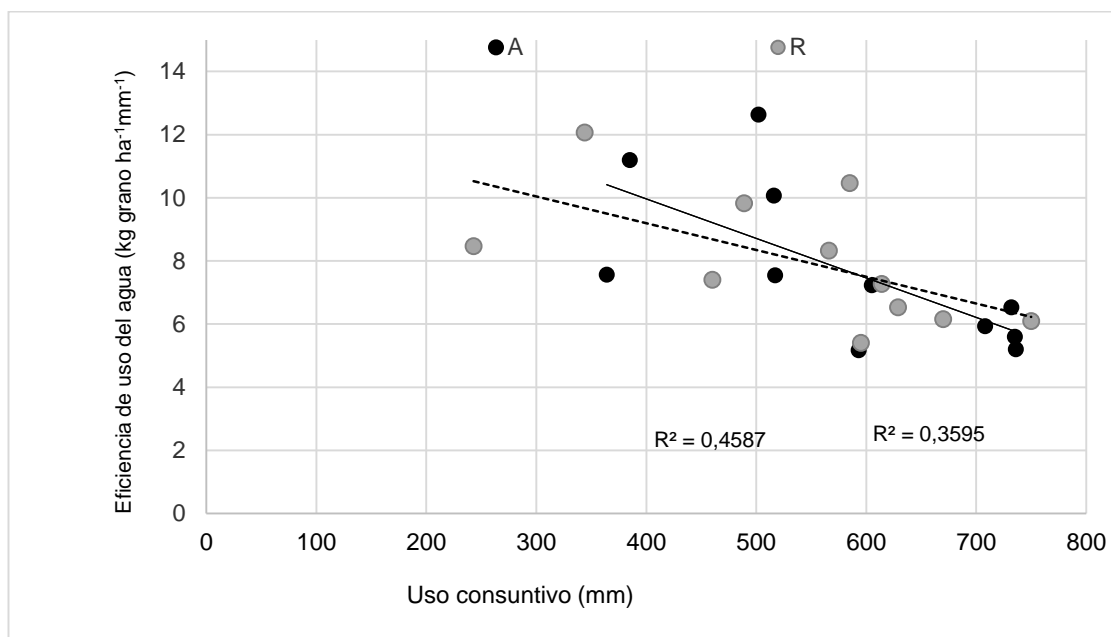


Figura 23. Eficiencias de uso del agua de soja ($\text{kg grano ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$) establecida sobre antecesores avena (A) y rye grass (R) en función de los usos consuntivos (mm).

Tabla 9. Eficiencia de uso del agua de cultivos de cobertura más soja (EUA) por año y promedio de la serie 2005-2015, del testigo (T *), con CC de avena (A) y de rye grass (R). Medias con letra diferente, en sentido horizontal, indican diferencias ($p \geq 0,05$) entre tratamientos. (T*) contempla la vegetación espontanea.

Año	EUA ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$)		
	T (*)	A	R
2005	9,5 c	48,0 a	39,4 b
2006	13,5 b	27,7 a	28,1 a
2007	10,7 c	31,4 a	23,3 a
2008	11,2 b	18,4 a	16,2 a
2009	9,7 b	24,6 a	20,2 a
2010	9,1 c	31,5 a	23,6 b
2011	7,2 b	23,2 a	20,0 a
2012	12,0 c	52,0 a	33,1 b
2013	13,5 c	56,5 a	29,9 b
2014	12,3 c	44,2 a	32,4 b
2015	8,9 b	30,6 a	29,0 a
Promedio 2005-15	10,7 c	35,3 a	26,80 b

El amplio rango de variación de EUA entre años, dentro de una misma especie y entre especies ha sido constatado por Carfagno *et al.* (2013), y posiblemente se relaciona con otros factores que afectan el desarrollo de los cultivos, tales como grupo de madurez, adversidades climáticas, enfermedades o prácticas culturales.

3.12. Nitrógeno en la biomasa aérea de cultivos de cobertura de avena y rye grass.

La Tabla 10 muestra las concentraciones y contenidos de nitrógeno (N) en la biomasa de los CC. El contenido de N en biomasa varió entre años en un amplio rango, tanto en A (37-148 kg N ha⁻¹) como en R (29-145 kg ha⁻¹).

La cantidad de N en biomasa aérea en ambos CC no fue influenciada por variaciones en la concentración de N entre años. Respecto a lo observado por Restovich *et al.* (2008) en Udoles de la región pampeana húmeda, no se comprobó un efecto de dilución del N al incrementarse la producción de biomasa. Debido a ello, se observó una estrecha relación en el N contenido en biomasa con la cantidad de biomasa producida (Figura 24). Si bien fue levemente superior en A que en R, las diferencias para el total del periodo evaluado no resultaron significativas.

Se determinó una relación lineal directa en A y R entre el contenido de N y la biomasa aérea producida por los CC.

En promedio, el contenido de N retenido anualmente por los cultivos de A y R no fue diferente (80 vs 70 kg de N ha⁻¹). Los valores de N retenidos son coincidentes con resultados de distintos estudios realizados sobre Ustoles y Udoles de la Región Pampeana donde se evaluaron inclusiones de centeno, avena y rye grass como cultivos de cobertura (Fernández *et al.*, 2005; Quiroga *et al.*, 2005; Scianca, 2010). Estos resultados mostraron la importancia y el valor estratégico, en la captura de N durante el largo período de barbecho (6 a 7 meses) que tiene lugar entre cultivos de verano, evitando la lixiviación del nutriente y mejorar el balance de C de los suelos.

Tabla 10. Concentración de nitrógeno en la biomasa aérea y contenido de nitrógeno absorbido de cada tratamiento según año de evaluación y promedio de los tratamientos avena (A) y rye grass (R). Letras minúsculas y mayúsculas iguales en sentido horizontal indican ausencias en concentración y en el contenido de N ($p < 0,05$), para el promedio 2005-2015. CV: 23% y 48,7% para concentración y contenido de N, respectivamente.

Año de evaluación	A		R	
	N (%)	Contenido en biomasa. (kg ha ⁻¹)	N (%)	Contenido en biomasa. (kg ha ⁻¹)
2005	1,16	148	1,25	145
2006	0,96	73	1,47	105
2007	1,36	84	1,74	69,3
2008	0,83	37,7	0,95	30,3
2009	1,22	57,0	1,35	47,3
2010	1,63	43,5	0,89	29
2011	0,93	50,3	0,76	35
2012	1,10	136	1,0	86
2013	1,12	113	1,35	92
2014	0,92	78	0,85	58
2015	0,78	60	0,91	75
Promedio 2005 a 2015	1,04 a	80,0 A	1,14 a	70,0 A

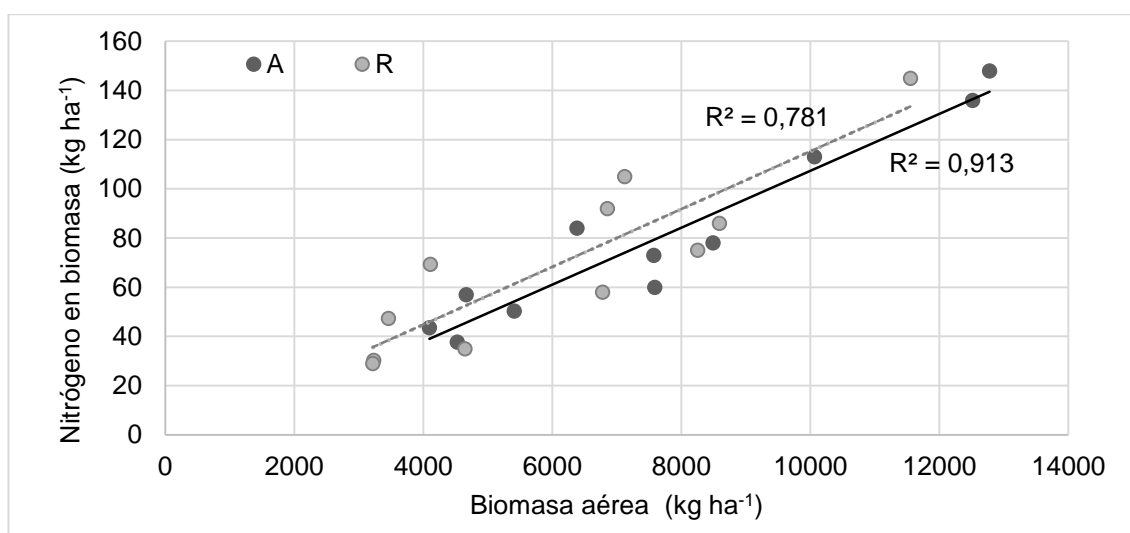


Figura 24. Contenido de N en biomasa aérea (kg N ha⁻¹) y biomasa aérea (kg MS ha⁻¹) en cultivos de cobertura de avena (A) y rye grass (R) para el periodo 2005-2015.

Los resultados expuestos en la Figura 25 abren algunos interrogantes, como por ejemplo ¿se generó mayor biomasa porque fue mayor la disponibilidad de N?, o ¿hay mayor contenido de N en biomasa porque precisamente se generó mayor biomasa?.

En la Figura 26 se aprecia la relación entre el contenido de N en biomasa y la eficiencia de uso del agua de los CC. No obstante, las eficiencias entre A y R, a bajos contenidos de N no se diferenciaron las EUA entre especies; a mayores contenidos de N, A resultaría más eficiente en el uso del agua que R, (a partir de los 100 kg ha⁻¹ de N en biomasa). Como se expresó en otros puntos, parte de estas diferencias podrían deberse a la mayor precocidad de la A.

