

EFECTO DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA SOBRE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DEL SUELO EN LA ROTACIÓN SOJA-MAÍZ: APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LE BISSONNAIS.

Tesina

del alumno

HUGO MARTÍN GONZALEZ

Este trabajo ha sido presentado como requisito

para la obtención del título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Carrera: Ingeniería Agronómica

Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales.
Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.

Pergamino, Mayo de 2015

EFECTO DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA SOBRE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DEL SUELO EN LA ROTACIÓN SOJA-MAÍZ: APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LE BISSONNAIS.

Tesina

del alumno

HUGO MARTÍN GONZALEZ

Aprobada por el Tribunal Evaluador de Tesina

.....

.....

Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales.
Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.

Pergamino, Mayo de 2015

Agradecimientos

En Primer lugar a mi familia que fue un pilar que me sostuvo y me acompañó a crecer y caminar este nuevo camino que fue estudiar una carrera universitaria.

A mis directores por aceptar dirigir este trabajo final de grado que sin su ayuda todo este trabajo no se hubiera podido llevar a cabo.

A todo el grupo humano de INTA Pergamino, en especial la parte de suelos, por su amabilidad, hospitalidad e integración al gran grupo de trabajo que conforman.

A la Ing. Silvina Portela, por su incansable paciencia y excelente predisposición a colaborar, eliminar dudas y acompañar en la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional del Noroeste de Buenos Aires, mi hogar estos últimos años, de donde me llevo los mejores recuerdos y el más grato cariño

Por último, pero no por ello menos importante, a mis amigos, que son el gran pilar que me sostuvo y acompañó a través de los años.

Índice

1. Introducción.....	5
2. Materiales y métodos.....	14
2.1 Puesta a punto del método y control de calidad de datos.....	15
2.2 Descripción del ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.....	16
2.3 Muestreo del suelo en el ensayo.....	17
2.4 Método de Le Bissonnais.....	18
2.5 Otras determinaciones de suelo realizadas.....	22
2.6 Análisis estadístico.....	22
3. Resultados.....	24
3.1 Control de calidad del patrón de laboratorio.....	25
3.2 Estabilidad de los agregados en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura.....	27
3.3 Evaluación de los pre-tratamientos del método de Le Bissonnais.....	28
3.4 Estabilidad de los agregados determinada por el método de Le Bissonnais y su relación con algunas propiedades de suelo y cultivo.....	32
4. Discusión.....	38
5. Conclusiones.....	44
6. Sugerencias para trabajos futuros.....	46
7. Bibliografía.....	49

1. Introducción

Los suelos franco limosos de la Pampa Ondulada manejados bajo siembra directa (SD) y empleando secuencias de cultivo con predominio de soja, registran una progresiva disminución de su fertilidad física y química (Lavado, 2006). Entre las causas fundamentales de dicha pérdida, se han señalado los largos períodos de barbecho otoño-invernal; el bajo aporte anual de carbono orgánico al suelo, el que puede alcanzar $2-3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Restovich *et al.*, 2012); y el balance negativo de nutrientes (extracciones del sistema con las cosechas de granos que superan las reposiciones al suelo vía fijación biológica y fertilización) que está asociado a la excesiva participación del cultivo de soja en los planteos productivos (Ferrari, 2009).

Los suelos conducidos con este sistema de cultivo presentan poca cobertura de rastrojos, baja estabilidad de la estructura, tendencia a la compactación y una infiltración reducida debido a la presencia de una estructura laminar con orientación de poros preferencialmente horizontal (Sasal *et al.*, 2006). Ante estas condiciones, lluvias de variada intensidad pueden provocar, con el impacto de la gota de lluvia y el escurrimiento superficial, mayor deterioro de la estructura del suelo. Por lo tanto, cualquier práctica de manejo que conduzca a un aumento de la cohesión entre las partículas del suelo va a incrementar la resistencia frente a los procesos de desagregación.

La introducción de cultivos de cobertura (CC) en sistemas agrícolas cada vez menos diversificados podría constituir una herramienta agronómica para mitigar esta degradación edáfica y mejorar la estructura del suelo, ya que durante el período de crecimiento de los CC sus sistemas radicales interactúan con procesos del suelo, generando agregación estable, aumentando la porosidad total y la infiltración, y disminuyendo la compactación (Magdoff &

Weil, 2004). Además, reducen las pérdidas por lixiviación de nitratos y aportan materia seca al sistema (Restovich *et al.*, 2012).

La estabilidad de los agregados es una característica física del suelo que se estudia desde los años '30 y es uno de los indicadores más utilizados para determinar el estado de la estructura del suelo (Six *et al.*, 2000). La estabilidad estructural está afectada por muchos factores: la textura, la mineralogía de la arcilla, la actividad microbiana y sus exudados, el laboreo del suelo, la secuencia y frecuencia de cultivos en la rotación, y el contenido de cationes, aluminio, óxidos de hierro y materia orgánica del suelo (MOS). Esta última es de gran importancia, ya que puede modificarse con diferentes prácticas de manejo.

La MOS tiene al menos dos formas de estabilizar la estructura del suelo: incrementando la cohesión entre agregados y aumentando la hidrofobicidad de las partículas. Este último mecanismo trae como consecuencia la reducción del efecto estallido, produciendo una mejora en la estabilidad (Robert *et al.*, 1992).

Según Tisdall & Oades (1982), existen muchas relaciones positivas entre la MOS y la estabilidad del suelo en agua. Sin embargo, esta asociación no siempre se encuentra debido a que: 1) sólo una parte de la MOS es responsable de la estabilidad de agregados en agua, 2) si bien la estabilidad puede mostrar un incremento a medida que aumenta el contenido de carbono de la MOS, esta relación no siempre es lineal sino que eventualmente alcanza un plateau, en el cual un aumento de la MOS no produce una mayor estabilidad, 3) la MOS no es el mejor agente cementante de agregados, y 4) es más importante la disposición que la cantidad de MOS.

La actividad de los microorganismos, particularmente hongos y bacterias, es otro de los factores importantes en la agregación del suelo debido a que generan sustancias cementantes, haciendo los agregados más estables al agua (González-Chávez *et al.*, 2004). Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) representan la mayoría dentro del total de hongos en los agroecosistemas. Su importancia varía de acuerdo a fluctuaciones estacionales y a la disponibilidad de sustrato (Ej.: carbono). Los HMA optimizan la eficiencia en la absorción de N, P, micronutrientes y agua por los cultivos, a la vez que suprimen enfermedades y mejoran la estructura del suelo (Wright, 2005).

Los HMA producen una proteína insoluble denominada glomalina, que se relaciona con la estabilidad de los agregados porque los hace más hidrofóbicos (Wright & Upadhyaya, 1996). La glomalina posee una gran adhesividad y resistencia a la degradación, y presenta un contenido de C de 30-40% (Wright, 2005). Tisdall (1991) comprobó que las hifas de los HMA juegan un doble papel en la agregación y estabilización de los suelos. En primer lugar, mediante una acción mecánica envuelven y unen las partículas primarias con sus hifas (efecto directo) y, en segundo lugar, producen un agente cementante (efecto indirecto) (Miller & Jastrow, 1992). De este modo, las glomalinas se asocian directamente con la estabilidad de la estructura del suelo: mejoran la infiltración y la aireación, permiten un mejor desarrollo radical y una mayor actividad microbiana, y disminuyen la susceptibilidad del suelo al planchado y a la erosión hídrica y eólica, entre otros beneficios (Wright, 2005).

Un correcto uso del suelo se logra con buenas prácticas agronómicas y se refleja, entre otros efectos, en la mejor estructuración del suelo y en el aumento de la estabilidad de los agregados. Un suelo bien estructurado provee

un hábitat óptimo para el crecimiento tanto de los cultivos como de los microorganismos del suelo.

Los estreses externos que originan la desagregación del suelo pueden ser de distinta naturaleza: compactación, ruptura mecánica por las labranzas, erosión, eventos climáticos (lluvias de variada intensidad, ciclos de humedecimiento y secado del suelo, etc.), actividad de la fauna del suelo, pero el más habitual en los suelos agrícolas está relacionado con el humedecimiento abrupto (Grant & Dexter, 1990; Le Bissonnais, 1996). Teniendo en cuenta la relevancia de la acción del agua en este fenómeno, se pueden identificar diferentes mecanismos de desagregación:

- *Desagregación por compresión del aire ocluido que origina ruptura por efecto del estallido*: cuando el suelo se encuentra muy seco y se produce una lluvia de gran intensidad, los agregados se rompen rápidamente al humedecerse. El agua de lluvia desaloja abruptamente al aire del espacio poroso provocando la ruptura de los agregados del suelo.
- *Desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia*: ocurre cuando los agregados de suelo están parcialmente humedecidos o si la intensidad de la lluvia es baja (lluvia sobre un suelo humedecido por una lluvia anterior). Los agregados se rompen en agregados mucho más pequeños por el impacto de la gota de lluvia.

