

UTILIZACIÓN DE CULTIVOS DE COBERTURA INVERNALES COMO ALTERNATIVA PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DEL SUELO

HUGO MARTÍN GONZÁLEZ¹; SILVINA BEATRIZ RESTOVICH^{*2} & SILVINA ISABEL PORTELA²

Recibido: 16-05-16

Recibido con revisiones: 13-09-16

Aceptado: 25-10-16

RESUMEN

Los cultivos de cobertura (CC) se siembran entre dos cultivos de cosecha y podrían contribuir a mitigar la degradación física del suelo en sistemas agrícolas simplificados. En este trabajo se evaluó el efecto de distintos CC sobre la estabilidad estructural del suelo luego de seis años de rotación soja-maíz bajo siembra directa y se exploró su efecto sobre algunos factores que intervienen en la agregación del suelo. En un ensayo de larga duración con distintas especies incorporadas como CC se tomaron muestras de suelo y se determinó carbono orgánico del suelo (COS), glomalinas y estabilidad de agregados usando el método Le Bissonnais. La estabilidad estructural fue 20-25% mayor en las rotaciones con CC que en el testigo sin CC. El uso de cebadilla, avena, vicia y avena+viola como CC produjo mayor estabilidad estructural que ryegrass, cebada y el testigo luego del pre-tratamiento de humectación rápida. Las gramíneas, excepto cebadilla, presentaron mayor estabilidad estructural que el testigo luego del pre-tratamiento de desagregación mecánica y no hubo diferencias en estabilidad luego del pre-tratamiento de humectación lenta. El carbono orgánico del suelo explicó el 49% de la variación de estabilidad estructural luego del pre-tratamiento de humectación rápida. El contenido de glomalinas en el suelo permitió explicar 60 y 70% de la variación de estabilidad luego de los pre-tratamientos de humectación lenta y rápida, respectivamente, y la relación C/N de la biomasa aérea de los CC explicó la variación de estabilidad luego del pretratamiento de desagregación mecánica ($R^2=0,70$). En el mediano plazo, los CC mejoraron la estabilidad estructural del suelo través de la disminución del estallido de los agregados (cebadilla, vicia, avena, avena+viola) y a través de la protección del suelo contra el impacto de la gota de lluvia por la perdurabilidad del rastrojo (ryegrass, cebada, avena).

Palabras clave. Método de Le Bissonnais, carbono orgánico del suelo, glomalinas, relación C/N de la biomasa aérea.

USE OF WINTER COVER CROPS AS AN ALTERNATIVE TO IMPROVE SOIL STRUCTURAL STABILITY

ABSTRACT

Cover crops (CC) are sown between two harvest crops and could mitigate soil physical degradation in simplified cropping systems. In this study we evaluated the effect of different CC on aggregate stability and other variables that affect soil aggregation after six years of soybean-maize rotation under no tillage. We evaluated soil samples from a long-term experiment with different species used as CC and measured soil organic carbon, glomalin and aggregate stability using the Le Bissonnais method. Aggregate stability was 20-25% higher in rotations with CC than in the control without CC. The use of rescue grass, oats, vetch and oats+vetch as CC produced more stable aggregates than ryegrass, barley and the control after fast wetting pre-treatment. Grasses, except rescue grass, produced more stable aggregates than the control after mechanical breakdown pre-treatment and there were no differences in aggregate stability after the slow wetting pre-treatment. Soil organic carbon explained 49% of the variation of aggregate stability after the fast wetting pre-treatment. Soil total glomalin content explained 60 and 70% of the variation of aggregate stability after the slow and fast wetting pre-treatments, respectively, and the cover crop C/N ratio explained the variation of aggregate stability after the mechanical breakdown pre-treatment ($R^2=0,70$). Cover crops improved soil structural stability in the mid-term by reducing aggregate slaking after fast wetting (rescue grass, oats, vetch and the oats+vetch mixture), or through aggregate protection against rain drop impact achieved by durable stubble (ryegrass, barley and oats).

Key words. Le Bissonnais method, soil organic carbon, glomalin, aboveground biomass C/N ratio.

1. Centro de Bioinvestigaciones, CITNOBA (UNNOBA-CONICET)

2. Grupo Gestión Ambiental, Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, INTA

* Autor de contacto: restovich.silvina@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

En las últimas tres décadas los sistemas agrícolas pampeanos han experimentado un cambio continuo en los sistemas de producción enmarcado por el uso de cultivos transgénicos, siembra directa y mayor uso de fertilizantes y plaguicidas (Viglizzo *et al.*, 2011). Estos sistemas avanzaron hacia rotaciones simplificadas con predominio de cultivos de verano (principalmente soja y, en segundo lugar, maíz) y largos períodos de barbecho otoño-invernal o, a veces, incluyendo trigo como antecesor del cultivo de soja (Viglizzo *et al.*, 2011). Este cambio tecnológico permitió un aumento sostenido de la producción, particularmente de maíz, pero provocó una disminución de la fertilidad física del suelo y de las reservas de carbono y nitrógeno orgánicos (Caride *et al.*, 2012). Esta disminución de la fertilidad física se manifestó a través de una menor estabilidad estructural, tendencia a la compactación y reducida infiltración debido a la presencia de estructuras de tipo laminar con orientación de poros preferencialmente horizontal (Sasal *et al.*, 2006).

La intensificación y diversificación de las rotaciones a partir de la introducción de cultivos de cobertura (CC) otoño-invernales en sistemas agrícolas podría constituir una herramienta agronómica para mitigar la degradación edáfica (Schipanski *et al.*, 2014). Durante el período de crecimiento de los CC sus sistemas radicales junto con asociaciones de bacterias y hongos intervienen en la formación y ciclado de los agregados del suelo (Goss & Kay, 2005). La estabilidad de la agregación del suelo aumenta la porosidad total y la infiltración y disminuye la compactación (Magdoff & Weil, 2004). Trabajos previos han demostrado que, en el corto plazo, la inclusión de CC incrementa el COS y aumenta transitoriamente la macroporosidad y la estabilidad estructural; sin embargo, estos cambios ocurrieron en los momentos de mayor aporte de carbono a la rotación y desaparecieron durante períodos de lluvias intensas (de Rouw *et al.*, 2010; Restovich *et al.*, 2011). Por otro lado, hay pocos estudios que evalúen el efecto de los CC sobre la estabilidad estructural en el mediano y largo plazo.