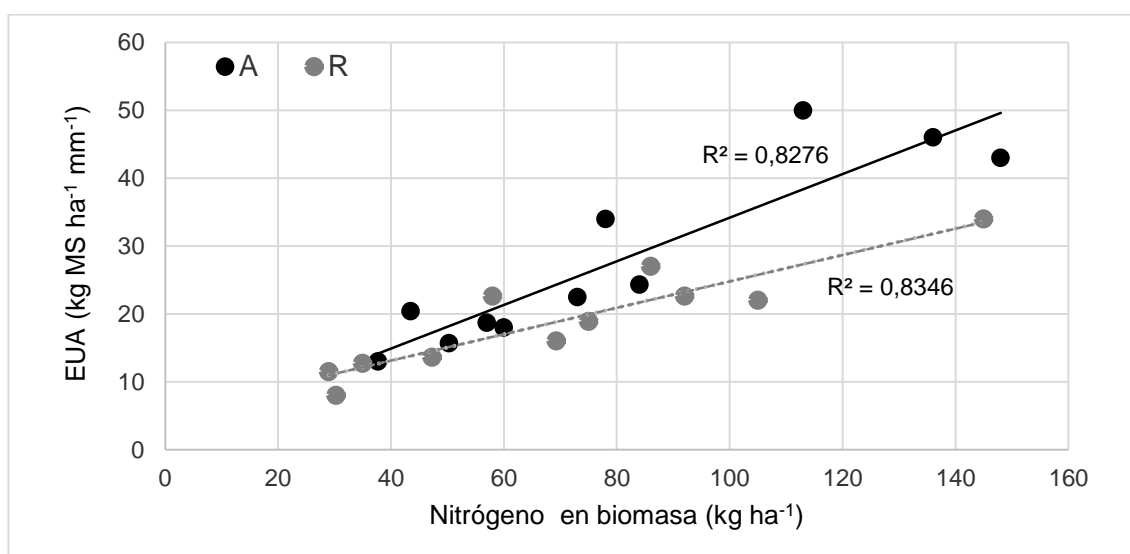


Figura 25. Eficiencia de uso del agua (kg MS ha⁻¹ mm⁻¹) de los cultivos de cobertura de avena (A) y rye grass (R), en función del contenido de N en biomasa aérea (kg MS ha⁻¹).

3.13. Efecto de los cultivos de cobertura sobre el desarrollo de malezas.

Al momento de suspensión del desarrollo de los CC se pudo determinar el efecto altamente significativo de las coberturas sobre la emergencia y desarrollo de especies vegetales consideradas malezas. La Figura 27 muestra la biomasa de malezas en el T, comprobándose un amplio rango de variación entre años (300-2500 kg MS ha⁻¹). El contenido de agua en el perfil del suelo determinado al inicio de los barbechos explicó un 50% de la variación de biomasa de malezas entre años, mientras que no se comprobó relación con las precipitaciones durante este periodo. Ambos CC redujeron en más de 90% la presencia de malezas respecto del T. La menor incidencia de malezas en los CC ha sido comprobada en numerosos estudios (Liebman y Davis, 2000; Fisk *et al.*, 2001; Fernández *et al.*, 2012; Alessandria *et al.*, 2012; Servera *et al.*, 2016; Trowe

et al., 2017) y da sustento a la posibilidad de reducir dosis y/o suprimir en algunos casos el uso de herbicidas durante los cultivos sucesores. Aunque la mayoría de los CC generalmente reducen el desarrollo de las malezas, las gramíneas pueden tener mayor y tempranamente control sobre las mismas, respecto a las leguminosas, ya que son más precoces en su desarrollando biomasa aérea / tasa de crecimiento y sistemas de radicular más rápido.

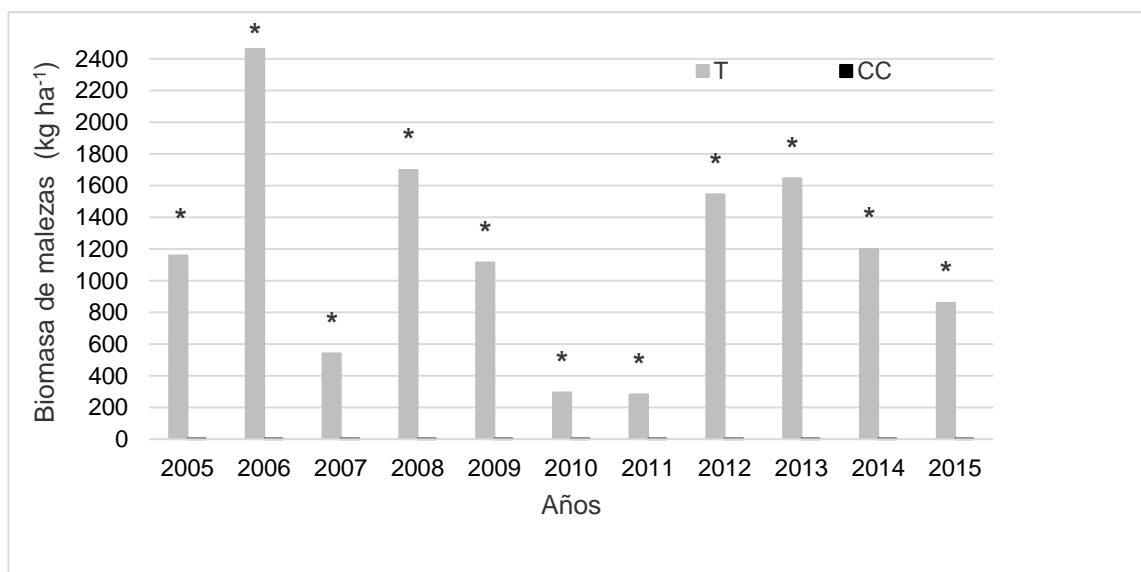


Figura 26. Biomasa aérea de malezas (kg MS ha⁻¹) expresada como diferencia entre los tratamientos testigo (T) y cultivo de cobertura (CC). * indica diferencia significativa entre tratamientos, ($p < 0,05$).

Esta significativa disminución de malezas ante la inclusión de A y R, comprobada también en experimentos realizados sobre Udoles de la Región Pampeana, podría ser atribuido a efectos competitivos y/o alelopáticos de los cereales de invierno (Pérez y Scianca, 2009), citado por Servera *et al.*, 2016. En este trabajo, se observó, que los CC inician rápidamente (7 a 10 días) su desarrollo cubriendo el suelo con su biomasa y en la captación de recursos impide el nacimiento de malezas, luego de la suspensión de su desarrollo, la biomasa es una barrera natural que impide la entrada de luz a la superficie del suelo, ralentizando la emergencia de plantas de desarrollo primavera-estival. Este aspecto posicionaría a los CC como una estrategia de manejo para control de la carga de malezas y planificar diferentes estrategias de uso de herbicidas. (Fotos en Anexo).

Complementariamente en la Figura 28 se presentó el número de las plantas en el tratamiento testigo de Rama negra (*Conyza bonariensis*) y Pensamiento silvestre (*Viola arvensis*), consideradas de difícil control en el cultivo de soja, además, han tenido un incremento durante las últimas campañas. Se determinó una supresión cercana al 100 % por la inclusión de CC. Estos resultados coinciden con Scianca (2010), que reportó, en dos años de evaluación, que los tratamientos con CC (centeno, avena y rye grass) tuvieron, significativamente menos malezas que el testigo. Respecto a la biomasa generada por los CC, Ruis *et al.*, 2020, sostienen que la misma, debería ser lo suficientemente elevada, ($> 3 \text{ Mg ha}^{-1}$) para tener capacidad de supresión de malezas.

En la Tabla 11 se presentan los herbicidas utilizados para cada tratamiento en el periodo de estudio. Los resultados muestran que la inclusión de CC y la influencia sobre el desarrollo de las malezas posibilitaron una reducción del 30 al 50% en el uso de herbicidas, en consecuencia se determinó una leve incidencia ambiental (EIQ), mientras que en la secuencia soja-soja fue moderada-alta. La inclusión de los CC redujo el índice de impacto ambiental en un 38,6%, respecto al testigo, en coincidencia con Baigorria, *et al.*, (2019).

Comunicación personal de grupos de productores (CREA Oeste Arenoso) del norte de La Pampa, sur de Córdoba y oeste de Buenos Aires indican que los CC han simplificado en muchos casos el control de las malezas con reducciones de un 40% en el uso de herbicidas. Cuando el corte del ciclo de los CC se realizó mediante el uso de rolos la reducción del empleo de herbicidas en el cultivo principal fue menor. Estos resultados sustentarían el empleo de CC en estrategias de mitigación de malezas.