- *Microfisuración por hinchamiento diferencial (capilaridad)*: este proceso tiene lugar en suelos secos, cuando una lluvia muy leve o garúa provoca un humedecimiento gradual que va avanzando por las paredes de los agregados.

Existen diferentes métodos de laboratorio para medir la estabilidad de agregados de los suelos (De Leenher & De Boodt, 1958; Hénin *et al.*, 1958; Douglas & Goss, 1982; Kemper & Rosenau, 1986). Estos métodos en general tienden a atribuirle mayor importancia a alguno de los mecanismos individuales de desagregación, por lo que sus resultados son difíciles de comparar. En este contexto, Le Bissonnais (1996) propuso un método para analizar la desagregación en agua, teniendo en cuenta procedimientos ya existentes, incluyendo los propuestos por Yoder (1936), Hénin *et al.* (1958), Grieve (1980), y Kemper & Rosenau (1986), entre otros.

Para describir el comportamiento físico del suelo frente a una lluvia, el método de Le Bissonnais busca reproducir en el laboratorio los eventos que ocurren en el campo, para así poder medir la estabilidad estructural de la manera más representativa posible. Con este propósito, las muestras de agregados de 3-5 mm de diámetro son evaluadas luego de aplicarles distintos pre-tratamientos:

- Humectación rápida por inmersión en agua
- Desagregación mecánica por agitación después de la re-humectación en etanol
- Humectación lenta por capilaridad

El primer pre-tratamiento (humectación rápida por inmersión en agua) busca reproducir la respuesta de un suelo a una humectación repentina con lluvia de gran intensidad. Los poros del suelo contienen aire y agua, pero cuando se somete un agregado a una humectación rápida el aire del espacio poroso no encuentra lugar por donde escapar y comienza a ejercer presión contra las paredes de los poros dentro del agregado. Si esta presión supera la resistencia de los agregados, éstos se rompen. Este fenómeno se denomina efecto estallido.

El segundo pre-tratamiento (desagregación mecánica por agitación después de la re-humectación en etanol) permite evaluar el comportamiento de suelos húmedos frente al impacto de la gota de lluvia. En el laboratorio, el impacto de la gota de lluvia se simula mediante la agitación de la muestra de agregados, y para aislar o reducir el efecto de estallido el espacio poroso se satura previamente con etanol.

El tercer pre-tratamiento (humectación lenta por capilaridad) trata de reflejar el desempeño que tendrían suelos secos o poco húmedos ante lluvias moderadas. Con el mismo, se busca replicar el ascenso o entrada capilar del agua copiando la morfología de los agregados del suelo. Este pre-tratamiento es menos destructivo que el efecto estallido y sólo permite detectar diferencias marcadas de manejo.

Para disminuir los efectos nocivos de la acción del agua sobre los agregados del suelo existen distintos manejos agronómicos. La intensificación de las rotaciones agrícolas actuales con CC podría ayudar a favorecer la condición de la estructura, a través de la mayor diversidad de especies y la presencia de raíces vivas durante todo el año, generando mayor aporte de C al

suelo y beneficiando a la comunidad biológica. Para analizar este efecto de los CC sobre la estabilidad estructural, es importante contar con un método como el que propone Le Bissonnais, el cual permite evaluar los diferentes factores de desagregación por acción del agua y, a la vez, estudiar el efecto de mitigación que tienen los CC sobre la degradación estructural.

Hipótesis

La inclusión de cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz bajo siembra directa mantiene o mejora la estabilidad estructural del suelo en el mediano plazo y su efecto depende de la especie o consociación de especies utilizada.

Objetivos

Objetivo general: Evaluar el efecto de distintos cultivos de cobertura en el mediano plazo sobre la estabilidad estructural del suelo determinada por el método de Le Bissonnais luego de seis años de una rotación soja-maíz en siembra directa.

Objetivos específicos:

- Evaluar el método de estabilidad estructural de agregados propuesto por Le Bissonnais para utilizarlo como indicador de degradación bajo diferentes condiciones de manejo del suelo.
- Comparar diferentes especies de cultivos de cobertura como protectores de la estructura del suelo.

- Interpretar las diferencias observadas entre los cultivos de cobertura evaluados para elaborar recomendaciones aplicables a distintas situaciones de uso del suelo.
- Establecer relaciones entre la estabilidad estructural, el carbono orgánico del suelo, el contenido de glomalinas del suelo y la calidad de los residuos aportados en respuesta a la introducción de cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz.

2. Materiales y métodos

El presente trabajo fue desarrollado en dos etapas:

- 1) Aplicación del método de Le Bissonnais en muestras de un suelo poco alterado para obtener un patrón de control de datos de laboratorio.
- 2) Evaluación de la estabilidad estructural del suelo bajo distintos tratamientos en un ensayo de larga duración de cultivos de cobertura.

2.1 Puesta a punto del método y control de calidad de datos

Para la puesta a punto del método de Le Bissonnais, se utilizó un suelo patrón. El mismo fue obtenido de un sitio localizado en el campo experimental de la EEA-INTA Pergamino, el que en los últimos 100 años presentó pocos años de agricultura. En el mes de mayo de 2012 se extrajeron diez submuestras a 0-10 cm de profundidad con pala de punta hasta completar 50 kg aproximadamente. Cada pre-tratamiento del método de Le Bissonnais se repitió 25 veces. Posteriormente, se evaluaron las fluctuaciones de los resultados con el análisis de Westgard, el cual plantea “multireglas” de control de calidad interno. Este método utiliza una combinación de criterios o reglas de decisión para juzgar la aceptabilidad de una serie de análisis sobre la base de ciertos límites (Westgard *et al.*, 1981). Estos límites se establecen como la media más y menos 2 y 3 desviaciones standard: 2 desviaciones standard fijan el límite de alerta y 3 desviaciones standard fijan el límite de control (Westgard *et al.*, 1981).

Habiendo verificado que la variabilidad de los resultados de estabilidad estructural del suelo patrón se encontraba dentro de los límites admisibles, se utilizó el método de Le Bissonnais para medir la estabilidad de agregados de

las muestras de suelo del ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

2.2 Descripción del ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino

En 2005 se instaló un ensayo con CC intercalados en una rotación soja-maíz en la Estación Experimental Agropecuaria de Pergamino del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (33°51'S, 60°40'W). El suelo del sitio es un Argiudol típico de la serie Pergamino (pendiente < 0,3%). La textura del horizonte A es franco limosa. El clima es templado subhúmedo, con una temperatura media anual de 16,5 °C y precipitaciones medias anuales de 973 mm para los períodos 1967-2010 y 1910-2010, respectivamente (Base de datos de la EEA Pergamino de INTA).

El diseño experimental del ensayo es en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones y cada parcela mide 10 x 30 m.

Los CC se siembran en línea bajo SD y las especies evaluadas son: cebada forrajera (*Hordeum vulgare* L.), rye grass (*Lolium multiflorum* L.), avena (*Avena sativa* L.), cebadilla criolla (*Bromus unioloides* L.), y vicia (*Vicia sativa* L.), empleando densidades de siembra de 70, 20, 80, 25, y 70 kg semilla ha⁻¹, respectivamente. También se incluye una consociación de avena+via, la cual se siembra con densidades de 20 y 40 kg semilla ha⁻¹, respectivamente, y un testigo sin CC. A la siembra, los tratamientos con CC y el testigo se fertilizan con 14,7 kg P₂O₅ ha⁻¹. Las semillas de vicia se inoculan con *Rhizobium leguminosarum biovar viceae* inmediatamente antes de la siembra.

El maíz (*Zea mays* L.), híbrido DK 747 (Monsanto), se siembra a 0,70 m entre surcos a razón de ≈ 75.000 plantas ha^{-1} . A la siembra se fertiliza con 31,5 kg P_2O_5 ha^{-1} y en V5-6 la mitad de cada parcela se fertiliza con 32 kg N ha^{-1} como urea.

La soja (*Glycine max* [L.] Merr.), variedad DM 5.1, se siembra a 0,525 m entre hileras con una densidad de 500.000 plantas ha^{-1} . El cultivo no se fertiliza y la semilla es inoculada con *Bradyrhizobium japonicum*.

Las fechas de siembra de la soja y el maíz, y la distribución de las lluvias, definen el momento de secado de los CC: antes del maíz, los CC son secados hacia el final del invierno (agosto-septiembre), durante la etapa vegetativa, mientras que si el cultivo siguiente es soja, los mismos son secados en primavera (octubre), ya en estadios reproductivos (Restovich *et al.*, 2012). Los CC se secan químicamente con 3-4 l ha^{-1} de glifosato (48% principio activo).