La estabilidad de los agregados es uno de los indicadores más utilizados para determinar el estado de la estructura del suelo (Six *et al.*, 2000). La estabilidad de los agregados está afectada por la textura, la mineralogía de las arcillas, la actividad microbiana y sus exudados y el contenido de materia orgánica del suelo (MOS). Algunos auto-

res reportaron relaciones positivas entre la estabilidad estructural y el COS bajo diferentes situaciones de manejo y tipos de suelo (Irizar *et al.*, 2013; Novelli *et al.*, 2013). Sin embargo, esta asociación no siempre ocurre porque: sólo una parte de la materia orgánica interviene en la agregación del suelo, la asociación depende del contenido de carbono de los suelos y porque existen otros agentes cementantes (Tisdall & Oades, 1982). Six *et al.* (2004) postulan a la materia orgánica particulada o fracción lábil como agente cementante de los agregados del suelo. Wright *et al.* (2007) también incluyen a las glomalinas, glicoproteínas producidas principalmente por las hifas de los hongos micorrízicos arbusculares, como agentes cementantes. La relación entre las glomalinas y la estabilidad de los agregados fue observada en diferentes suelos (Wright & Upadhyaya, 1998) y se relacionó con distintas prácticas de manejo de los sistemas agrícolas (Wright, 2005).

Entre los factores externos que pueden ocasionar la desagregación del suelo, el más habitual en suelos agrícolas es el humedecimiento a partir de lluvias de distinta intensidad (Le Bissonnais, 1996). Se pueden identificar diferentes mecanismos de desagregación: cuando el humedecimiento es rápido y el suelo está seco, la compresión del aire ocluido en el agregado provoca su estallido; cuando el suelo está humedecido y la lluvia es de moderada intensidad, se produce la desagregación mecánica de los agregados; y cuando el suelo está seco y el humedecimiento es lento, se produce la microfisuración por hinchamiento diferencial. El método de estabilidad estructural de Le Bissonnais (1996) reproduce estas situaciones en el laboratorio a partir de tres pretratamientos que se aplican a los agregados para evaluar su resistencia a partir de la separación granulométrica de los agregados resultantes. Este método permite evaluar el efecto del tipo de suelo, del clima y del manejo agronómico sobre la estabilidad estructural.

En este contexto, nuestro estudio buscó reproducir en el laboratorio la desagregación por acción del agua que ocurre a campo y analizar el efecto de la intensificación de las rotaciones agrícolas con CC sobre la estabilidad estructural. Los objetivos del trabajo fueron: 1) evaluar el efecto de distintas especies utilizadas como CC sobre la estabilidad estructural del suelo luego de seis años de rotación con soja y maíz bajo siembra directa y 2) explorar el efecto de diferentes factores que intervienen en el proceso de agregación del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En 2005 se instaló un ensayo con CC intercalados en una rotación de maíz y soja en la Estación Experimental de Pergamino del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (33°51'S, 60°40'W). El suelo es un Argiudol típico (USDA Soil Taxonomy) de la serie Pergamino sin fase por erosión (pendiente <0,3%) y la textura del horizonte A es franco limosa. El clima es templado subhúmedo, con temperatura media anual de 16,5 °C y precipitación media anual de 984 mm para el período 1910-2015 (Red Agroclimática, INTA).

El diseño experimental fue en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones y cada unidad experimental fue de 10x30 m. Los tratamientos fueron las especies otoño-invernales incorporadas como CC en la rotación soja-maíz y un testigo sin CC que se mantuvo libre de malezas (Fig. 1). Los CC se sembraron en línea bajo siembra directa. Las especies utilizadas fueron: cebada forrajera (*Hordeum vulgare* L), ray grass (*Lolium multiflorum* L), avena (*Avena sativa* L), cebadilla (*Brumus unioloides* L), vicia (*Vicia sativa* L), utilizando densidades de siembra de 70, 20, 80, 25, 70, 5, 20 kg semilla ha⁻¹, respectivamente. Además se incluyó una consociación de avena+vicia, con densidades de 20 y 40 kg semilla ha⁻¹, respectivamente. Los tratamientos se fertilizaron en el momento de la siembra de los CC con 14,7 kg P₂O₅ ha⁻¹. La vicia se inoculó con *Rhizobium leguminosarum* biovar *viceae*, inmediatamente antes de la siembra.

El maíz (*Zea mays* L), DK 747, se sembró en líneas separadas a 0,70 m y con 0,20 m entre plantas (≈ 75.000 plantas ha⁻¹). A la siembra se realizó una fertilización de base con 32 kg P₂O₅ ha⁻¹ y en V₅₋₆ se fertilizó con 32 kg N ha⁻¹ aplicado al voleo en el entresurco (urea). La dosis de fertilizante nitrogenado fue determinada a partir del método del balance, asumiendo una demanda de 213 kg N ha⁻¹ para un rendimiento objetivo de 9,0 Mg ha⁻¹, una oferta de N del suelo de 189 kg ha⁻¹ y una eficiencia

de uso del fertilizante del 75%. El cultivo de soja (*Glycine max* L), var. Don Mario 50048, se sembró a una distancia entre hileras de 0,52 m (≈ 500.000 plantas ha⁻¹). La soja se inoculó con *Bradyrhizobium* sp y no se fertilizó con N ni P. El ciclo de los CC se interrumpió con 3-4 L ha⁻¹ de glifosato (48% principio activo). En el caso del cultivo de maíz, con fechas de siembra de septiembre-octubre, los CC antecesores se secaron a mediados de agosto (en estado vegetativo e inicio del reproductivo) y para el cultivo de soja, con fechas de siembra de octubre-noviembre, el secado se realizó a principios de octubre (en estado reproductivo).