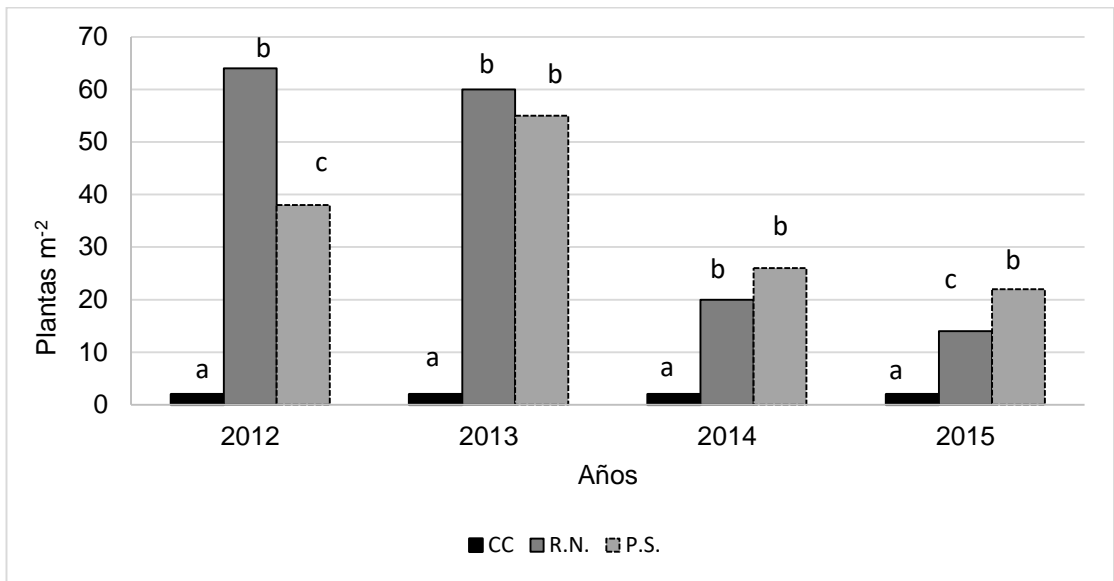


Figura 27. Número de malezas (m^{-2}) de Rama negra (*Conyza bonariensis*) y Pensamiento silvestre (*Viola arvensis*) expresada como diferencia entre tratamiento testigo (R.N y P.S) y CC. Letras minúsculas, indican diferencia significativas entre CC y T ($p < 0,05$). CV: 93 y 54 % para Rama negra y Pensamiento silvestre, respectivamente.

Tabla 11. Herbicidas utilizados en barbecho, pre siembra y en el cultivo de soja en el periodo 2005-2015. En Testigo (T) y cultivo de cobertura (CC). Siendo U\$S/ha (dólares por hectárea).

	T	CC						
Años	Momento				Momento			
(N°)	de aplicación	Producto	dosis	U\$S/ha	de aplicación	Producto	dosis	U\$S/ha
1,2,3	Barbecho	Glifosato	3	12,50	Secado	Glifosato	3	12,50
		Metsulfurón	0,005	0,1526				
	Pre siembra	Glifosato	3	12,50	En el cultivo	Glifosato	3	12,50
	de soja	Clorimuron	0,04	0,960	de soja	Clorimuron +	0,04	0,960
	En el cultivo	Glifosato + aceite	3+0,5	14,0		aceite	0,5	1,28
Sub total				40,11				27,24
4	Barbecho	Glifosato	3	12,50	Secado	Glifosato	3	12,50
		Metsulfurón	0,005	0,1526				
	Pre siembra	Glifosato	3	12,50	En el cultivo	Glifosato	3	12,50
	de soja	Clorimuron	0,04	0,960	de soja	Clorimuron +	0,04	0,960
		Brodal	0,15	6,60		aceite	0,5	1,28
	En el cultivo	Glifosato + aceite	3+0,5	14,0				
Sub total				46,71				27,24
5 a 11	Barbecho	Glifosato	3	12,50	Secado	Glifosato	3	12,50
		Metsulfurón	0,005	0,1526				
	Pre siembra	Glifosato	3	12,50	En el cultivo	Glifosato	3	12,50
	de soja	Clorimuron	0,04	0,960	de soja	Clorimuron +	0,04	0,960
		Brodal	0,15	6,60		aceite	0,5	1,28
		Spider	0,04	11,76				
	En el cultivo	Glifosato + aceite	3+0,5	14,0				
Sub total				58,47				27,24
Total	11 años			576,33				299,64

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten las siguientes conclusiones sobre las preguntas planteadas en la hipótesis del trabajo.

(i) Los CC incrementan el carbono orgánico total y particulado en Hapludoles énticos, como consecuencia de un mayor aporte de biomasa aérea, respecto de la monocultura de soja.

La incorporación de especies invernales a sistemas de agricultura continua con soja en suelos de textura franco arenosa de régimen Údico presentó cambios en el carbono total y particulado. El aporte promedio de biomasa aérea fue de 8000 kg ha⁻¹ en ambas coberturas invernales generando cambios, principalmente en los primeros 10 cm del perfil en el carbono total y particulado respecto al testigo, que modificaron, la densidad aparente (16 % entre CC vs T) y la porosidad total (22%). Las diferencias que explicaron estos cambios, por efectos acumulados, fue el mayor contenido de C (5,5 Mg C ha⁻¹). El 56% de la variación registrada se produjo por la disminución en el T y el 44% a incrementos por inclusión de los CC.

Estos resultados, permitirían aceptar y afirmar la hipótesis prescripta puesto que los efectos acumulados de biomasa aérea y el mantenimiento sobre la superficie del suelo, han incrementado el C y conservado la macroporosidad en los estratos superiores del perfil - en suelos altamente vulnerables como lo son los Hapludoles énticos de la Pampa Arenosa -

(ii) los CC mejoran la captación del agua de las precipitaciones como consecuencia de una mayor infiltración, estabilidad estructural y resistencia mecánica a la penetración.

Los aportes de biomasa generado por los CC provocaron cambios significativos en la dinámica de agua, evaluados a través de una mejora en la infiltración acumulada en el 1° 5° y 11° año, este indicador presentó una reducción en el T del orden del 70 %. En promedio, la infiltración de los CC fue un 132% mayor respecto al T. Estos resultados están asociados a la biomasa aérea y mejoras en la porosidad total y a una proporción mayor de agregados de > 8 mm generados por los de CC respecto a la situación T. En consecuencia la inestabilidad estructural del T, en promedio fue mayor 23% y 25% en los espesores 0-10 y 10-20 cm, respectivamente. Adicionalmente, la resistencia mecánica a la penetración, registró disminuciones del 23 % respecto de la situación T. Varios de estos indicadores responden a una mayor conservación de la humedad relacionada a la cobertura generada por la biomasa aérea, aumentos de la infiltración y proporción de C responsable de mejoras en la distribución y estabilidad de la estructura.

Este aporte de biomasa resultó fundamental para el proceso de conservación de suelos franco-arenosos, de alta vulnerabilidad a las degradaciones físicas debido a una larga secuencia agrícola con alta frecuencia de soja. Considerando las contribuciones positivas nos permite afirmar y aceptar la hipótesis planteada.

(iii) los CC contribuyen a mejorar la eficiencia de uso de agua y a reducir la presión de malezas y agroquímicos del sistema.

En el análisis sobre probabilidades de precipitaciones se estableció, para el periodo de desarrollo de los CC y para el ciclo de soja que las mismas estarían cubriendo, en el rango del 50 a 80 % los requerimientos hídricos de ambas especies invernales y el cultivo de renta. El promedio de MS ha⁻¹ fue de 8969 y 7195 kg, para A y R. Asimismo la descomposición media de la biomasa aérea de A y R, en el tiempo. El tiempo necesario para descomponer el 50 % de la materia seca, fue de 95 y de 99 días para A y R, respectivamente. En todos los años, la eficiencia global de uso del agua EUA del sistema (kg MS ha⁻¹ mm⁻¹) fue mayor cuando se incorporaron los CC, diferenciándose significativamente A de R. La secuencia soja-soja realizó mayor uso de agua con diferencias respecto de A y R, sin embargo, EUA fue menor. La introducción de A y R, mejoró la eficiencia de uso de agua. Es importante destacar que con niveles de captura de 100 kg N en biomasa la EUA en A, mejoró un 36%, respecto a R. La eficiencia de barbecho (EB %) fue mayor en las secuencias con CC y no se evidenciaron diferencias significativas entre A y R. El costo hídrico de la secuencia CC-soja no se diferenció significativamente de la secuencia soja-soja. Indicando la importancia de considerar el uso de los CC, ya que mejoró el uso de agua global. Estos incrementos el uso del agua, por reducción en la evaporación o percolación a estratos profundos, con la secuencia CC-soja, permitió que la gestión de la interfase suelo-planta-atmósfera impacte en la relación evaporación/evapotranspiración, asociado a la acumulación de biomasa en superficie. Al fraccionar el análisis, de acuerdo al periodo fisiológico del cultivo, se observó una mayor correlación para el período crítico de formación de vainas y granos. Considerando, que en la secuencia CC-soja, no presentó diferencias en los rendimientos del cultivo principal de renta, tuvieron mayor EUA (kg MS ha⁻¹mm⁻¹) y EB (%), adicionalmente, se determinó, un efecto altamente significativo de las coberturas sobre la emergencia y desarrollo de especies vegetales consideradas malezas se acepta la hipótesis planteada. Concluyéndose, que la adopción de los CC, no implicaran aumentos en los niveles de riesgos hídricos (deficit) para el cultivo de soja. Por el contrario, en el proceso, se aportará al sistema, un conjunto de beneficios (construcción

y mantenimiento de indicadores de salud del suelo), generando un sistema de gestión virtuoso respecto a la monocultura de soja.

Por lo expuesto y en relación con los resultados obtenidos en las propiedades físicas del suelo - carbono, infiltración, estabilidad estructural, porosidad, resistencia mecánica a la penetración y eficiencia en el uso del agua, captura de nutrientes (N), cobertura del suelo y mitigación de malezas se confirma y sostienen las hipótesis planteadas.