2.3 Muestreo del suelo en el ensayo

En 2011, al momento de secado de los CC (15/08/2011), se realizó el muestreo de suelo en todas las parcelas de los tratamientos bajo estudio (7 tratamientos x 3 repeticiones = 21 parcelas). Las muestras fueron extraídas en la mitad de la parcela que recibe fertilizante nitrogenado en el cultivo de maíz, tomando en cada caso 3 submuestras a 0-10 cm de profundidad con pala de punta, para formar así una muestra compuesta por unidad experimental.

2.4 Método de Le Bissonnais

Las muestras de suelo obtenidas en el campo se trasladaron al laboratorio donde se desarmaron los terrones grandes a mano y se secaron en una atmósfera templada y ventilada. Posteriormente, se pasaron por una columna de dos tamices (el superior de 5 mm de diámetro y el inferior de 3 mm de diámetro) y se conservaron los agregados que quedaron retenidos entre ambos. Se pesaron tres submuestras de 10 g de agregados de 3-5 mm por muestra y luego se secaron en estufa a 40 °C durante 24 horas.

Las submuestras de agregados así acondicionadas fueron luego sometidas a tres pre-tratamientos:

- Pre-tratamiento 1: Humectación rápida por inmersión en agua o efecto estallido (DMPe):

Se colocaron 10 g de agregados en un vaso de precipitado con 50 cm³ de agua destilada y se dejó reposar durante 10 minutos. En ese lapso se hizo una observación visual del efecto estallido y, una vez transcurridos los 10 minutos y previa decantación de los agregados, se extrajo el exceso de agua con una pipeta, dejando los agregados listos para el tamizado en húmedo.

- Pre-tratamiento 2: Desagregación mecánica por agitación después de la re-humectación en etanol (DMPd):

Se introdujeron 10 g de agregados en un vaso de precipitado con 50 cm³ de etanol al 95% y se los dejó reposar 30 minutos para que ocurriera la re-humectación sin producir el efecto estallido. Se retiró el exceso de etanol con una pipeta y, con ayuda de una pizeta con agua destilada, se traspasaron los agregados a un erlenmeyer, completando con agua destilada hasta llevar el volumen total a 250 cm³.

Para simular el efecto mecánico de desagregación por el impacto de la gota de lluvia, se agitó el erlenmeyer en forma manual, efectuando 10 movimientos péndulos suaves manteniendo la regularidad del compás, desde la cintura pasando por la altura de los ojos y llegando nuevamente al otro lado de la cintura. Se dejó reposar durante 30 minutos, luego se retiró el exceso de agua con una pipeta y se procedió a realizar el tamizado en húmedo.

- Pre-tratamiento 3: Humectación lenta con agua por capilaridad (DMPc):

Sobre una tabla de succión con una depresión de 3 cm, se colocó una gomaespuma humedecida con agua destilada. Los 10 g de agregados se dispusieron sobre un papel de filtro colocado a su vez sobre la gomaespuma. Se esperó que ocurriera la re-humectación en forma completa (no menos de 60 minutos) y luego se realizó el tamizado en húmedo.

Tamizado en húmedo

Los agregados resultantes de los pre-tratamientos mencionados fueron colocados sobre un tamiz de 50 μm con ayuda de una pizeta con etanol. El tamiz se instaló en el aparato de Hénin de modo de quedar sumergido $\frac{3}{4}$ partes en un recipiente con etanol al 95%. Este aparato permite, mediante el accionar de una manivela, realizar un movimiento vertical combinado con movimientos de semi-rotación (Hénin *et al.*, 1958). Con cada submuestra, este movimiento se repitió cinco veces, a un ritmo regular y moderado, para realizar la primera separación granulométrica (<50 μm y >50 μm).

Se recuperó el contenido mayor a 50 μm , se lo colocó en una caja de Petri (con ayuda de una pizeta con etanol) y se lo dejó secar en estufa a 40 °C por 48 horas. Concluido ese tiempo, se procedió al tamizado en seco.

Tamizado en seco

La fracción mayor a 50 μm recuperada del tamizado en húmedo y secada, se filtró por una columna de tamices con el fin de lograr la distribución de agregados para los tamaños >2.000 μm , 2.000-1.000 μm , 1.000-500 μm , 500-200 μm , 200-100 μm y 100-50 μm . A tal efecto, se pesaron todos los agregados retenidos sobre cada tamiz y la fracción menor a 50 μm se calculó por diferencia del peso inicial. El diámetro medio ponderado (DMP) de cada pre-tratamiento se obtuvo mediante la suma algebraica de las masas relativas de las fracciones remanentes de cada tamiz multiplicadas por la apertura media de los tamices adyacentes, como lo indica la siguiente fórmula:

Σ [Diámetros medios entre dos tamices (mm)] * [% de partículas retenidas sobre el tamiz]/100

O bien:

$[(3,5 * \% >2 \text{ mm}) + (1,5 * \% 2-1 \text{ mm}) + (0,75 * \% 1-0,5 \text{ mm}) + (0,35 * \% 0,5-0,2 \text{ mm}) + (0,15 * \% 0,2-0,1 \text{ mm}) + (0,075 * \% 0,1-0,05 \text{ mm}) + (0,025 * \% <0,05 \text{ mm})] / 100$

A su vez, con el promedio de los tres pre-tratamientos se elabora un índice para cada muestra, el diámetro medio ponderado medio (DMPm), que sintetiza la información obtenida con los tres pre-tratamientos evaluados. La Tabla 1 muestra la clasificación de los suelos de acuerdo a su DMPm (Le Bissonnais, 1996).

Tabla 1. Clasificación de la estabilidad estructural de acuerdo al DMPm según Le Bissonnais (1996).

Diámetro medio ponderado medio (DMPm) (mm)	Estabilidad
<0,4	Muy inestable
0,4-0,8	Inestable
0,8-1,3	Moderadamente estable
1,3-2,0	Estable
>2,0	Muy estable

2.5 Otras determinaciones de suelo realizadas

Otra parte de las muestras de suelo extraídas se utilizó para analizar carbono orgánico del suelo (COS) y contenido total de glomalinas. El COS se determinó en el Laboratorio Regional de la EEA-INTA Pergamino por combustión húmeda mediante el método de Walkley-Black (Nelson & Sommers, 1982), y el contenido total de glomalinas se determinó en el IPAIVE-INTA (Instituto de Patología Vegetal del Centro de Investigaciones Agropecuarias) por el método de proteínas de suelo relacionadas con la glomalina (sigla en inglés: GRSP), fácilmente extractables, de acuerdo a Wright & Upadhyaya (1996).

2.6 Análisis estadístico

Para los datos de DMPm se utilizó el análisis de la varianza y la comparación de medias se realizó a través del test de Duncan ($p < 0,10$) utilizando SAS (SAS, 2009). Al analizar los resultados de DMP de los distintos pre-tratamientos por separado, se verificó que no cumplían con la homogeneidad de varianzas, por lo que se les aplicaron diferentes transformaciones. Sólo el pre-tratamiento de desagregación mecánica con re-humectación en etanol pudo ser corregido con la transformación Arc-seno; el resto de los resultados se analizó mediante el Procedimiento Mixed de SAS (ProcMixed) (SAS, 2009).

Se realizaron regresiones entre el DMP, el COS, el contenido total de glomalinas y otras variables con el Procedimiento REG de SAS (SAS, 2009).

3. Resultados

3.1 Control de calidad del patrón de laboratorio

Para el pre-tratamiento de humectación rápida o estallido, el valor promedio del DMPe fue 0,40 y su desvío standard 0,04 (Figura 1a). Para el pre-tratamiento de desagregación mecánica luego de la re-humectación en etanol, el DMPd medio fue de 2,20 y tuvo un desvío de 0,12 (Figura 1b). Por último, para el pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad los valores de media y desvío de DMPc obtenidos fueron de 2,35 y 0,77, respectivamente (Figura 1c). Todos los resultados obtenidos se ubicaron dentro del límite de alerta.