Mediciones

Luego de seis años de rotación soja-maíz con y sin CC se extrajeron, al momento del secado de los CC antecesores de maíz (15/08/2011), 3 submuestras de suelo a 0-10 cm de profundidad y se formó una muestra compuesta por cada unidad experimental. Se determinó COS por el método de Walkley-Black (Nelson & Sommers, 1982), concentración total de glomalinas fácilmente extractable de acuerdo a Wright & Upadhyaya (1996) y estabilidad estructural por el método de Le Bissonais (1996). Además, se utilizaron las relaciones C/N de la biomasa aérea de los CC al momento del secado publicadas en Restovich *et al.* (2012).

Para determinar la estabilidad estructural se utilizaron tres submuestras de 10 g de agregados de 3-5 mm de diámetro secadas en estufa a 40 °C durante 24 horas. Luego, se aplicaron tres pre-tratamientos:

1. Humectación rápida por inmersión en agua. Se agregaron 10 g de agregados en 50 mL de agua destilada y se mantuvieron durante 10 minutos. Se extrajo el exceso de agua con una pipeta y se realizó el tamizado en húmedo.

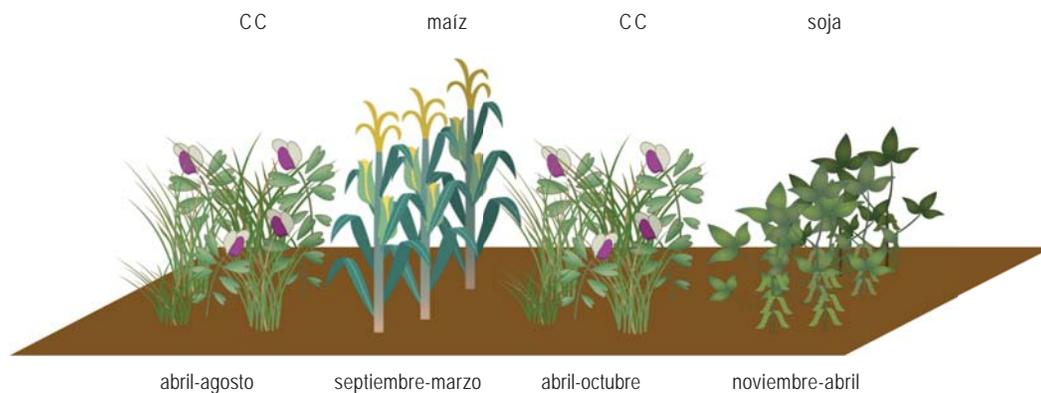


Figura 1. Esquema de la rotación del ensayo de larga duración con cultivos de cobertura. CC: vicia, avena+vicia, avena, cebadilla, ray grass y cebada.
Figure 1. Scheme of the crop sequence in the long-term experiment with cover crops. CC: vetch, oats+vetch, oats, rescue grass, ryegrass and barley.

2. Desagregación mecánica por agitación luego de la humectación en etanol. Se agregaron 10 g de agregados en 50 mL de etanol al 95% y se mantuvieron durante 30 minutos. Se retiró el exceso de etanol con una pipeta y se pasaron los agregados a 250 mL de agua destilada en un Erlenmeyer. Se agitó en forma manual simulando el impacto de la gota de lluvia (10 movimientos péndulos suaves desde la cintura pasando por la altura de los ojos y llegando nuevamente al otro lado de la cintura (Diego Cosentino comun pers). Se dejó reposar durante 30 minutos, luego se retiró el exceso de agua y se realizó el tamizado en húmedo.
3. Humectación lenta por capilaridad. Tabla de tensión con un potencial mátrico de -0,3 kPa. Se colocaron 10 g de agregados sobre un papel de filtro sobre la tabla de tensión. Se esperó que ocurriera la re-humectación en forma completa (no menos de 60 minutos) y luego se realizó el tamizado en húmedo.

Al finalizar los pre-tratamientos se realizó el tamizado en húmedo. Para ello se colocaron los agregados en un tamiz de 50 μm sumergido en etanol (aparato de Hénin) para realizar la primera separación granulométrica en húmedo a través de un movimiento vertical combinado con movimientos de semirrotación (Hénin *et al.*, 1958). Luego, los agregados mayores a 50 μm se secaron en estufa a 40 °C por 48 horas. Posteriormente, estos agregados fueron tamizados por una columna de tamices que permitió separar los agregados por tamaño: >2000 μm , 2000-1000 μm , 1000-500 μm , 500-200 μm , 200-100 μm y 100-50 μm . Se pesaron los agregados retenidos sobre cada tamiz. La fracción <50 μm se calculó como la diferencia entre el peso inicial y la suma de las otras 6 fracciones. El diámetro medio ponderado (DMP) de cada pre-tratamiento, identificado como DMPe para el pre-tratamiento de humectación rápida o efecto estallido, DMPd para el pre-tratamiento de desagregación mecánica y DMPc para el pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad, se obtuvo mediante la suma de las masas relativas de las fracciones remanentes en cada tamiz multiplicadas por la apertura media de los tamices adyacentes:

$$\frac{\sum[\% \text{partículas retenidas en el tamiz} * \text{diámetro medio entre dos tamices (mm)}]}{100}$$

El promedio de los DMP de los pre-tratamientos representa el diámetro medio ponderado medio (DMPm) y sintetiza la información obtenida a partir de los tres pre-tratamientos. De acuerdo al DMPm la estabilidad estructural se clasifica como: muy inestable (<0,4), inestable (0,4-0,8), moderadamente estable (0,8-1,3), estable (1,3-2,0) y muy estable (>2,0).

Análisis estadístico

Para comparar los DMP de los distintos pre-tratamientos entre los tratamientos con y sin CC se utilizó el análisis de la

varianza y la comparación de medias se realizó a través del test de Duncan ($p < 0,10$). Los resultados de DMP de los pre-tratamientos analizados por separado cumplieron con el supuesto de normalidad pero no cumplieron con el supuesto de homogeneidad de varianzas. Se aplicaron las transformaciones correspondientes. Sólo el pre-tratamiento de desagregación mecánica pudo ser corregido con la transformación Arcseno; el resto de los resultados se analizó mediante el Procedimiento Mixed de SAS (ProcMixed) (SAS, 2009). Se realizaron regresiones lineales entre los distintos DMP, el COS, el contenido total de glomalinas y la relación C/N de los rastros con el Procedimiento REG de SAS (SAS, 2009).