En esta Tesis se ha abordado el impacto que tendrían los CC de A y R, en el largo plazo sobre los suelos Hapludoles énticos. Se ha comprobado que estas gramíneas serían una alternativa para mantener y/o mejorar los indicadores de salud del suelo, obteniendo conocimiento sobre comportamiento como CC, además de contribuir a futuras preguntas/líneas; sobre el sistema y las complejidades suelo-planta y atmosfera. Sin embargo, las mejoras, serán consecuencias de procesos que se expresaran de acuerdo a la sensibilidad en su metodología (tipo y profundidad evaluada) y en distintas magnitudes en el tiempo. Asimismo, los beneficios en el corto plazo se manifestarán en la infiltración del agua pluvial, la eficiencia de barbecho y uso del agua, además de la reducción de especies vegetales consideradas malezas. En el mediano plazo se obtendrán efectos sobre el carbono y la relación COT/COP en los 0-10 cm del espesor del suelo, estabilidad estructural y en la resistencia mecánica a la penetración.

Futuros estudios deberán contemplar análisis en diferentes estratos del suelo en la captura y ciclado del C y nutrientes. Asociado a la acumulación de biomasa aérea y radicular, sobre la actividad microbiana y otros indicadores de salud del suelo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Acciaresi, H y Principiano, M. (2020). Estado de situación del uso de herbicidas en cultivos extensivos agrícolas de la región norte de la provincia de Buenos Aires. Web EEA INTA Pergamino. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12123/7146>.
- Adetunja, A., Ncube, B., Mulidzic, R., Lewu, F. (2020). Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. *Soil & Tillage Research*. Vol. XX. DOI: 10.1016/j.still.2020.104717.
- Aguilar, J., Gramig G., Hendrickson J., Archer D., Forcella F., Liebig M. (2015). Cambios en la diversidad de especies de cultivos en los Estados Unidos: 1978–2012. *Plos One*, Sección Artículos. Recuperado de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136580>.
- Aita, C. y Giacomini, S. (2003). Descomposicao e liberacao de nitrogenio de residuos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Vol 27 (4), pp. 601-612. Recuperado de Rev. Bras. Ciênc. Solo 27 (4). DOI: 10.1590/S0100-06832003000400004.
- Alessandria, E., Arborno, M., Leguía, H., Pietrarelli, L., Sanchez, J., y Zamar, J. (ex Aequo). (2013). Introducción de cultivos de cobertura en agroecosistemas extensivos de la región central de Córdoba. En: *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. De Álvarez, C., Quiroga, A., Santos, D., Bodrero, M. (Eds.). INTA EEA Anguil, La Pampa. Capítulo 16, pp.128-137.
- Álvarez, R y Steinbach, H. (2006). Balance de carbono en suelos cultivados. En materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Ed. Pascale A.J. Editorial FAUBA, pp 55-67.
- Álvarez, R., Steinbach H. y De Paepe J. (2017). Los efectos de los cultivos de cobertura en los suelos y los cultivos posteriores en las pampas: Metanálisis. *Soil & Tillage Research*. (170) pp. 53–65.
- Álvarez, C., Barraco M., Díaz Zorita M., Scianca C. y Pecorari, C. (2005). Uso de cultivos de cobertura en rotaciones con base soja: Efecto sobre algunas propiedades edáficas y rendimiento de los cultivos en un Hapludol Típico del Noroeste bonaerense. *Boletín de divulgación técnica N° 87. Aspectos del manejo de los suelos en sistemas mixtos de las regiones semiáridas y subhúmeda Pampeana*. (87), pp. 19-23.
- Álvarez, C., Scianca, C., Barraco, M y Díaz Zorita, M. (2006). Impacto de cereales de cobertura sobre propiedades edáficas y producción de soja. CD de Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 19 al 22 de septiembre. Salta-Jujuy, Argentina.
- Álvarez, C., Scianca, C., Barraco, M. y Díaz Zorita, M. (2008 a). Impacto de diferentes secuencias de cultivos en siembra directa sobre propiedades edáficas en Hapludoles de la pampa arenosa. CD de Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. 13 al 16 de mayo de 2008, Potrero de los Funes (San Luis).
- Álvarez, C., Scianca, C., Barraco, M. y Díaz Zorita, M. (2008 b). Impacto de diferentes secuencias de cultivos en siembra directa sobre propiedades edáficas en Hapludoles de la pampa arenosa. CD de Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. 13 al 16 de mayo de 2008, Potrero de los Funes (San Luis).

- Álvarez, C., Scianca, C., Barraco, M. y Díaz Zorita, M. (2010). Cambios en suelos bajo siembra directa con cereales de invierno como cobertura. CD de Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Argentina.
- Álvarez, C., Barraco, M., Cazorla, C., Colazo, J. Herrero, J., Lardone, A., Girón, P., Restovich, S., y Rillo, S. (2016). Mejora de propiedades edáficas con inclusión de coberturas en agrosistemas pampeanos. Actas XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 27 de junio al 1 de julio, Rio Cuarto (Córdoba), Argentina.
- Álvarez, R., Santanatoglia, O. P., Brazzola, G. y Russo, M. (1994). Descomposición de rastrojo de soja en bolsas de residuos de distinto tamaño de poro. *Revista Ciencia del Suelo*, Vol. 12, pp. 63-67.
- Álvarez, R. y Steinbach, H. (2006). Balance de Carbono en suelos cultivados. En M.O., *Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos* (pp.55-67) Buenos Aires: Editorial FAUBA.
- Álvarez, C.R y Taboada, M.A. (2008 b). Indicadores de la fertilidad física del suelo. En *Fertilidad Física de los suelos* (pp. 155-180). C.A.B.A.: Editorial Facultad de Agronomía. 2° Edición.
- Álvarez, C., Álvarez, R., Costantini, A. y Basanta, M. (2014). Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). *Soil & Tillage Research*. [www.elsevier.com/locate/shttp://dx.doi.org/10.1016/j.still](http://dx.doi.org/10.1016/j.still).
- Amezketá, E., Singer, M. y Le Bissonnais. (1996). Testing a New Procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Science Society of American Journal*, Vol.60, pp. 888-894.
- Andrade, F.H., y Sadras, V.O. (2000). Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Andrade, F.H., y Sadras, V.O. (Ed.), *Bases para el manejo del maíz, girasol y soja* (pp. 175-203). Balcarce: Editorial. E.E.A. Balcarce INTA – FCA, UNMdP.
- Andriani, J.M. (2000). Crecimiento de las raíces en los principales cultivos extensivos en suelos Hapludoles de la provincia de Santa Fe. En: *El agua en los sistemas productivos para mejorar la producción, INTA Oliveros-Santa Fe*, (13) (pp. 35-39).
- Andriulo, A. y G. Cordone. (1998). Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos de la región pampeana húmeda. En: *Siembra directa, Panigatti J.L. (Ed.)*, pp. 65-96. Buenos Aires: Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación. INTA.
- Andriulo, A., Guerif, J. y Mary, B. (1999). Evolution of soil carbon with various cropping sequences on the rolling pampas. Determination of carbon origin using variations in natural ^{13}C abundance. *Agronomie, EDP Sciences*, 19 (5), pp. 349-364.
- Andriulo, A., Irizar, A., Garcia, L., Hanuch, L. y Rimatori, F. (2008). Efecto de los monocultivos de soja y maíz sobre el aporte de carbono y algunas propiedades edáficas luego de 20 años bajo siembra directa. CD de Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 13 al 16 de mayo de 2008, Potrero de los Funes (San Luis), Argentina.

- Baigorria, T., Álvarez, C. y Cazorla, C. (2019). Impacto ambiental y rolado de cultivos de cobertura en producción de soja bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 37 (2), pp. 355-366.
- Basanta, M., Giubergia, J., Lovera E., Alvarez, C. A., Martellotto, E., Curto, E. y Viglianco, A. (2008). Manejo del barbecho invernal y su influencia en la disponibilidad hídrica para el cultivo estival en un Haplustol de la Región Central de Córdoba. CD de Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 13 al 16 de mayo de 2008, Potrero de los Funes (San Luis), Argentina.
- Basche, A. y DeLonge, M. (2019). Comparación de las tasas de infiltración en suelos manejados con métodos de cultivo convencional y alternativo: Metanálisis. *Journals Plos*. DOI: 10.1371/journal.pone.0215702
- Bathke, G y Blake, G. (1984). Effects of soybean on soil properties related to soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 48, pp. 1398-1401
- Blanco Canqui, H., y Ruis, S. (2018). No-till and the soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164–200. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>.
- Blanco Canqui, H., Shaver, T., Lindquist, J., Shapiro, C., Elmore, R., Francis, C. y Hergert, G. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Crop Science Society of America and Soil Science Society of America*. (107), pp. 2449-2474. DOI: 10.2134/agronj15.0086.
- Barraco, M., Scianca, C., Lardone, A., Álvarez, C. y Diaz Zorita, M. (2012). Cereales de Invierno como cultivos de cobertura en secuencias continuas de soja. En: *Cereales de invierno*. Investigación científico técnica desarrollada por el INBA (CONICET/FAUBA). Azul (CIC-PBA/FIBA/FAUNCPBA), Facultad de Agronomía UBA y Facultad de Agronomía UNCPBA (pp. 231-238). Tandil: UNCPBA.
- Barzman, M., Bárberi, P., Birch, A. (2015). Ocho principios del manejo integrado de plagas. *Agronomía para el desarrollo sostenible. Agronomy for Sustainable Development*, 35, pp. 1199–1215. DOI: 10.1007/s13593-015-0327-9.
- Beale, O., Nutt, G. y Peele, T. (1955). The effects of mulch Tillage on Runoff, erosion soil properties and crop yield. *Soil Science Society of America Journal*.V.19. (2) pp 244-247. <https://DOI.org/10.2136/sssaj1955>.
- Boccolini, M., Cazorla C., Galantini, J., Belluccini, P. y Baigorria, T. (2020). Cultivos de cobertura disminuyen el impacto ambiental mejorando propiedades biológicas del suelo y el rendimiento de los cultivos. En: Revista *RÍA*, Vol. 45 (3). Recuperado de <http://ria.inta.gob.ar>.
- Bonvecchi, V., Costa, M., Irigon, J., Dettier, A., Bulos, L. y Rutti, S. 2014. Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Actas en CD.
- Borket, C., Almeida Gaudencio, C., Pereira, J., Régis Pereira, L. y Oliveria, A. (2003). Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, Vol. 38 (1), pp. 143-153.
- Bronick, C., y Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124 pp.3-22. Doi.10.1016/ j. geoderma.