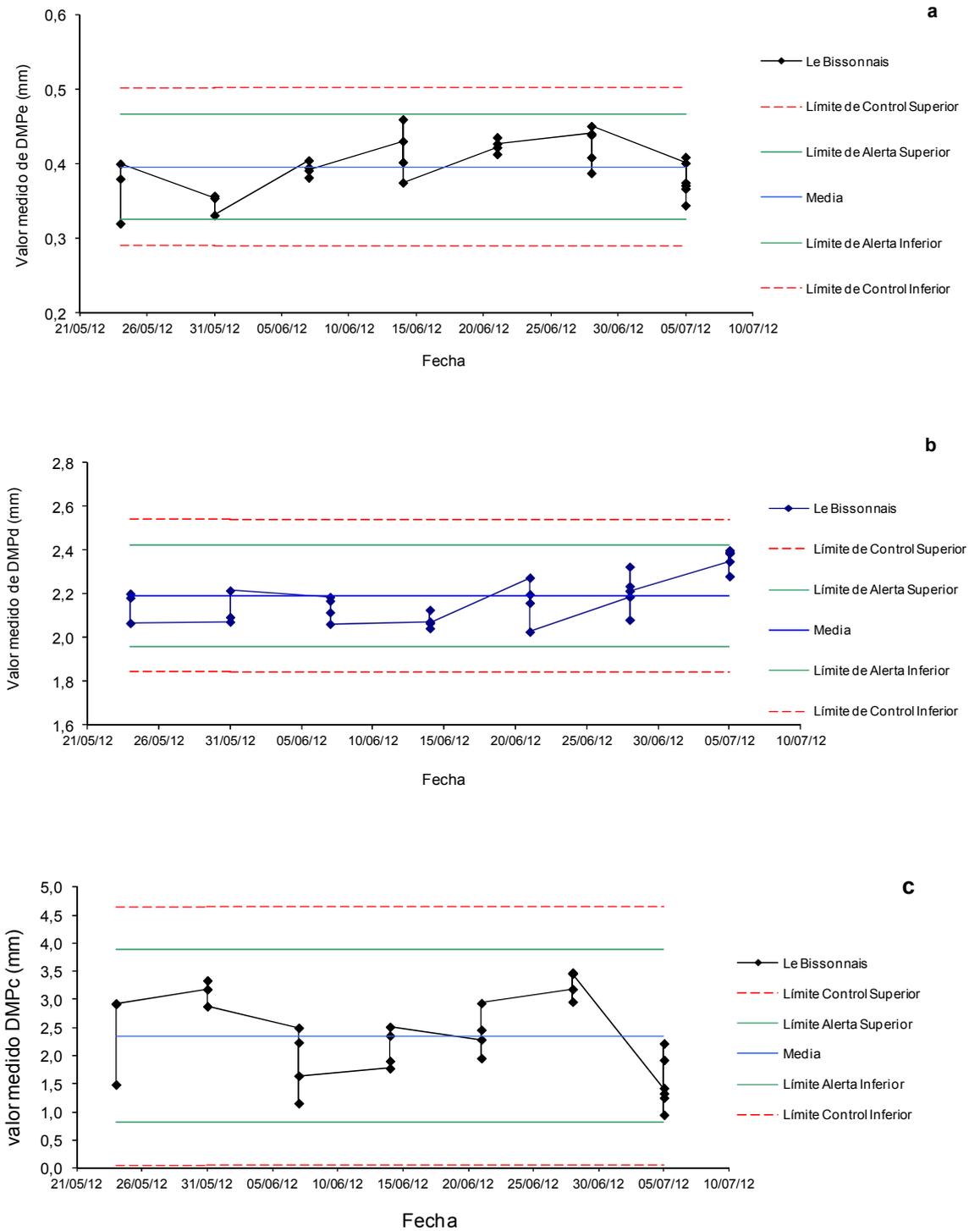


Figura 1. Diámetro medio ponderado (DPM) de agregados del patrón de laboratorio para los tres pre-tratamientos del método de Le Bissonnais: a) Humectación rápida por inmersión en agua (DMPe), b) Desagregación mecánica por agitación con re-humectación en etanol (DMPd), y c) Humectación lenta por capilaridad (DMPc).

3.2 Estabilidad de los agregados en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura

El DMPm de todos los tratamientos con CC fue superior al del testigo sin CC, no encontrándose diferencias entre las especies o consociación utilizadas (Figura 2). 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 rotación soja-maíz por sí misma produce suelo estable, y cuando se introducen CC la estructura del suelo se mantiene en esa categoría o pasa a ser muy estable (en el caso de la avena+vicia).

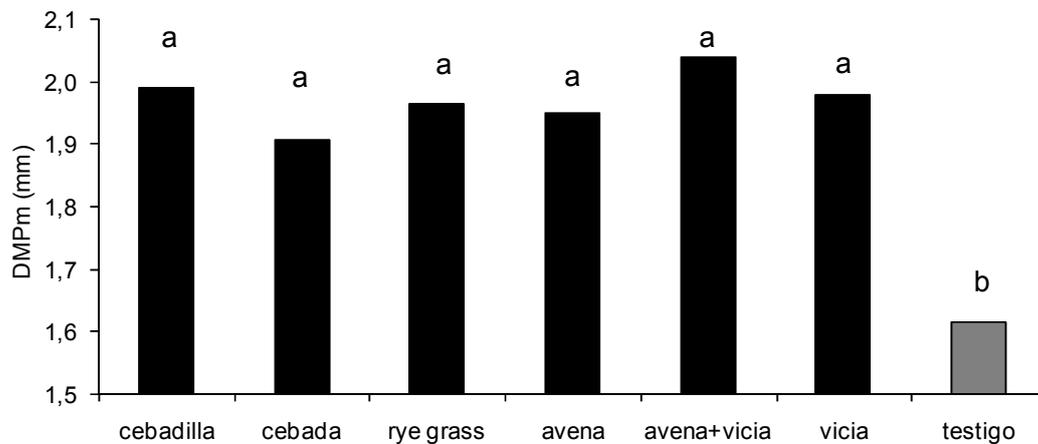


Figura 2. Diámetro medio ponderado medio (DMPm) para cada tratamiento del ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,06$).

3.3 Evaluación de los pre-tratamientos del método de Le Bissonnais

En el pre-tratamiento de humectación rápida o estallido (DMPe), la consociación avena+vicia, cebadilla, avena y vicia se diferenciaron estadísticamente del testigo, rye grass y cebada (Figura 3a). En el pre-tratamiento de desagregación mecánica luego de re-humectación con etanol, los agregados de los tratamientos con gramíneas (excepto cebadilla) como CC presentaron mayor DMPd que el testigo (Figura 3b). En el pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad (DMPc), no se encontraron diferencias en el DMPc entre los tratamientos (Figura 3c).

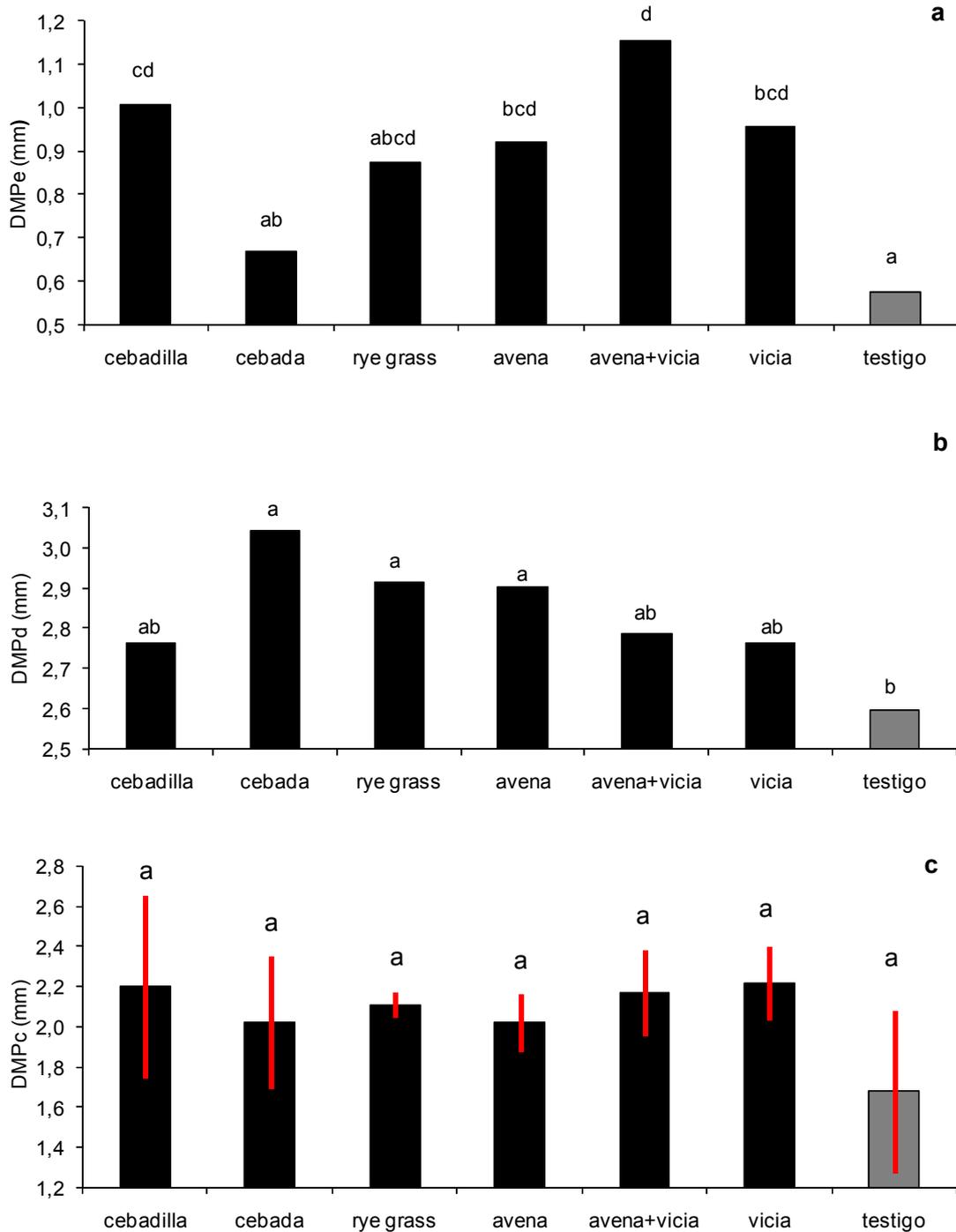


Figura 3. Diámetro medio ponderado (DMP) en los tratamientos del ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino para cada uno de los tres pre-tratamientos del método de Le Bissonnais: a) Humectación rápida por inmersión en agua (DMPe), b) Desagregación mecánica por agitación con re-humectación en etanol (DMPd), y c) Humectación lenta por capilaridad (DMPc). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$). Las líneas rojas representan el desvío standard de los valores de DMPc.