RESULTADOS

Los DMPe de la consociación avena+vicia, cebadilla, avena y vicia fueron mayores que los del testigo, rye grass y cebada (Fig. 2a). Luego del pre-tratamiento de desagregación mecánica, los DMPd de los agregados de los tratamientos con gramíneas (excepto cebadilla) como CC fueron mayores que el del testigo (Fig. 2b). Luego del pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad no se encontraron diferencias en los DMPc entre los tratamientos evaluados (Fig. 2c).

El DMPm de los tratamientos con CC fue superior al del testigo sin CC, pero no hubo diferencias entre las especies o consociación utilizadas (Fig. 3). El DMPm de los agregados varió entre 1,91 y 2,03 mm en los tratamientos con CC, mientras que el valor del testigo fue de 1,61 mm. Según la clasificación de Le Bissonnais (1996), la estabilidad estructural en la rotación soja-maíz sin CC es estable y cuando se introducen CC la estructura del suelo es estable o muy estable (en el caso de la avena+vicia). El COS y el contenido de glomalinas fue similar entre tratamientos y varió entre 16,2 y 18,9 g kg⁻¹ y entre 1,31 y 1,56 $\mu\text{g mL}^{-1}$ para COS y glomalinas, respectivamente (Tabla 1).

El contenido total de glomalinas se relacionó con los DMP obtenidos luego de los pre-tratamientos de humectación rápida o estallido (DMPe) ($R^2=0,69$; $p < 0,02$) y de humectación lenta por capilaridad (DMPc) ($R^2=0,59$; $p < 0,02$) (Figs. 4 y 5, respectivamente) pero no se relacionó con el DMP obtenido luego del pre-tratamiento de desagregación mecánica (DMPd) ($R^2=0,02$ $p < 0,77$). El COS se relacionó con el DMP obtenido luego del pre-tratamiento de humectación rápida o estallido (DMPe) ($R^2=0,49$; $p < 0,08$; Fig. 6) y no mostró relación con los de desagrega-

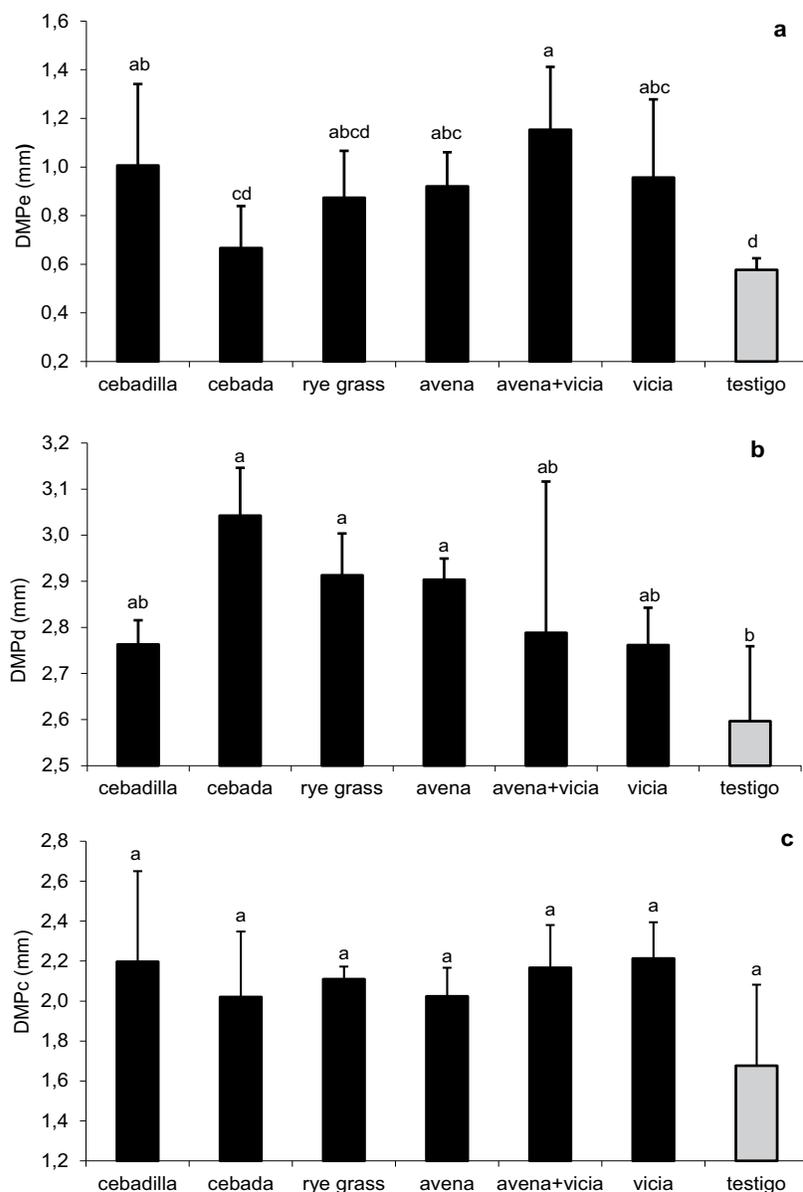


Figura 2. Diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados para los tratamientos con y sin cultivos de cobertura luego de cada uno de los tres pre-tratamientos del método de Le Bissonnais: a) humectación rápida por inmersión en agua (DMPe), b) desagregación mecánica (DMPd) y c) humectación lenta por capilaridad (DMPc). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$).

Figure 2. Mean weight diameter of aggregates from treatments with (rescue grass, barley, ryegrass, oats, oats + vetch and vetch) and without cover crops (control) after each pretreatment of the Le Bissonnais method: a) fast wetting (abbreviated DMPe in Spanish) b) mechanical breakdown (abbreviated DMPd in Spanish) and c) slow wetting (abbreviated DMPc in Spanish). Different letters indicate significant differences among treatments ($p < 0.10$).

ción mecánica y de humectación lenta por capilaridad. El contenido total de glomalin en el suelo permitió explicar el 60% de la variación del DMPm ($p < 0,04$; Fig. 7), en cambio, el COS no explicó la variación del DMPm de los diferentes tratamientos.