- Buratovich, M. y Acciaresi, H. (2019). Manejando malezas con cultivos de cobertura: una alternativa tecnológica para disminuir el uso de herbicidas. *Revista de Tecnología Agropecuaria - RTA* 10 (39), pp. 51-55 (Abril 2019).
- Callegari, A., Mondardo, A., Bulisani, E., Wildner, L., Costa, M.B., Alcântara, P., Miyasaka, S. y Amado, T. (1993). Aspectos generales sobre los abonos verdes. En *Abudadação verde no sul do Brasil* (pp.346). Rio de Janeiro: AS-PTA, 2° Ed.
- Carfagno, P., Eiza, M., Quiroga, A. y Babinec, F. (2008). Cultivos de cobertura: efecto sobre la dinámica del agua en el suelo. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Actas en CD
- Carfagno, P., Eiza, M., Quiroga, A. y Babinec, F. (2013). Inclusión de cultivos de cobertura en la dinámica hídrica de Hapludoles y haplustoles del oeste de la provincia de Buenos Aires y noreste de La Pampa. *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción*, (Capítulo 6, pp. 36-48). Anguil: INTA. EEA Anguil.
- Carfagno, P., Eiza, M., Rivera, Vázquez, J., Quiroga, A., y Babinec, F. (2014). Cultivos de cobertura: efectos sobre la porosidad y el rendimiento de soja. XXIV Congreso de la Ciencia del Suelos, Bahía Blanca. Actas en CD.
- Carter, M. (2002). Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*. (94), pp. 38-47.
- Casas, R. (2015). La erosión del suelo en la Argentina. En: R.R. Casas y G.F. Albarracín Eds. *El deterioro del suelo y del ambiente*. Tomo II; Parte 7. Erosión y degradación de suelos. Ed. FECIC. Buenos Aires, Argentina. p. 433-452. ISBN 978-950-9149-39-7.
- Cazorla, C. (2011). Influencia de la fertilización y los cultivos de cobertura en los contenidos de carbono orgánico, estabilidad de agregados y densidad aparente del suelo, pp. 97. *Tesis Magister, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina*.
- Cazorla C., Cisneros, J., Moreno, I., y Galarza, C. (2017). Mejora en el carbono del suelo y propiedades físicas por fertilización y cultivos de cobertura. *Ciencia del Suelo*, 35, pp. 301-313.
- 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. Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER. <https://www.fca.uner.edu.ar>.
- Colazo, J., Blanco, P., Becker, A., Bouza, P., Del Valle, H., Quintero, C., Boschetti, G., De Dios Herrero, J., Osterrieth, M., Álvarez, M., Borelli, N. y Buschiazzo, D. (2006). Estabilidad estructural en suelos de la Argentina. Libro de Actas XX Congreso argentino de la ciencia del suelo. CACS, Salta-Jujuy, Argentina. Actas en CD.
- Colazo, J. y Buschiazzo, D. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, (159), pp. 228-236.
- Corak, S., Frye, W. y Smith, M. (1991). Legume mulch and nitrogen fertilizer effects on soil water and corn production. *Soil Science*. 55: 1395-1400.

- Cordone, G. y Hansen, O. (1986). Utilización de especies invernales como abonos verdes y/o cobertura para maíz y su efecto residual sobre el cultivo de trigo. *Carpeta de Producción Vegetal*, (80) EEA INTA Pergamino.
- Cordone, G. y Martínez, F. (2004). El monocultivo de soja y el déficit de nitrógeno. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur. INPOFOS*, (24), pp. 1-4.
- Chen, G. y Weil R. (2010). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant Soil* 33 (1): 31-43. Recuperado DOI: 10.1007 / s11104-009-0223-7x
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64, pp 1479-1486. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441479x>.
- Dardanelli, J., Panigatti, J., Marelli, H., Buschiazzo, D. y Gil, R. Editores (1998). Eficiencia en el uso del agua según sistemas de labranzas. *Siembra Directa*, (pp. 107-115). Buenos Aires: INTA-SAGyP.
- Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M., y Sadras, V. (2003). *Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de granos* (pp. 377-406). Buenos Aires: FAUBA.
- Diaz Zorita, M. y Grosso, G., (2000). Effect of soil texture, organic carbon, and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil Tillage Research*, (54) pp.121-126.
- Díaz Zorita, M., Duarte, G., y Grove, J. (2002). A review of no till systems and soil management for sustainable crop production in the sub humid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Tillage*, (65), pp. 1-18.
- Denef, K., Six, J., Merck, R. y Paustian, K. (2002). Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy Karolién. *Plant and Soil* V.246: 185–200. <https://scholar.google.com>.
- Deagustini, C., Dominguez, G., Agostini, M., Studdert, G. y Tourn, S. (2017). Vicia como cultivo puente y sistemas de labranza: Efecto sobre propiedades físicas del suelo. *Revista Ciencia del Suelo*, Vol.35 (2) pp. 325-335.
- De Boodt, N., De Leenher y Kirkham, D. (1961). Soil aggregate stability indexes and crop yields. *Soil Science*, V.91, pp.138-146.
- Derpsch, Rolf. (1983). Keynote: Frontiers in conservation tillage and advances in conservation practice. En D.E. Stott, D.H. Mohtar and G.C. Steinhardt (Ed.), *Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10 th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999*, (pp. 248-254). Indiana: Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Dexter, A.R. (1991). Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research*. Vol.20, pp.87-100. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90127-j](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90127-j).
- Doorenbos, J. y Kassan, A. (1979). Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. En *Estudio FAO: riego y drenaje*, (pp. 212). Roma: FAO.
- Eiza, J., Studdert, G., Fioriti, N. y Domínguez, G. (2006). Estabilidad de agregados y materia orgánica total y articulada en Molisoles de Balcarce. Libro de *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Argentina. Actas en CD.

- Eiza, M., Studdert, G. y Domínguez, G. (2006). Dinámica de la materia orgánica del suelo bajo rotaciones mixtas: I Materia orgánica total. CD de Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy. Argentina.
- Eiza, M., Studdert, G., y Domínguez, G. (2006). Dinámica de la materia orgánica del suelo bajo agricultura continua: II Materia orgánica particulada. CD de Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy. Argentina.
- Eiza, M y Carfagno, P. (2018). Medición de la infiltración en el suelo. Infiltrómetro de anillo simple. En *Análisis y evaluación de propiedades físicas e hídricas de los suelos* (pp. 25-28). La Pampa: Editorial INTA Anguil.
- Fehr, W. y Caviness, C.E. (1977). Stages of soybean development, Ames, IA. *Iowa State University Special Report*, 80, pp.11.
- Fernández, R., Funaro, D. y Quiroga, A. (2005). Influencia de cultivos de cobertura en el aporte de residuos, balance de agua y contenido de nitratos. *Boletín de divulgación técnica. Aspectos del manejo de los suelos en sistemas mixtos de las regiones semiáridas y subhúmeda Pampeana*, 87, pp. 25-31.
- Fernández, R., Peinemann, N., Noellemeyer, E. y Quiroga, A. (2006). Efecto de la cobertura sobre la resistencia y la temperatura del suelo en la Región Semiárida Pampeana. CD de Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta, Jujuy.
- Fernández, R. (2007). Efecto de la cobertura del suelo durante el barbecho para cultivos estivales en la Región Semiárida Pampeana. *Tesis Magíster*, pp. 72, UN Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Fernández, R., Quiroga, A., Arenas, F., Antonini, C. y Saks, M. (2008). Contribución de los cultivos de cobertura y las napas freáticas a la conservación del agua, uso consuntivo y nutrición de los cultivos. En *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*, Publicación Técnica, 71, pp. 51-58. Editorial. EEA INTA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas".
- Fernández, R y Quiroga, A. (2009). Cultivo de cobertura. Costo hídrico de su inclusión en sistemas mixtos. En actas de *Jornadas Nacionales "Sistemas Productivos Sustentables"*. Fósforo, Nitrógeno y Cultivos de Cobertura. Bahía Blanca. Argentina.
- Fernández, R., Noellemeyer, E. y Quiroga, A. (2012). Cultivo de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semiárida pampeana? *Revista Argentina de la Ciencia del suelo* 30, pp. 137- 150.
- Fernández, R., Quiroga, A., Noellemeyer, E., Saks, M., Arenas, F., y Antonini, C. (2012). Inclusión de cultivos de cobertura en sistemas de producción de la región semiárida pampeana Capítulo V. *Manual de fertilidad y evaluación de suelos. 2*. Publicación Técnica Nº 89. ISSN 0325-2132.
- Fernández, R., Picardi, J.A., Reyna, R.O. y Quiroga, A. (2012). Indicadores físicos. Influencia del manejo en suelos de la región semiárida pampeana. *XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Actas en CD. Mar del Plata. Argentina.
- Fernández, R., Quiroga, A., Álvarez, C., Lobartini, Y Noellemeyer, E. (2016). Valores umbrales de algunos indicadores de calidad de suelos en molisoles de la región semiárida pampeana. *Revista Argentina de la Ciencia del suelo* 34, pp. 279- 292.