Para explicar las diferencias encontradas entre tratamientos, se analizó la distribución de la masa de agregados en la columna de tamices. Los CC que presentaron mayor estabilidad con el pre-tratamiento de humectación rápida o estallido (avena+vicia, cebadilla, avena y vicia) se diferenciaron del testigo mostrando entre un 5 y un 15% más de agregados retenidos en el tamiz de diámetro de malla más grande (2000 μm). Este test es considerado el más disruptivo. En la Figura 4a, puede observarse cómo se originaron agregados más pequeños a expensas de los agregados más grandes, tal como lo sugieren Tisdall & Oades (1982). Con el pre-tratamiento de desagregación mecánica (que simula el efecto del impacto de la gota de lluvia), en el testigo sólo el 67% de los agregados tuvieron un tamaño mayor a 2000 μm , mientras que los CC que mostraron un comportamiento estadísticamente superior (cebada, rye grass y avena) presentaron entre 78 y 83% de agregados de dicho diámetro. Al ser éste el test menos agresivo, mostró una gran proporción de agregados grandes en todos los tratamientos (Figura 4b). En el pre-tratamiento de humectación lenta, se observó entre un 11 y un 18% más de agregados >2000 μm con CC en comparación con el testigo (Figura 4c).

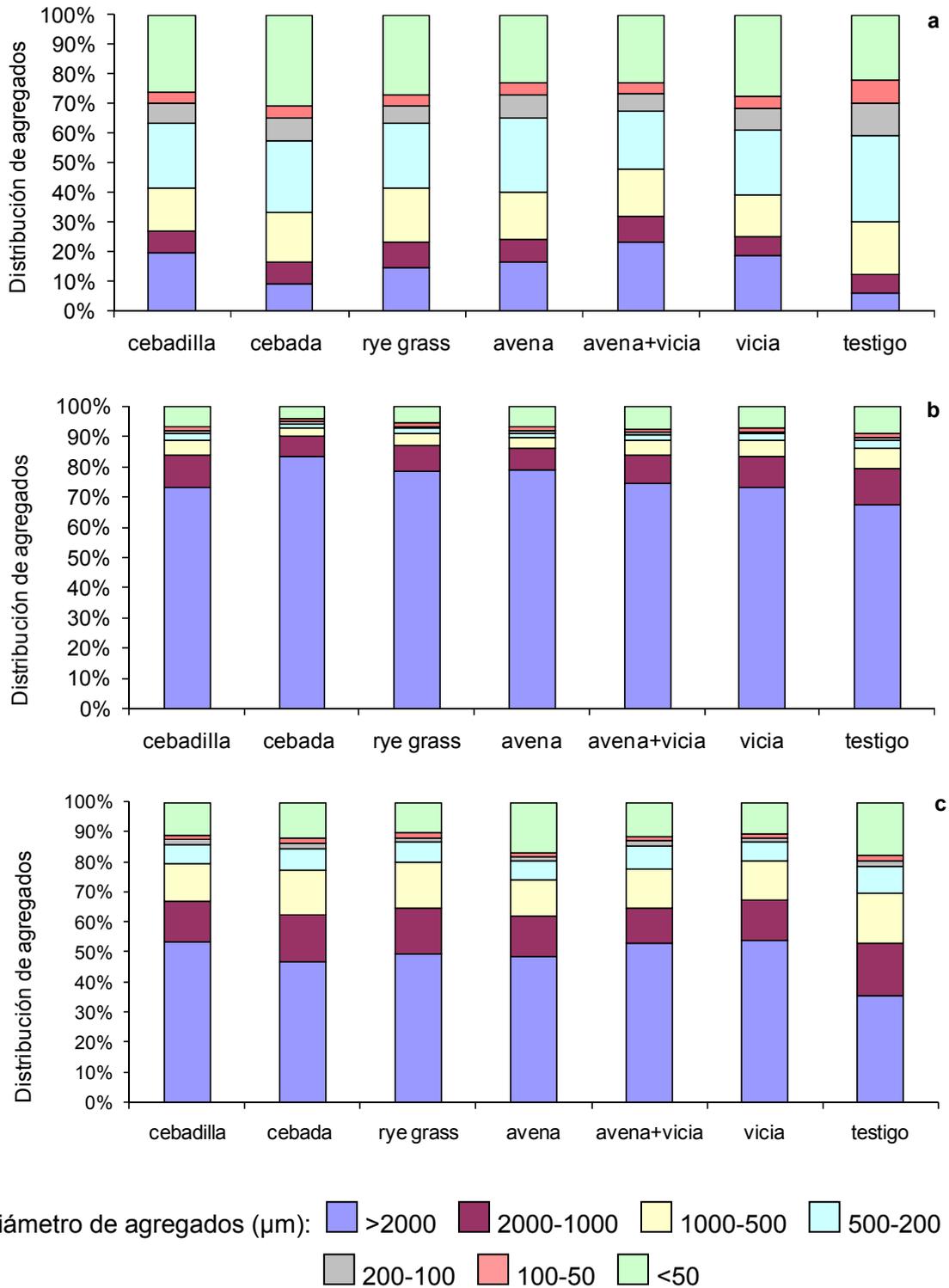


Figura 4. Distribución de la masa de agregados en los tratamientos del ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino para cada uno de los tres pre-tratamientos del método de Le Bissonnais: a) Pre-tratamiento de humectación rápida por inmersión en agua (estallido), b) Pre-tratamiento de desagregación mecánica por agitación con re-humectación en etanol, y c) Pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad.

3.4 Estabilidad de los agregados determinada por el método de Le Bissonnais y su relación con algunas propiedades de suelo y cultivo

No se encontraron diferencias entre los tratamientos para las variables COS y contenido total de glomalinas (Tabla 2).

Tabla 2. Carbono orgánico del suelo (COS) y contenido total de glomalinas en los diferentes tratamientos del ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino luego de 6 años de efectos acumulados.

Tratamiento	COS ⁽¹⁾ (g kg ⁻¹)	Contenido total de ⁽²⁾ glomalininas (µg 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

(1): No significativo ($p > 0,35$)

(2): No significativo ($p > 0,15$)

El COS no explicó significativamente la variación del DMPm con los diferentes tratamientos, a pesar del mayor aporte de carbono al suelo realizado por los distintos CC con respecto al testigo (Figura 5). El contenido total de glomalinas en el suelo, en cambio, mostró una mejor asociación con la estabilidad de los agregados y permitió explicar el 60% de la variación del DMPm observada en los diferentes tratamientos (Figura 6).