La estabilidad de los agregados también estuvo relacionada con la calidad de la biomasa aérea de los CC descrita a partir de su relación C/N. Los valores de DMPd del pre-tratamiento de desagregación mecánica se asociaron con la relación C/N de la biomasa aérea de los CC al momento

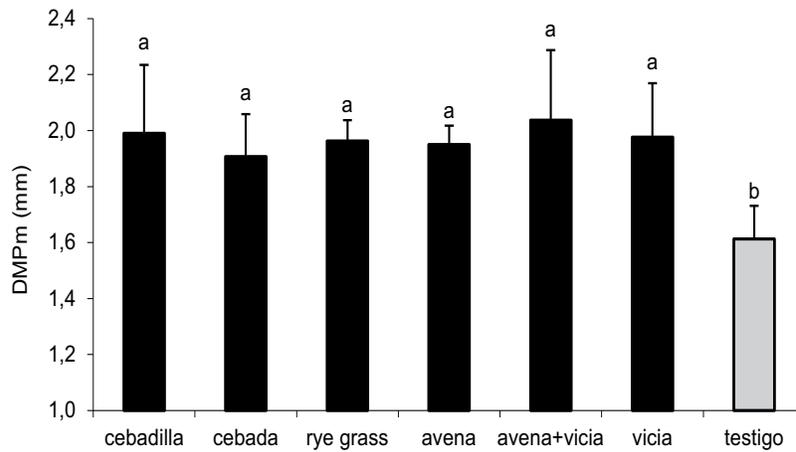


Figura 3. Diámetro medio ponderado medio (DMPm) para los tratamientos con y sin cultivos de cobertura. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,06$).

Figure 3. Average mean weight diameter (abbreviated DMPm in Spanish) of aggregates from treatments with (rescue grass, barley, ryegrass, oats, oats + vetch and vetch) and without cover crops (control). Different letters indicate significant differences among treatments ($p < 0.06$).

Tabla 1. Carbono orgánico del suelo (COS) y concentración de glomalininas luego de seis años de rotación soja-maíz con y sin (testigo) cultivos de cobertura. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$).
Table 1. Soil organic carbon and total glomalin concentration after six years of maize-soybean rotation with and without (control) cover crops. Different letters indicate significant differences among treatments ($p < 0.10$).

Tratamiento	COS (g kg^{-1})	Concentración de glomalininas ($\mu\text{g mL}^{-1}$)
Cebadilla	18,0 a	1,56 a
Cebada	17,1 a	1,40 a
Rye grass	17,2 a	1,39 a
Avena	17,6 a	1,50 a
Avena + vicia	18,9 a	1,50 a
Vicia	17,1 a	1,47 a
Testigo	16,2 a	1,31 a

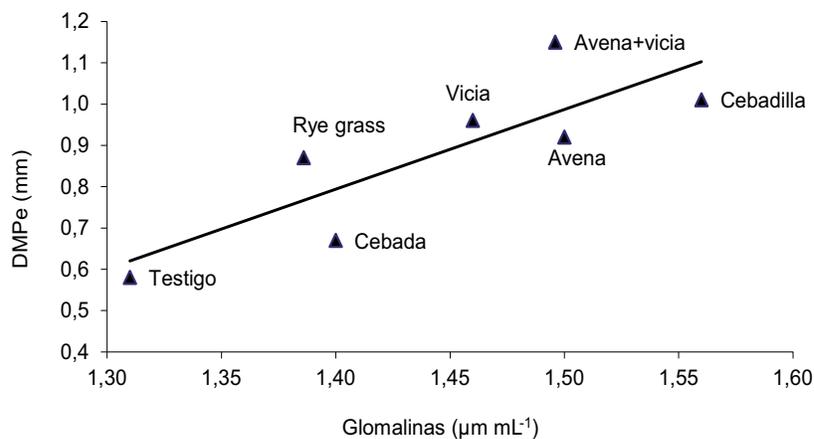


Figura 4. Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de humectación rápida o estallido (DMPe) y el contenido total de glomalininas para los tratamientos con y sin cultivos de cobertura ($R^2 = 0,69$; $p < 0,02$).

Figure 4. Relationship between mean weight diameter of aggregates from treatments with (rescue grass, barley, ryegrass, oats, oats + vetch and vetch) and without cover crops (control) after fast wetting pretreatment of the Le Bissonnais method (abbreviated DMPe in Spanish) and soil glomalin content ($R^2 = 0.69$; $p < 0.02$).

Figura 5.
Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad (DMPc) y el contenido total de glomalinas para los tratamientos con y sin cultivos de cobertura ($R^2=0,59$; $p<0,04$).

Figure 5.
Relationship between mean weight diameter of aggregates from treatments with (rescue grass, barley, ryegrass, oats, oats + vetch and vetch) and without cover crops (control) after slow wetting pretreatment of the Le Bissonnais method (abbreviated DMPc in Spanish) and soil glomalin content ($R^2=0.59$; $p<0.04$).

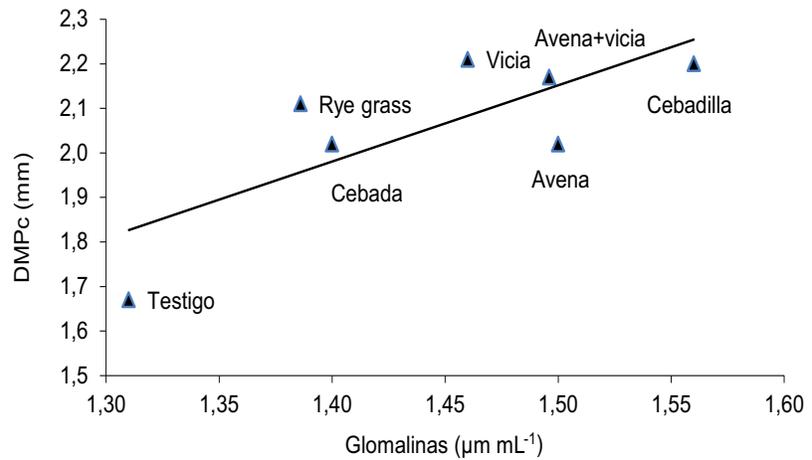


Figura 6.
Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de humectación rápida o estallido (DMPe) y el carbono orgánico del suelo (COS) para los tratamientos con y sin cultivos de cobertura ($R^2=0,49$; $p<0,08$).