- Fernández, R., Álvarez, C., Eggman Owen, E., y Quiroga, A. (2020). Efecto del uso de cultivo de cobertura en una secuencia de soja continúa en la región semiárida pampeana. En *Revista Semiárida*. Vol.30.Núm.2 pp.37-47. Recuperado de: <https://doi.org/10.19137/semiárida>. (02).
- Ferreras, L.A., De Battista, J.J., Ausilio, A. y Pecorari, C. (2001). Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesquisa Agropecuaria Brasil*, 36 (1), pp. 161-170.
- Finney D.M., Murrell, E. y White, C. (2017). Ecosystem services and disservices are bundled in simple and diverse cover cropping systems. *Agricultural & Environmental Letters*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/320986424>.
- Fisk, J., Hesterman, O., Shrestha, A., Kells, J., Harwood, R., Squire, J. y Sheaffe, C. (2001). Weed Suppression by Annual Legume Cover Crops in NoTillage Corn. En: *Agronomy Journal* 93, pp. 319-32.
- Frasier, I., Gómez, M., Del Río, J., Noellemeyer, E. y Quiroga, A. (2007). Variación temporal y distribución de raíces de centeno como cultivo de cobertura. CD de *Actas III Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos*, 7 y 8 septiembre Bahía Blanca.
- Frasier, I., Riestra, D., Noellemeyer, E. y Quiroga, A. (2014). Aporte de C y N de raíces de cultivos de cobertura. En *Impacto de los sistemas actuales de cultivos sobre las propiedades químicas del suelo. Efectos sobre los balances de carbono*. Eds. E. Sá Pereira, Minoldo, G., y Galantini J.A. INTA, pp.83.87.
- Frasier, I., Uhaldegaray, M., Oderiz, J., Fernandez, R., Noellemeyer, E. y Quiroga, A. (2016). Distribución de raíces de cultivos de cobertura en dos suelos en la región semiárida pampeana. *Actas en CD. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo* Rio Cuarto, Argentina.
- Frasier, I., Quiroga, A., Fernández, R., Álvarez, C., Gómez, F., Scherger, E., Gili, A. y Noellemeyer, E. (2019). Soil type, land-use and -management as drivers of root-C inputs and soil C storage in the semiarid pampa region, Argentina. *Soil & Tillage Research* (192), pp. 134-143.
- Franzluebbers, A.J. (2001). Soil organic stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research*, 66 (2002), pp. 95–106.
- Franzluebbers, A. (2003). Conservation tillage and stratification on soil properties: a summary of the special issue in *Soil Tillage Research*. CD de *Actas ISTRO 16th Conferencia*, Brisbane, Australia.
- Galantini, J., Iglesias J., Landriscini M., Suñer, L. y Minoldo, G. (2008). Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en sistemas naturales y cultivados. En *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina* (pp. 71-97). Bahía Blanca: Editorial U.N.S.
- Gale, W.J. y Cambardella, C.A. (2000). Carbon Dynamics of Surface Residue– and Rootderived Organic Matter under Simulated No-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:190–195 (2000). Doi 10.2136/sssaj2002.2040.
- Gil, R. (2005). Aspectos generales de las relaciones hídricas en el continuo suelo-planta-atmósfera. En *Eficiencia de uso de los recursos. Especialización en Producción de Granos*, Material de estudio, Facultad de Agronomía. UBA.

- Gil, R. (2005). El comportamiento físico-funcional de los suelos. En *Eficiencia de uso de los recursos. Especialización en Producción de Granos*, Material de estudio, Facultad de Agronomía. UBA.
- Gil, R. (2006). Infiltrómetro. Permeámetro de Disco. CD de Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta, Jujuy, Argentina.
- Giron, P., Scianca, C., Barraco, M., Lardone, A. y Miranda, W. (2014). Cambios en el carbono orgánico por la inclusión de cultivos de cobertura. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas en CD. Bahía Blanca. Argentina.
- Gluck Rachwal, M., Dedecek, R. , Ribas Curcio, G. y Westphalen, D. (1997). Avaliacao da producao de materia seca radicular de diferentes coberturas de solo, no período de inverno nas entrelinhas de Erva-Mate no municipio de Aurea, RS. EMBRAPA. *Comunicado Técnico*, (27), pp.1-8.
- Golchin, A., Oades, J., Skjemstad, J., y Clarke, P. (1994). Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*. V. 32 (5) pp, 1043-1068. <https://doi.org/10.1071/SR9941043>.
- Hamza, M. y Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems. A review of the nature causes and possible solutions. *Soil Tillage Research*, (82), pp.121-145.
- Infostat. (2004). *Infostat versión 2004*, Grupo Infostat. FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- INTA. (1993). Carta de suelos de la República Argentina. Instituto de suelos. Área de Investigación en Cartografía de suelos y evaluación de tierras. Hoja 3560 – 32. Del Valle. Escala 1: 50.000.
- Jarecki, M., y Lal, R. (2003). Crop management for soil carbon sequestration. *Rev. Critical Reviews in plant Sciences*. V.22 pp.471-502. DOI: 10.1080/713608318.
- Jobbágy, E. (2010). Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Tecnológico En: Viglizzo, E.F. y E.G. Jobbágy (Eds.). Expansión de la frontera agrícola y su impacto ecológico-ambiental. Ediciones INTA-IAI (Buenos Aires), pp. 69-76.
- Johnson, T., Strock, J., Tallaksen, J. y Reese, M. (2016). Corn stover harvest changes soil hydrology and soil aggregation. *Soil Tillage Research*, (161), pp. 106-115.
- Kabir, Z. (2005). Labranza o Labranza cero: Impacto en las micorrizas. Revista Canadiense de Ciencias Vegetales. *Revista Canadiense de Ciencias Vegetales*.85:23-29. Doi: 10.4141/P03-160.
- Kantolic, A., Gimenez, P. y De la Fuente, E. (2003). Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. En *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*, (cap.9, pp. 167-186). Buenos Aires: Ed. FAUBA.
- Kiem, R., y Kandeler, E. (1997). Stabilization of aggregates by the microbial biomass as affected by soil texture and type. *Applied Soil Ecology*. Vol.5, pp. 221–230.
- Kuo, S., Sainju, U. y Jellum, E. (1997) Winter cover cropping influence on nitrogen in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.61, pp. 1392-1399. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
- Kuo. S. y Jellum, E. (2002). Influence of winter cover crop and residue management on soil nitrogen availability and corn. *Agron.J.* (94) pp. 501-508.

- Kruger, H y Quiroga, A. (2013). La "interfase suelo-atmósfera" y su valor estratégico en regiones semiáridas. En: *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. De Álvarez, C., Quiroga, A., Santos, D., Bodrero, M. (Eds.). INTA EEA Anguil, La Pampa. pp. 5-6.
- Kruger, H., Frolla, F., y Zilio, J. (2018). Un indicador de compactación relacionado con el agua del suelo. En: *Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos* (pp. 121). Editores; Quiroga A., R. Fernández y C. Álvarez .INTA.
- Lal, R. (1998). Impacto de la erosión del suelo en la productividad agronómica y la calidad del medio ambiente. *Revisiones críticas en ciencias de las plantas*. Vol. 17, pp. 319-464. [http://dx.doi.org/10.1016/S0735-2689\(98\)00363-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0735-2689(98)00363-3).
- Lal, R. (2004). Secuestro del carbono del suelo para mitigar el cambio climático. *Geoderma*. Vol.123. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.01.032>.
- Lardone, A., Barraco, M., Scianca, C., Álvarez, C. y M. Díaz Zorita. (2012). Actas en CD. *XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata. Argentina.
- Lardone, A., Barraco, M., Scianca, C. y Álvarez, C. (2011). INTA. EEA Villegas. *Memoria técnica 2010-2011*. pp. 30- 32.
- Latif, M., Mehuys G., Mackenzie, A., Alli, I. y Faris, M. (1992). Effects of legumes on soil physical quality in a maize crop. *Plant Soil*, (140), pp. 15-23.
- Lavado, S. (2006). La Región Pampeana: historia, características y uso de los suelos. *En: Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*, (cap.1, pp.1-11). Ed. FAUBA. Buenos Aires
- Liebman, M, y Davis A. (2000). Integration of soil, crop, and weed management in low-external- input farming systems. En: *Weed Research*. 40, pp. 27-47. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3180.2000.00164>.
- Mansoer, Z., Reeves, D.W. y Wood, C.W. (1997). Suitability of sun hemp as an alternative late-summer legume cover crop. *Soil Science Society America Journal*, (61) pp. 246-253.
- Mapfumo, E. y Chanasyk, D. (1998). Guidelines for safe trafficking and cultivation, and resistance-density-moisture relations of three disturbed soil from Alberta. *Soil Tillage Research*, (46), pp. 193-202.
- Martens, D. (2000). Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol.32, pp.361-369. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00162-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00162-5).
- Martelotto, E., Salas H. y Lovera, E. (2011). El monocultivo de soja y la sustentabilidad de la agricultura. *Publicación Técnica rotación de cultivos en siembra directa*, pp. 17-22. Rosario: AAPRESID.
- Mengoni, H., Álvarez, C., Fernández, P., Cosentino, D., Taboada, M. e Imhoff, S. (2016). Contenido hídrico, densidad y resistencia mecánica crítica para el crecimiento radical en suelos de la pampa ondulada. CD de Actas *XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 27 de junio al 1 de julio. Rio Cuarto, (Córdoba), Argentina.
- Miranda, W., Scianca, C., Barraco, M., Álvarez, C. y Lardone, A. (2012). Cultivos de cobertura: Dinámica del agua luego de dos momentos de secado. CD de Actas *XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 16 al 20 de abril. Mar del Plata, Argentina.