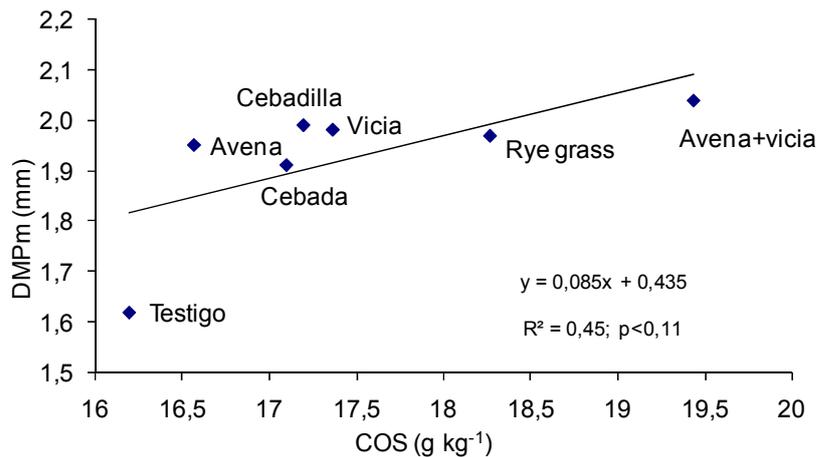


Figura 5. Relación entre el diámetro medio ponderado medio (DMPm) y el carbono orgánico del suelo (COS) en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

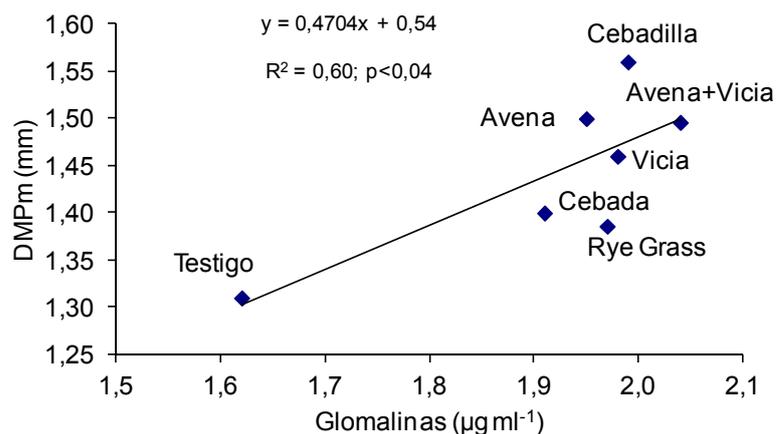


Figura 6. Relación entre el diámetro medio ponderado medio (DMPm) y el contenido total de glomalinas en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

Por otro lado, se analizó la relación entre estas variables químico-biológicas y el DMP obtenido con cada pre-tratamiento. Así, para los pre-tratamientos de humectación rápida o estallido (DMPe) y de humectación lenta por capilaridad (DMPc), se observó una relación positiva y significativa entre el DMP y el contenido total de glomalinas (Figuras 7 y 8, respectivamente), no

encontrándose en cambio asociación entre dichas variables para el pre-tratamiento de desagregación mecánica (DMPd) (Figura 9).

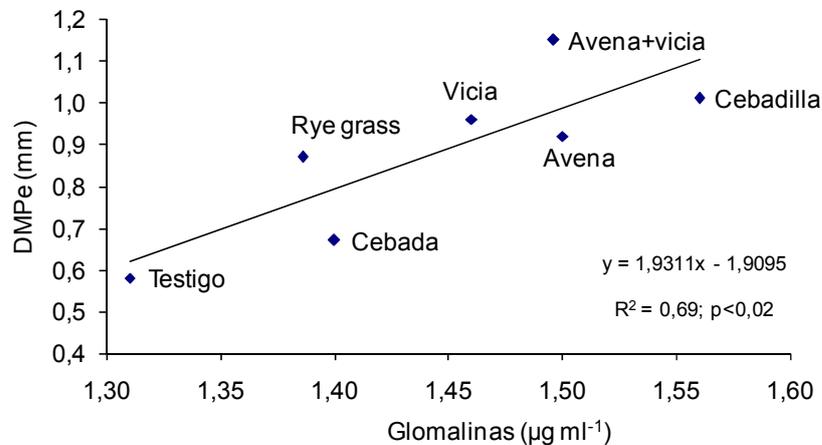


Figura 7. Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de humectación rápida o estallido (DMPe) y el contenido total de glomalinas en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

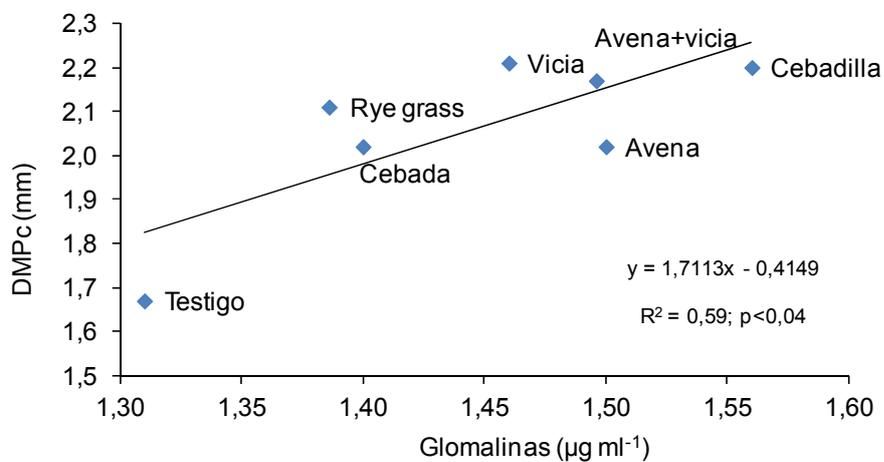


Figura 8. Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad (DMPc) y el contenido total de glomalinas en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

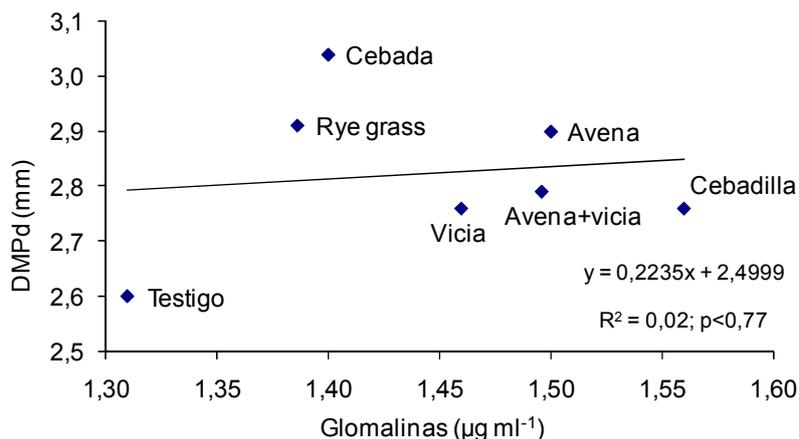


Figura 9. Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de desagregación mecánica (DMPd) y el contenido total de glomalinas en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

El COS se relacionó significativamente sólo con el DMP obtenido con el pre-tratamiento de humectación rápida o estallido (DMPe) (Figura 10), no así con los de desagregación mecánica y de humectación lenta por capilaridad (Figuras 11 y 12, respectivamente).

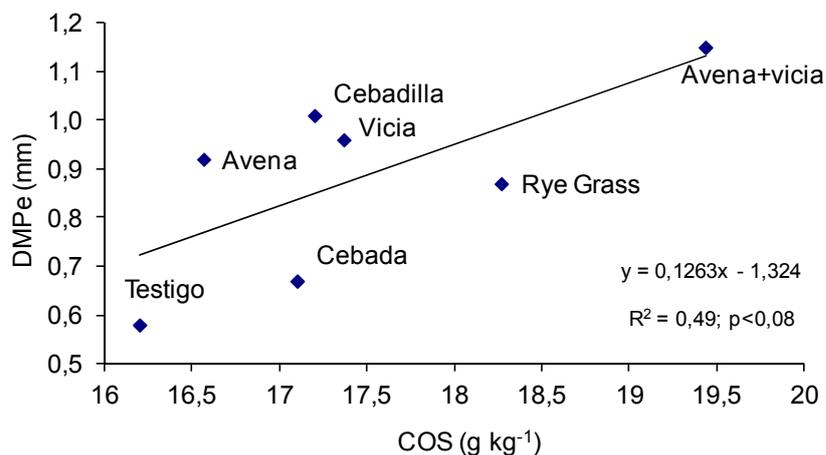


Figura 10. Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de humectación rápida o estallido (DMPe) y el carbono orgánico del suelo (COS) en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

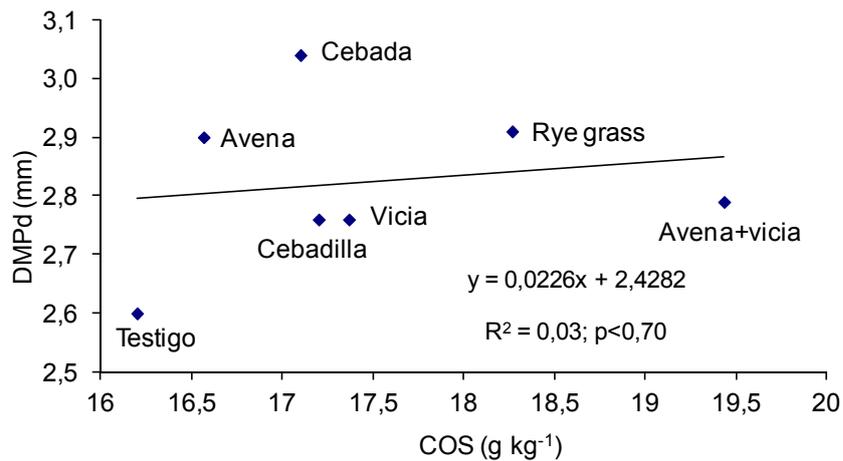


Figura 11. Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de desagregación mecánica (DMPd) y el carbono orgánico del suelo (COS) en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