Figure 6.
Relationship between mean weight diameter of aggregates from treatments with (rescue grass, barley, ryegrass, oats, oats + vetch and vetch) and without cover crops (control) after fast wetting pretreatment of the Le Bissonnais method (abbreviated DMPe in Spanish) and soil organic carbon (COS) ($R^2=0.49$; $p<0.08$).

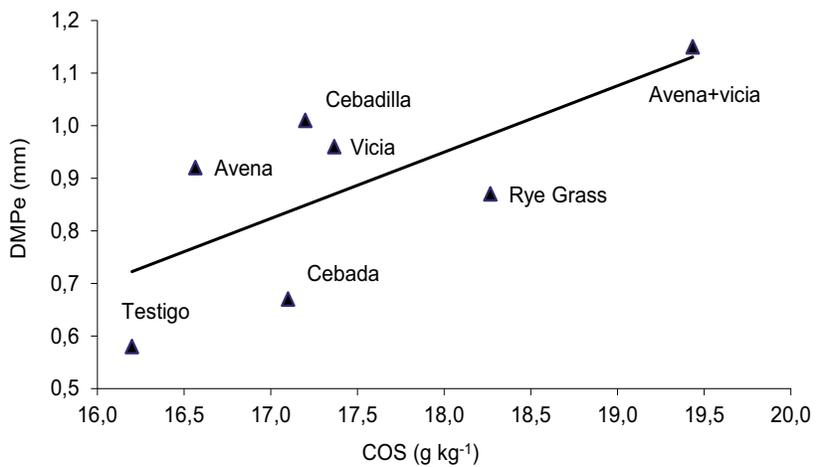
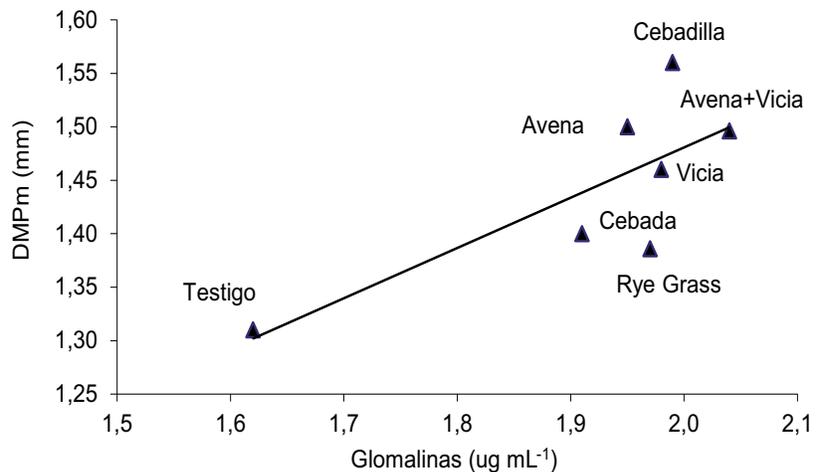


Figura 7.
Relación entre el diámetro medio ponderado (DMPm) de los agregados y el contenido total de glomalinas para los tratamientos con y sin cultivos de cobertura ($R^2=0,60$; $p<0,04$).

Figure 7.
Relationship between average mean weight diameter (abbreviated DMPm in Spanish) of aggregates from treatments with (rescue grass, barley, ryegrass, oats, oats + vetch and vetch) and without cover crops (control) and soil glomalin content ($R^2=0.60$; $p<0.04$).



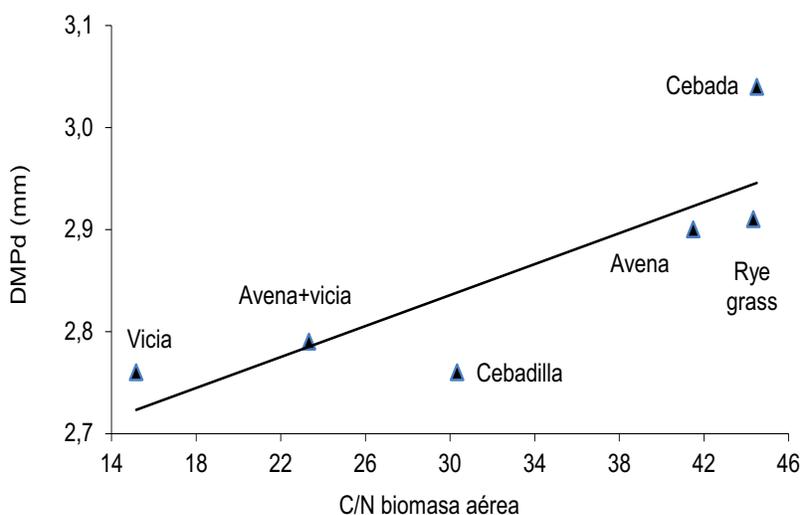


Figura 8.
Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de desagregación mecánica (DMPd) y la relación C/N de la biomasa aérea de los distintos cultivos de cobertura al momento del secado (promedio de 6 años) ($R^2=0,70$; $p<0,03$).

Figure 8.
Relationship between mean weight diameter of aggregates from treatments with (rescue grass, barley, ryegrass, oats, oats+vetch and vetch) and without cover crops (control) after mechanical breakdown pretreatment of the Le Bissonnais method (abbreviated DMPd in Spanish) and average C/N ratio of the different cover crops at killing ($R^2=0.70$; $p<0.03$).

del secado 2011 ($R^2=0,84$; $p<0,01$), y también con el promedio de las relaciones C/N obtenidas durante los 6 años de ensayo ($R^2=0,70$; $p<0,03$; Figura 8).