- Mignolet, C. Schott, C., Benoit, M., y Meynard, J. (2012). Transformations des systèmes de production et des systèmes de culture du bassin de la Seine depuis les années 1970: une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. *Innov Agron* 22, pp.1–16. Recuperado de: <https://hal.inrae.fr/hal-02650527>.
- Miller, T. (2000). Estadios de crecimiento del cultivo de trigo. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur. IPNI*, (6), pp. 1-4.
- Montoya, J., Cervellini, J. y Porfiri, C. (2015). Supresión de rama negra (*Conyza bonariensis* var. *angustifolia*) mediante el uso de cultivos de cobertura. Libro de Actas XII Congreso de la ALAM, I Congreso de la ASACIM. C.A.B.A., Argentina.
- Muller, D., Saluzzio, M. y De Battista, J.J. (2008). Comparación de distintos cultivos de cobertura en suelo Vertisoles. Actas en CD XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de Funes, (San Luis), Argentina.
- Noellemeyer, E., Frank, F., Álvarez, C., Morazzo, G., y Quiroga, A. (2008). Carbon contents and aggregation related to soil physical and biological properties under a land-use sequence in the semiarid region of central Argentina. *Soil & Tillage Research*. Vol.99, pp.179-190. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.02.003>.
- Nyakatawa, E., Reddy, K., y Sistanib, K. (2001). Tillage, cover cropping, and poultry litter effects on selected soil chemical properties. *Soil. Till. Res.* 58, pp. 69-79. Recuperado de <https://www.academia.edu>.
- Oderiz, J., Uhaldegaray M., Frasier, I., Quiroga, A., Amiotti, N y Zalba, P. (2017). Raíces de cultivos de cobertura. Cantidad distribución e influencia sobre el N mineral. *Ciencia Del Suelo*, (35), pp. 249-258.
- Olchin, G., Ogle, S., Frey, S., Filley, T., Paustian, K. & Six J. (2008). Residue carbon stabilization in soil aggregates of no till and tillage management of dryland cropping systems. *Soil Science Society America Journal*, Vol. 72, (2), pp. 507-513.
- Ormeño, O. y Quiroga, A. (2001). Cobertura del suelo: aspectos del manejo en la región semiárida pampeana. *Boletín Divulgación Técnica. EEA. INTA Anguil*, (71), pp. 32.
- Passiura, J.B. (2002). Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell & environment*. V.25 (2), pp. 311-318. Recuperado de <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025>.
- Patrick, W., Haddon, J, y Hendrix J. (1957). The effect of Long time use of winter cover crops on Certain phisical properties of commerce loam. *Soil Science Society America Journal*, Vol. 21 (4) pp.366-668. <https://doi.org/10.2136/sssaj1957>.
- Pérez, M. y Scianca, C. (2009). Efecto de los cultivos de cobertura sobre las poblaciones de malezas en un Hapludol thapto árgico del NO bonaerense. *Memoria técnica 2009-2010, EEA-INTA General Villegas*.
- Peyraud, J., Taboada, M. y Delaby, L. (2014). Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: a review. *Eur JAgron* (57), pp. 31-42. DOI: 10.1016/j.eja.2014.02.005.
- Puget, P. y Drinkwater, L., (2001). Short-term dynamics of root- and shoot derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 771–779. Doi: 10.2136/sssaj2001.653771.

- Ponisio, L., M'Gonigle L. y Mace, K. (2015). Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 282:20141396. Recuperado de <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>.
- Quiroga, A., Buschiazzo, D. y Peineman, N. (1996). Soil Organic matter particle size fractions in soils of the semiarid argentinian pampas. *Soil Science* 161 (2), pp.1-5.
- Quiroga, A., Buschiazzo, D. y Peinemann, N. (1999). Soil compaction is related to management practices in the semiarid Argentine pampas. *Soil Tillage Research*, (52), pp. 21-28.
- Quiroga, A., Ormeño, O., Bono, A., Rodríguez, N., Montoya, J. y Babinec, F. (1999) (b). Aspectos del manejo de suelo y productividad del girasol en la región semiárida pampeana. *Boletín de divulgación técnica EEA. INTA Anguil*, (64), pp. 29.
- Quiroga, A., Funaro, D., Fernández, R. y Noellemeyer, E. (2005). Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo*, (23), pp.79-86.
- Quiroga, A., Saks M., Fernández, R. y Funaro, D. (2006). Aspectos del manejo de la nutrición de cultivos. CD de Actas XIV Congreso de AAPRESID (pp.189-195). Rosario: Argentina.
- Quiroga, A y Bono A. (2008). Capítulo III. En *Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Publicación Técnica N° 71*, pp. 23. Anguil: EEA INTA Anguil.
- Quiroga, A., Fernández, R., Azcarate, P., Bono, A. y Gaggioli, C. (2012). Agua del suelo. Bases funcionales para su manejo. En *Manual de Fertilidad y Evaluación de Suelos*. Eds. Quiroga, A. y Bono, A. pp. 161. Buenos Aires: INTA.
- Quiroga, A., Oderiz, A., Uhaldegaray, M., Álvarez, C., Sherger, E., Fernández, R. y Frasier, I. (2016). CD de Actas XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rio Cuarto, Argentina.
- Restovich, S., Andriulo, A., Sasal C., Irizar, A., Rimatori, F., Darder, M. y Hanuch, L. (2006). Absorción de agua y nitrógeno edáfico de diferentes cultivos de cobertura. Actas en CD XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, Argentina.
- Restovich, S., Andriulo, A. y Torti, M. (2008). Destino del nitrógeno edáfico luego de la cosecha del maíz con diferentes cultivos de cobertura utilizados como antecesores bajo siembra directa en la pampa ondulada. CD de Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de Funes (San Luis), Argentina.
- Restovich, S., Andriulo, A. y Améndola, C. (2008). Definición del momento de secado de diferentes cultivos de cobertura en la secuencia soja-maíz. CD de Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de Funes (San Luis), Argentina.
- Restovich, S., Torti, M. Colombini, D. y Andriulo, A. (2010). Evolución de algunas propiedades físicas y químicas edáficas durante la implementación de cultivos de cobertura en la secuencia Soja-Maíz. En: Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario (Santa Fe).
- Reeves D. W. y Touchton, J. T. (1991). Deep tillage ahead of cover crop planting reduces soil compaction for following crop. *Highlights of Agricultural Res.*, Vol. 38 (4). Alabama Agric. Exper. Stn. Auburn University, AL.

- Rillig, M., y Mummey, D. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*. V.171 (1) pp.41-53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750>.
- Ruis, S., y Blanco Canqui, H. (2017). Cover crops could offset crop residue removal effects on soil carbon and other soil properties: A review. *Agronomy Journal*, 109, 1785–1805. Recuperado de <https://doi.org/10.2134/agronj2016.12.0735>.
- Ruis, S., Blanco Canqui, H., Elmore, R., Proctor, C., Koehler-Cole, K., Ferguson, R., Francis, C. y Shapiro C. (2020). Impacts of cover crop planting dates on soils after four years. *Agronomy Journal*, pp.1–17. Recuperado de wileyonlinelibrary.com/journal/agj2. DOI: 10.1002/agj2.20143.
- Ruffo, M. y Parsons, A. (2004). Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas. *INPOFOS Informaciones Agronómicas*, (21), pp.13-20.
- Ronconi, A., Silvestre, P., Saluzzio, M. y De Battista, J.J. (2008). Efectos de cultivo de cobertura con distinta duración de barbecho químico. CD de Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de Funes (San Luis), Argentina.
- Sagpya (1990-2015). Informes de producción de campañas 1990-2015. Recuperado de www.sagpya.meccon.gov.ar.
- Sainju, U., Schomberg, H., Singh, B., Whitehead, W., Tillman, G. y Lachnicht-Weyers, S. (2007). Cover crop effect on soil carbon fractions under Conservation Tillage cotton. *Soil & Tillage Research* Vol.96, pp.205-218. Recuperado de www.sciencedirect.com.
- Santanatoglia, O.J., Alvarez, R., Barbero, N. y Russo, M. (1994). Descomposición de la cobertura de rastrojo y evolución de su contenido de nitrógeno en doble cultivo trigo-soja bajo siembra directa. *Ciencia del suelo*, (12), pp. 63:67.
- Sá Pereira, E. y Galantini, J. (2018). Costo hídrico de la captura de carbono por los cultivos de coberturas; aspectos cualitativos y cuantitativos. En *Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos*. Editores: Alberto Quiroga; Romina Fernández y Cristian Álvarez. Ediciones INTA., pp.113-121.
- Sá Pereira, E., Galantini, J., Ducos, I. y Arroquy, G. (2019). Contribuciones de los cultivos de cobertura y sus efectos sobre el cultivo de Girasol (*Helianthus annuus*) en la región sudoeste bonaerense subhúmedo. Libro de Actas Congreso de Uso y Manejo de suelos. Paraná, Argentina.
- Sá Pereira, E., Arroquy, G., Minoldo, G., Sauer, Y., Morris, D., Galantini, J., Dean, S., Ducos, I. y Holzmann, A. (2020). Cultivos de servicios antecesores de especies estivales en el ambiente subhúmedo bonaerense. Aceptado para su publicación en: *XXVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Corrientes, Argentina.
- Sasal, M., Andriulo, A., Boizard, H., Leonard, J. y Wilson, M. (2017). El estado estructural como indicador de calidad de suelo bajo siembra directa. En archivo PDF del *Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina*. Entre Ríos: Ediciones INTA.
- Satorre, E. Cambios Tecnológicos en la Agricultura Actual. (2005). *Ciencia hoy*, (15), pp. 24-31.
- Servera M., Zamora, C., Quiroga, A., Frigerio, F., Aimar, D., y Abascal S. (2016). Efecto del momento de quemado de centeno utilizado como cultivo de cobertura sobre propiedades edáficas, malezas y rendimiento del maíz. *SEMIÁRIDA Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam* Vol 26 (1):11-18. Recuperado de DOI: [http://dx.doi.org/10.19137/semiarida.2016\(01\).11-18](http://dx.doi.org/10.19137/semiarida.2016(01).11-18).