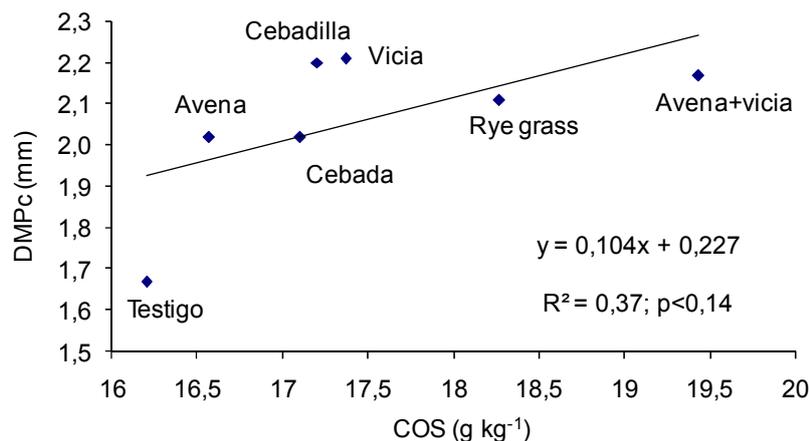


Figura 12. Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad (DMPc) y el carbono orgánico del suelo (COS) en el ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

La estabilidad de los agregados también estuvo asociada con la calidad de la biomasa aérea de los CC descrita a partir de su relación C/N. Los valores de DMP del pre-tratamiento de desagregación mecánica (DMPd) se asociaron positivamente con la relación C/N de la biomasa aérea de los CC al momento de secado en 2011, y también con el promedio de los valores de esta

variable determinados durante los últimos 6 años del ensayo (Figuras 13 y 14, respectivamente).

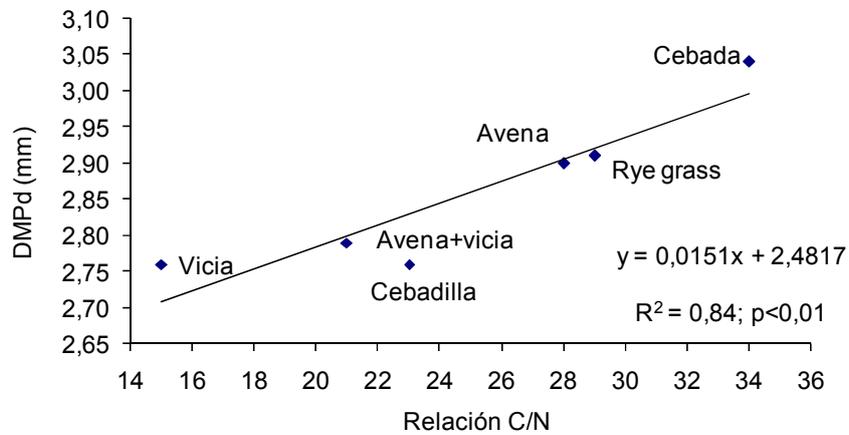


Figura 13. Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de desagregación mecánica (DMPd) y la calidad de la biomasa aérea (relación C/N, determinada en el momento de secado en 2011) de los diferentes cultivos de cobertura del ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

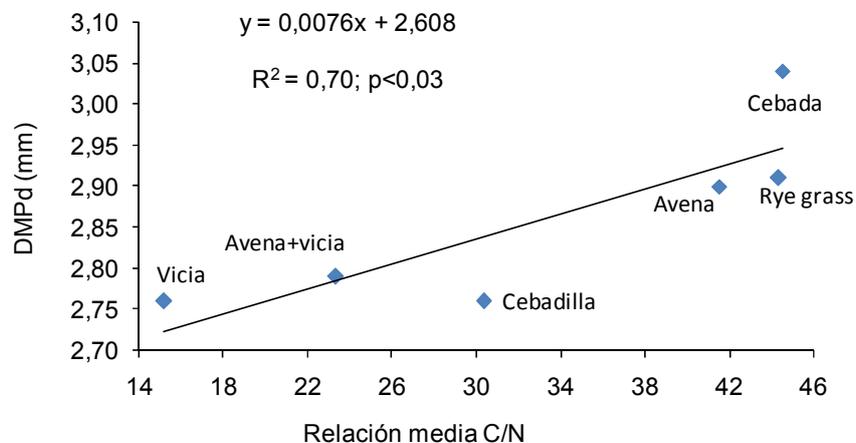


Figura 14. Relación entre el diámetro medio ponderado del pre-tratamiento de desagregación mecánica (DMPd) y la calidad media de la biomasa aérea (relación C/N media, evaluada durante 6 años) de los diferentes cultivos de cobertura del ensayo de larga duración de cultivos de cobertura de la EEA Pergamino.

4. Discusión

En el proceso de agregación del suelo están involucrados agentes físicos, químicos y biológicos. La agregación es un importante componente de la estructura que está fuertemente influenciada por propiedades hidrológicas, mecánicas y biológicas del suelo (Goss & Kay, 2005).

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. Estos resultados están en concordancia con trabajos previos, en los cuales se reportó que los cultivos de cobertura mejoran la estabilidad de los agregados en el corto plazo (Sasal & Andriulo, 2005; Restovich *et al.*, 2011)

Además de evaluar la estabilidad global de la estructura del suelo, el método de Le Bissonnais (1996) permite analizar distintos mecanismos de desagregación por acción del agua a través de los resultados obtenidos con diferentes pre-tratamientos de las muestras, lo cual posibilita así disponer de una mayor sensibilidad para detectar diferencias entre situaciones de manejo. En este sentido, el pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad no permitió establecer diferencias entre los tratamientos de CC, pero sí fue posible hacerlo con el de humectación rápida y el de desagregación mecánica. Gabioud *et al.* (2011) encontraron que los tres pre-tratamientos fueron sensibles, pero dicho estudio fue realizado bajo condiciones más contrastantes de manejo que las evaluadas en el presente trabajo.

En el tratamiento de humectación rápida, las diferencias encontradas entre los CC y el testigo estuvieron asociadas al COS y al contenido de glomalinas. Con respecto a esto último, varios autores reportaron diferencias en la capacidad de micorrización entre especies utilizadas como CC. La

cebada, por ejemplo, posee una baja eficiencia de asociación con hongos micorrícicos (Baon *et al.*, 1993; Boyetchko & Tewari, 1994; Chen *et al.*, 2004; Lehmann & Rillig, 2013). Sin embargo, no se puede inferir que la cebada sea un cultivo que genere poca agregación, debido a que los hongos micorrícicos no son el único factor determinante de la estabilidad estructural del suelo. Probablemente, la presencia de raíces también haya influido en la mayor estabilidad de los agregados que fue encontrada bajo los cultivos de cobertura, debido a que en el momento del secado hay muchas raíces vivas, las cuales generan una fuerte cohesión entre los agregados del suelo, aumentando de esta manera su estabilidad (Abiven *et al.*, 2009). La diferente habilidad de las especies para mejorar la estabilidad estructural estaría así también relacionada con su crecimiento radical y la actividad rizosférica (Mardhiah *et al.*, 2014, Rillig *et al.*, 2014).

La MOS ayuda a aumentar la cohesión interna de las partículas y la porosidad del suelo, haciendo disminuir el grado de estallido, lo cual redundaría en una mejora de la estabilidad de la estructura del suelo. 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 permite disponer de raíces vivas en el suelo durante todo el año, las que funcionan como huéspedes para los hongos micorrícicos. Las glomalinas por ellos producidas cubren y saturan los poros de los agregados, impidiendo que el agua ingrese en ellos abruptamente, protegiéndolos así del efecto estallido (Rillig, 2004). De este modo, a través de las raíces, el COS y las glomalinas, los CC habrían generado una estructura más estable frente a la acción del agua, haciendo

prevalecer una mayor cantidad de agregados de diámetro $>2000 \mu\text{m}$ luego del pre-tratamiento de humectación rápida, especialmente cuando se usó cebadilla, avena, vicia y avena+viaja como CC.