DISCUSIÓN

Luego de seis años de rotación soja-maíz, todos los tratamientos que incluyeron cultivos de cobertura mejoraron la estabilidad de los agregados (DMPm) en comparación con la rotación sin CC. La introducción de CC en la rotación generó diferentes producciones de biomasa aérea a lo largo de los años (Restovich *et al.*, 2012) y así también diferentes aportes de carbono al sistema. En el corto plazo (dos años de rotación con CC) estos aportes de carbono orgánico se relacionaron con mejoras temporarias en la estabilidad de los agregados (Sasal & Andriulo, 2005; Restovich *et al.*, 2011), sin embargo, nuestros resultados de mediano plazo indican que el COS no contribuyó a mejorar la estabilidad global de agregados. Existen controversias respecto del papel de la MOS en relación con la estabilidad estructural, especialmente cuando se establecen asociaciones con la materia orgánica total y no con alguna de sus fracciones más activas como la materia orgánica particulada. Por este motivo, es relevante tener en cuenta otros agentes de agregación, como la glomalina producida por los hongos micorrízicos arbusculares (Rillig *et al.*, 2002), que en nuestro trabajo mostraron una buena relación con la estabilidad estructural (Figs. 3 y 4).

Además de evaluar la estabilidad global de los agregados del suelo, el método de Le Bissonnais (1996) permite analizar la respuesta a distintos mecanismos de de-

sagregación por acción del agua a través de diferentes pre-tratamientos. Así, valores de DMP mayores ocurren cuando luego de un pretratamiento predominan los agregados de mayor diámetro, significando que el suelo es más estable frente a ese pretratamiento. En la medida que un suelo presenta menor estabilidad, los pre-tratamientos provocan mayor disgregación y predominan los agregados de menor diámetro que se traducen en valores de DMP menores. En el caso del pre-tratamiento de humectación rápida, las diferencias en el DMPe entre los tratamientos con CC y el testigo estuvieron asociadas al COS y al contenido de glomalinas. La MOS aumenta la cohesión interna de las partículas y la porosidad del suelo, disminuyendo el estallido de los agregados luego de una lluvia intensa sobre suelo seco. Cosentino *et al.* (2006) reportaron un aumento del 28% en la resistencia al estallido en un suelo con aportes externos de rastrojos con respecto al mismo suelo sin aportes. Por otro lado, la inclusión de CC en el período otoño-invernal extiende el período con raíces vivas en el suelo que funcionan como huéspedes para hongos micorrízicos. Las glomalinas producidas por sus hifas cubren y saturan los poros de los agregados, impidiendo que el agua ingrese abruptamente, protegiéndolos así del efecto estallido (Rillig, 2004). Abiven *et al.* 2007 observaron que la estabilidad estructural luego de este pre-tratamiento aumentaba en función de la longitud de las hifas de los hongos presentes en el suelo. Las distintas especies utilizadas como CC varían en su capacidad de micorrización: la cebada, por ejemplo, posee una baja eficiencia de asociación con hongos micorrízicos (Baon *et al.*, 1993; Boyetchko & Tewari, 1994; Chen *et al.*, 2004; Lehmann &

Rillig, 2013). Sin embargo, no se puede inferir que la cebada genere poca agregación, debido a que la glomalina y el COS no son los únicos factores determinantes de la estabilidad estructural del suelo. Las raíces también generan una fuerte cohesión entre los agregados del suelo, aumentando la estabilidad estructural (Abiven *et al.*, 2009). La habilidad de las diferentes especies para mejorar la estabilidad estructural del suelo está relacionada con su crecimiento radical y actividad rizosférica donde se generan diferentes sustancias cementantes (ej. polisacáridos) (Mardhiah *et al.*, 2014; Rillig *et al.*, 2014). De este modo, a través del COS, las glomalinas y las raíces, los CC generaron una estructura más estable frente a la lluvia, especialmente cuando se utilizó cebadilla, avena, vicia y avena+via como CC.

En el pre-tratamiento desagregación mecánica, las diferencias entre los tratamientos con gramíneas como CC y el testigo estuvieron asociadas a la calidad (relación C/N) de la biomasa aérea producida. La avena, la cebada y el rye grass presentaron las mayores relaciones C/N a lo largo de seis años de ensayo en comparación con el resto de los CC (Restovich *et al.*, 2012). Los rastrojos en superficie protegen al suelo del impacto de la gota de lluvia (Sasal *et al.*, 2010). Nuestros resultados indican que la perdurabilidad de los residuos de estas gramíneas habría contribuido a proteger en mayor medida a los agregados de la acción de la gota de lluvia en el mediano plazo. No obstante, Abiven *et al.* (2007) observaron que luego de este pre-tratamiento la estabilidad estructural se relacionó con la longitud de las hifas de los hongos del suelo, demostrando que estos últimos también proporcionan resistencia a la desagregación mecánica.

El pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad es menos agresivo que los de humectación rápida y de desagregación mecánica, y sólo permite detectar diferencias de estabilidad de agregados bajo situaciones de manejo muy contrastantes (Gabioud *et al.*, 2011). A partir de este pretratamiento no se pudieron diferenciar las rotaciones; sin embargo, después del pretratamiento de humectación lenta, la proporción de agregados de mayor tamaño (>2000 μm) fue mayor en los tratamientos con CC que en el testigo (51 y 35%, respectivamente) (datos no mostrados). Abiven *et al.*, 2007 observaron que los valores de estabilidad estructural luego de este pre-tratamiento estuvieron relacionados con los polisacáridos de los distintos residuos incorporados al suelo. En nuestro estudio, el DMPC se relacionó con el contenido de glomalinas del suelo como agente cementante.

CONCLUSIONES

La inclusión de especies de ciclo otoño-invernal como cultivos de cobertura durante los períodos de barbecho mejoró, en el mediano plazo, la estabilidad estructural del suelo respecto de la rotación sin CC. Esta mejora estuvo asociada, particularmente, al COS y al contenido de glomalinas que participaron como agentes agregantes, siendo más importante el efecto de las glomalinas que el COS.

El método propuesto por Le Bissonnais permitió detectar diferencias de estabilidad entre los tratamientos con y sin CC, y entre las especies utilizadas como CC, y comprender los mecanismos de protección de los agregados asociados a cada especie o familia de especies. Algunas especies mejoraron la estabilidad estructural a través de la protección contra el estallido de los agregados asociada al COS y al contenido de glomalinas del suelo (cebadilla, avena+via, vicia, y avena) y otras a través de la protección contra el impacto de la gota de lluvia por la perdurabilidad de los rastrojos (rye grass, cebada y avena). La avena fue la única especie que aumentó el DMPm a través de los dos mecanismos.