- Silenci, J. Moreno, A., y Lucero, J. (1987). Variaciones temporales de la estabilidad estructural de un suelo no disturbado. *Revista Ciencia del Suelo*. V.5 (1). Recuperado de <https://suelos.org.ar>.
- Six, J., Elliot, E. y Paustian, K. (2000 a). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*. 32 (14), 2099-2103. Doi: 10.1016/S0038-0717(00)00179-6.
- 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 & Tillage Research* 79 7-31. Doi: 10.1016/j.still.2004.03.008.
- Soane, B. (1990). The role of organic matter in soil compactability: A review of some practical aspects. *Soil Tillage Research*, (16), pp. 179-201.
- Scianca, C., Álvarez C., Barranco, M., Pérez, A. M y Quiroga, A. (2006). Cultivos de cobertura en sistemas orgánicos. Aporte de carbono y dinámica de malezas. CD de Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas en CD.
- Scianca, C., Álvarez, C., Barranco, M., Quiroga, A. y Zalba, P. (2006). Cultivos de cobertura. Aporte de carbono e influencia sobre propiedades edáficas. CD de Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, Argentina.
- Scianca, C., Álvarez, C., Barranco, M., Quiroga, A. y Zalba, P. (2008). Cultivos de cobertura en un Argiudol típico del Noroeste Bonaerense. CD de Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de Funes (San Luis), Argentina.
- Scianca, C. (2010). Cultivos de cobertura en Molisoles de la Región Pampeana. Producción de materia seca, eficiencia de uso del agua y del nitrógeno e incidencia sobre el cultivo de soja. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Scianca, C., Varela, M., Barranco, M., Álvarez, C. y Quiroga, A. (2013). Cultivos de cobertura en un Hapludol Thapto Árgico de la Pampa arenosa. Análisis de cinco campañas. En *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. Cap.14, pp.105-116. Eds. Álvarez, C., Quiroga, A., Santos, D. y Bodrero, M. Ediciones INTA. EEA. INTA Anguil, La Pampa, Argentina.
- Schipanski, M., Barbercheck, M. y Douglas, M. (2014). A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agric Syst* 125:12–22. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2013.11.004>.
- Studdert, G., y Echeverría, H. (2000). Rotaciones de cultivos y fertilización con nitrógeno para gestionar la dinámica del carbono orgánico del suelo. *Soil Science Society of America Journal* 64. pp. 1496-1503. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
- Stute, J., y Posner J. (1995). Synchrony between legume nitrogen release and corn demand in the upper Midwest. *Agronomy Journal*, (87), pp. 1063–1069.
- Taboada, M., Micucci, F. y Álvarez, C. (2008). Impedancias mecánicas y compactación en suelos agrícolas. En *Fertilidad Física de los suelos*, Cap. 5, pp.93-153. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía. 2° Edición.
- Taboada, M., Álvarez, C. y Tellería, M. (2004). Distribución y abundancia de raíces de maíz en Argiudoles pampeanos bajo diferentes sistemas de labranza. Libro de Actas del XIX Congreso Argentino de Ciencias de Suelo. Paraná, Argentina.

- Tilman, D., Cassman, K., Matson, P., Naylor, R. y Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418:671–677.
- Tisdall, J. y Oades. J. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science*. V.33, 141-163. Doi: 10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.
- Tonitto, C., David, M., y Drinkwater, L. (2006). Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems. A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. V.112 (1), pp.58-112.doi:10.1016/j.agee.2005.07.003.
- Trolove, M., James, T., Holmes, A., Parker, M., Mc Dougall, S. y Pirie, M. (2017). Winter cover crops to reduce herbicide inputs in maize crops. *New Zealand Plant Protection* 70: 171-178. Recuperado de http://www.nzpps.org/terms_of_use.php.
- Unger, P y Kaspar, T. (1994). Soil compaction and root growth. A review. *Agronomy Journal*, (86), pp.759-766.
- Unger, P. y Vigil, M. (1998). Cover crop effects on soil water relationships. *J. Soil Water Conservation*, (53), pp. 200-207.
- Universidad de Cornell. Índice de impacto ambiental. <https://nysipm.cornell.edu/eiq/>.
- Varela, M., Fernández P., Álvarez, C., Scianca, C., Rubio, G. y Taboada, M. (2010). Propiedades físicas que varían por la incorporación de cultivos de cobertura en Hapludoles franco arenosos. CD de Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina.
- Villamil, M., Little, J. y Nafziger, E. (2015). Corn residue, tillage, and nitrogen rate effects on soil properties. *Soil Tillage Research*, (151), pp.61-66.
- Villamil, M., Bollero, G., Darmody, R., Simmons, F. y Bullock, D. (2006). No till corn/soybean systems including winter cover crops: effects on soil properties. *Soil Science Society America Journal* (70), pp. 1936-1944. Recuperado de <https://www.academia.edu>.
- Williams, S. y Weil, R. (2004). Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean. *Soil Science Society America Journal*, (68), pp. 1403-1409. Doi: 10.2136/sssaj.
- Zaniboni, M. y Landa, R. (2008). Caracterización productiva del área de influencia de la Estación Experimental Agropecuaria Villegas. En *Memoria Técnica 2007* (pp. 446-449). INTA, EEA Villegas.
- Zhu, J., Gantzer, C., Anderson, S., Alberts, E. y Beuselinck, P. (1989). Runoff, Soil, and Dissolved Nutrient Losses from No-Till Soybean with winter Cover Crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53. pp 1210-1214. Recuperado de <https://www.ars.usda.gov>.
- Zhu, J., Gantzer, C., Anderson, S., Beuselinck, P., y Alberts, E. (1991). Evaluación del uso del agua en cultivos de cobertura de invierno para soja sin labranza. *Journal of Soil and Water Conservation*, noviembre de 1991, 46 (6) 446-449. *Revista de conservación del suelo y el agua (USDA)*. ISSN: 0022-4561. <https://agris.fao.org>.

ANEXO

Tabla 12. Contenidos de COT Mg ha⁻¹ del testigo y CC a los 11 años, a masa de suelo equivalente a la densidad aparente del testigo inicial. Para los espesores de suelo 0-5; 5-10; 10-15 y 15-20 cm. * indica diferencias significativas entre tratamientos (p<0,05). CV: 5 cm: 7,0%; 10 cm: 10,5%; 15 cm: 13,0%; 20 cm: 16,0 % y 0-20 cm: 11,0%.

Profundidad	T (Mg COT ha ⁻¹)	CC (Mg COT ha ⁻¹)
5	28,1	27,0
10	21,8	24,5 (*)
15	20,8	22,6
20	21,5	22,6
Promedio 0-20	46,3	49,5 (*)

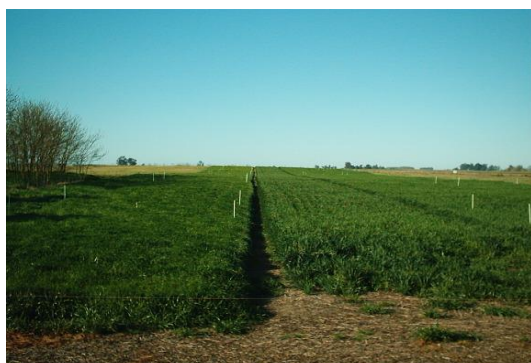
Foto 11. Fotos sobre distintos aspectos del proceso de estudio



Cultivo de cobertura de A



Cultivo de cobertura de R



Cultivo de cobertura Rye grass y Avena



Testigo



Testigo con Pensamiento silvestre(*Viola arvensis*)



Testigo con Rama negra (*Conyza bonariensis*)



Vista de cultivo de cobertura sin malezas



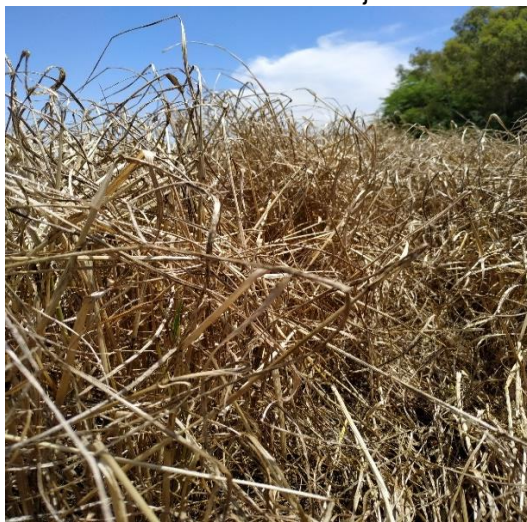
Cultivo de cobertura de A y R (Secado)



Siembra de soja



Soja sobre A



Biomasa de R en de siembra de soja



Biomasa de A en siembra de soja



Soja sobre R

Soja sobre Testigo