En el ensayo de larga duración evaluado, la producción de biomasa aérea de los CC en 2011 varió entre 2100 y 2900 kg materia seca (MS) ha^{-1} . Estas producciones son relativamente bajas en comparación con los valores medios del ensayo, que fueron de 4300 kg MS ha^{-1} para las gramíneas, 5600 kg MS ha^{-1} para la vicia y 6600 kg MS ha^{-1} para la consociación avena+viaja (Restovich *et al.*, 2012). En 2011 la producción de MS estuvo afectada por la baja disponibilidad hídrica durante el período de crecimiento, habiéndose registrado sólo 95 mm de lluvia desde la siembra hasta el momento del secado. La cantidad y la calidad de los rastrojos en superficie protegen al suelo del impacto de la gota de lluvia (Sasal *et al.*, 2010). Los resultados obtenidos en este trabajo con el pre-tratamiento de desagregación mecánica se explicaron más por la calidad (relación C/N) que por la cantidad de la biomasa aérea de las gramíneas (datos no mostrados). 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 cultivos de cobertura, independientemente del cultivo antecesor (Restovich *et al.*, 2012). La más prolongada perdurabilidad de los residuos de estos CC en superficie habría contribuido a proteger en mayor medida a los agregados de la acción destructora del impacto de la gota de lluvia en el mediano plazo. Esta acción de protección queda evidenciada cuando se analiza la distribución de la masa de agregados y se observa una mayor proporción de los de mayor tamaño ($>2000 \mu\text{m}$) para dichos cultivos.

El pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad no permitió diferenciar estadísticamente a los CC del testigo debido a la variabilidad que presentaron los datos. Sin embargo, la relación encontrada con las glomalinas estaría indicando que la actividad biológica puede influir sobre este parámetro físico. Uno de los beneficios de incluir CC en la secuencia es su contribución al mantenimiento de la actividad de los microorganismos en el suelo durante la mayor parte del año. La falta de sensibilidad que mostró el pre-tratamiento de humectación lenta por capilaridad para revelar los efectos de diferentes CC, puede deberse a que este test es menos agresivo que los de humectación rápida y de desagregación mecánica, y sólo permitiría detectar diferencias marcadas de estabilidad de agregados bajo situaciones de manejo muy contrastantes (Gabioud *et al.*, 2011). Aún con estas limitaciones, se pudo observar que la proporción de agregados de mayor tamaño ($>2000 \mu\text{m}$) fue superior para los tratamientos con CC que para el testigo. Por otro lado, es posible que en el largo plazo este pre-tratamiento permita diferenciar suelos de la rotación soja-maíz con y sin CC.

La introducción de cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz generó diferentes producciones de biomasa aérea a lo largo de los años (Restovich *et al.*, 2012) y así también diferentes aportes de C al sistema. Sin embargo, estas diferencias no modificaron el COS ni contribuyeron a lograr una mayor estabilidad global de agregados (DMPm) bajo los CC, poniendo en evidencia la importancia que tiene la biología del suelo sobre la estabilidad estructural. Esto también fue observado por Rillig *et al.* (2002). El papel de la MOS en relación con la estabilidad estructural está sujeto a ciertas controversias, especialmente cuando se intentan establecer asociaciones con la materia orgánica total (MOT)

y no con alguna de sus fracciones más activas (por ejemplo, la materia orgánica particulada o MOP). Por este motivo, es relevante tener en cuenta también otros agentes de agregación, como fuera realizado en este trabajo al analizar el efecto de las glomalinas, las que mostraron una buena relación con la estabilidad estructural en dos de los tres tests del método de Le Bissonnais.

5. Conclusiones

La inclusión de CC en sistemas agrícolas simplificados como el que actualmente prevalece en la Pampa Ondulada mejoró, en el mediano plazo, la estabilidad estructural del suelo. Esta mejora estuvo asociada, particularmente, a la actividad biológica producida por la mayor diversificación e intensificación del sistema de cultivo actual.

Algunos CC aumentaron el DMPm a través de la disminución del estallido de los agregados (cebadilla, avena+vicia, vicia, y avena) y otros a través de la protección del suelo del 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 procesos. Además, su mezcla con vicia genera beneficios adicionales al agroecosistema, por un lado porque aumenta la estructuración del suelo y por otro porque aporta N al cultivo siguiente.

El método propuesto por Le Bissonnais resultó sensible para detectar diferencias de estabilidad entre los tratamientos con y sin CC, y también para identificar algunas diferencias entre las distintas especies utilizadas como CC. La potencialidad del método es valiosa, ya que permite analizar en conjunto y por separado los efectos de los diferentes mecanismos de desagregación provocados por la acción del agua (tres pre-tratamientos) y cómo éstos son afectados por el manejo.

El COS y el contenido de glomalinas impactaron sobre la estabilidad de agregados; sin embargo, fue más fuerte el efecto de las glomalinas que el del COS. Esto podría estar indicando que los agregados del suelo en sistemas con CC tendrían mecanismos de formación complejos que involucran a los microorganismos y a los aportes de C a través de la biomasa aérea y radical.

6. Sugerencias para trabajos futuros

Los sistemas agrícolas simplificados que se desarrollan bajo las condiciones edafoclimáticas de la Pampa Ondulada, tienden a la degradación física y química del suelo. A partir de los resultados de esta tesina se comprobó que la inclusión de algunas especies de ciclo otoño-invernal durante los períodos de barbecho permite mejorar la estructuración del suelo. Sin embargo, es necesario continuar con un análisis más detallado por profundidad debido a que en los primeros centímetros de suelo (0-5 cm) es donde se produce la mayoría de los procesos que regulan la estabilidad de la estructura. Además, sería interesante evaluar mezclas de especies de CC en rotaciones agrícolas bajo SD para probar posibles efectos sinérgicos de los diferentes cultivos sobre la estructura del suelo, y también para profundizar el estudio de los mecanismos y agentes de agregación en relación a las especies puras.

Por otro lado, en el futuro los agroecosistemas tendrán que hacer frente a la variabilidad climática que se viene observando en el último tiempo y que produce una alteración en la distribución e intensidad normal de las lluvias, con el consiguiente impacto potencial sobre 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.

Adicionalmente, sería interesante continuar investigando en el mediano y largo plazo el efecto indirecto de los hongos micorrízicos, a través de las glomalinas, sobre la estabilidad de agregados en sistemas intensificados con CC. Asimismo, la incorporación del análisis de algunas fracciones del COS (por ejemplo, carbono orgánico particulado: COP), además del COS, podría

también contribuir a explicar mejor la relación de la MOS con la estabilidad estructural.

7. Bibliografía

- 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.
- 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.
- 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.
- De Leenher, L & M De Boodt. 1958. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. Inter. Symp. on soil structure. Medeligen. Rykskandbouwhogesechool, Gent. Belgie, 24: 290-300.
- Douglas, JT & MJ Goss. 1982. Stability and organic matter of surface soil aggregates under different methods of cultivation and in grassland. *Soil Till. Res.* 2: 155-175.
- Ferrari, M. 2009. Las MPM para los cultivos y sistemas de producción: Maíz en la Región Pampeana Central. Pp. 286-302 en: F García & I Ciampitti (eds.). Simposio Fertilidad 2009: Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI Cono Sur - Fertilizar Asociación Civil. Acassuso, Argentina.

- 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.
- González-Chávez, MCA; MC Gutiérrez-Castorena & S Wright. 2004. Hongos micorrízicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. *Terra Latinoamericana* 22: 507-514.
- Goss, MJ & BD Kay. 2005. Soil Aggregation Pp. 163-180 en: 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.
- Grant, CD & AR Dexter. 1990. Air entrapment and differential swelling as factors in the mellowing of molded soil during rapid wetting. *Soil Res.* 28: 361-369.
- Grieve, RAF. 1980. Impact bombardment and its role in proto-continental growth on the early Earth. *Precambrian Res.* 10: 217-247.
- Hénin, S; G Monnier & A Combeau. 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 9: 73-92.
- Kemper, WD & RC Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. Pp: 425-442 en: A Klute (ed.) *Methods of soil analysis, part 1.* Agronomy Monographs. Vol. 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
- Lavado, R. 2006. La Región Pampeana: historia, característica y uso de sus suelos. Pp. 1-11 en: R Álvarez (ed.). *Materia orgánica: Valor agronómico*

- y dinámica en suelos pampeanos. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina.
- 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 en: 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.
- Miller, RM & JD Jastrow. 1992. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. Pp. 29-44 en: GJ Bethlenfalvay & RG Linderman (eds.). *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.
- Nelson, DW & LE Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 539-579 en: 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.
- 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. 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.
- 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.
- Robert, M; C Chenu; G Stotzky & JM Bollag. 1992. Interactions between soil minerals and microorganisms. Pp. 307-404 en: *Soil Biochemistry*. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, Hong Kong.
- 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.

- 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.
- Tisdall, JM. 1991. Fungal hyphae and structural stability of soil. *Soil Res.* 29: 729-743.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Soil Sci.* 33: 141-163.
- Westgard, JO; PL Bary & MR Hunt. 1981. A multi-rule Shewhart chart for quality control in clinical chemistry. *Clin Chem.* 27: 493-501.
- Wright, S. 2005. Management of arbuscular micorrhizal fungi. Pp. 183-197 en: 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 & 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.
- Yoder, RE. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Agron J.* 28: 337-351.