En este trabajo se demostró que los CC constituyen una herramienta útil para mejorar la estructuración del suelo en el contexto del cambio tecnológico que caracterizó a los sistemas agrícolas pampeanos en las últimas décadas. En el futuro los agroecosistemas tendrán que hacer frente a una mayor variabilidad climática con mayor presencia de eventos de lluvia extremos, con el consiguiente deterioro de la estructura del suelo. Por lo tanto, es importante seguir evaluando cómo los CC pueden estimular la estructuración del suelo y también su capacidad de recuperación bajo escenarios climáticos variables en el largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo económico del INTA a través de los Proyectos PNSUELO 1134042 "Aprovechamiento de residuos para aumentar el reciclaje en el suelo. Sumideros de C y emisiones del suelo" y 1134023 "Indicadores de calidad del suelo para el monitoreo de la sustentabilidad de sistemas productivos". Agradecemos a D Cosentino y a P García París por la revisión y aportes al trabajo. También agradecemos a DA Colombini y F Villalba por su ayuda con las tareas de campo, a LS García y D Chavarría por las determinaciones de carbono orgánico del suelo y glomalinas y a Catalina Amendola por el apoyo estadístico.

BIBLIOGRAFÍA

- Abiven, S; S Menasseri; DA Angers & P Leterme. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *European Journal of Soil Science* 58: 239-247.
- Abiven, S; S Menasseri & C Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biol. Biochem.* 41: 1-12.
- Baon, JB; SE Smith & AM Alston. 1993. Mycorrhizal responses of barley cultivars differing in P efficiency. *Plant Soil* 157: 97-105.
- Boyetchko, SM & JP Tewari. 1994. Susceptibility of barley cultivars to vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Can. J. Plant Sci.* 75: 269-275.
- Caride, C; G Piñeiro & JM Paruelo. 2012. How does agricultural management modify ecosystem services in the Argentine Pampas? The effects on soil C dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154: 23-33.
- Chen, B; P Roos; OK Borggaard; YG Zhu & I Jakobsen. 2004. Mycorrhiza and root hairs in barley enhance acquisition of phosphorus and uranium from phosphate rock but mycorrhiza decreases root to shoot uranium transfer. *New Phytol.* 165: 591-598.
- Cosentino, D; C Chenu & Y Le Bissonnais. 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.* 38: 2053-2062.
- de Rouw, A; S Huon; B Souleth; P Jouquet; A Pierret; O Ribolzi; C Valentin; E Bourdon & B Chantharath. 2010. Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valley, Laos). *Agric Ecosyst Environ* 136: 148-161.
- Gabioud, EA; MG Wilson & MC Sasal. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 29: 129-139.
- Goss, MJ & BD Kay. 2005. Soil Aggregation. In: Zobel, RW, Wright, SF (eds), *Roots and Soil Management: Interactions between Roots and the Soil*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, pp. 163-180.
- Hénin, S; G Monnier & A Combeau. 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 9: 73-92.
- Irizar, A; A Andriulo & B Mary. 2013. Long-term impact of no tillage in two intensified crop rotations on different soil organic matter fractions in Argentine rolling Pampa. *Open Agriculture Journal* 7: 22-31.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Lehmann, A & MC Rillig. 2013. Are there temporal trends in root architecture and soil aggregation for *Hordeum vulgare* breeding lines? *Appl. Soil Ecol.* 65: 31-34.
- Magdoff, F & R Weil. 2004. Soil organic matter in Sustainable Agriculture. Pp. 45-65. In: F Magdoff & R Weil (eds). *Soil Organic Matter Management Strategies*. CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Mardhiah, U; T Caruso; A Gurnell & MC Rillig. 2014. Just a matter of time: Fungi and roots significantly and rapidly aggregate soil over four decades along the Tagliamento River, NE Italy. *Soil Biol. Biochem.* 75: 133-142.
- Nelson, DW & LE Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 539-579 In: AL Page *et al.* (eds). *Methods of soil analysis*. Part 2. Agronomy Monograph 9, 2nd.ed. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.
- Novelli, LE; OP Caviglia; MG Wilson & MC Sasal. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196: 260-267.
- Restovich, SB; A Andriulo & C Amendola. 2011. La inclusión de cultivos de cobertura en una rotación soja-maíz: efecto sobre algunas propiedades del suelo. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 29: 61-73.
- Restovich, SB; AE Andriulo & SI Portela. 2012. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crop Res.* 128: 62-70.
- Rillig, MC; SF Wright & VT Eviner. 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant Soil.* 238: 325-333.
- Rillig, MC. 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Can. J. Plant Sci.* 84: 355-363.
- Rillig, MC; CA Aguilar-Trigueros; J Bergmann; E Verbruggen; SD Veresoglou & A Lehmann. 2014. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation. *New Phytol.* 205: 1385-1388.
- SAS. 2009. SAS/STAT User's Guide. SAS institute inc. 9.2. Cary, North Caroline, USA.
- Sasal, MC & AE Andriulo. 2005. Cambios en la porosidad edáfica bajo siembra directa por la introducción de *Raphanus sativus* L (Nabo forrajero). *RIA* 34: 131-150.
- Sasal, MC; AE Andriulo & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Sasal, MC; MG Castiglioni & MG Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.
- Schipanski, ME; M Barbercheck; MR Douglas; DM Finney; K Haider; JP Kaye; AR Kemanian; DA Mortensen; MR Ryan; J Tooker & C White. 2014. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agr. Syst.* 125: 12-22.
- Six, J; ET Elliott & K Paustian. 2000. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1042-1049.
- Six J; H Bossuyt; S Degryze & K Denef. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79: 7-31.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Soil Sci.* 33: 141-163.
- Viglizzo EF; FC Frank; LV Carreño; EG Jobbgay; H Pereyra; J Clatt; D Pincen; MF Ricard. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biol* 17: 959-973.
- Wright, S. 2005. Management of arbuscular mycorrhizal fungi. Pp. 183-197. In: RW Zobel & SF Wright (eds). *Roots and Soil Management: Interactions between Roots and the Soil* Vol. 48. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.
- Wright, SF; VS Green & MA Cavigelli. 2007. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. *Soil Till. Res.* 94: 546-549.
- Wright, SF & A Upadhyaya. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci.* 161: 575-586.
- Wright, S & A Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97-107.