

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS POR EL MÉTODO DE *LE BISSONNAIS* EN TRES ÓRDENES DE SUELOS

EMMANUEL ADRIÁN GABIOUD^{1,2}; MARCELO GERMÁN WILSON^{1,2*} & MARÍA CAROLINA SASAL²

Recibido: 28-02-11

Recibido con revisiones: 23-08-11

Aceptado: 25-08-11

APPLICATION OF THE *LE BISSONNAIS* METHOD TO ASSESS AGGREGATE STABILITY IN THREE SOILS ORDERS

ABSTRACT

Since aggregate stability is a dynamic characteristic, it is considered a sensitive indicator of a soil undergoing a process of recovery or degradation. In Argentina, different laboratory methods have been used to analyze the aggregate stability variation with respect to soil use. *Le Bissonnais* method, which is based on the classic Henin method, was developed by the INRA of France. This method provides the mean weighted diameter (DMP) of stable aggregates with three pretreatments: fast wetting (DMPE), mechanical disintegration followed by re-wetting with ethanol (DMPD), and slow wetting (DMPC). The average value is then used to determine a value that summarizes the information (DMPm). At a global level, this method has been used on different soils under varying climatic conditions. However, since its performance on Argentinian soils is not yet known, the aims of this work were: i) to evaluate the method of *Le Bissonnais* as an indicator of degradation in three types of soil (Mollisol, Vertisol and Alfisol) with different degrees of intervention; ii) to relate the DMP with organic carbon content; iii) to correlate the methodologies of *Le Bissonnais* and Hénin and iv) to quantify the time consumed by the aggregate stability procedure. *Le Bissonnais* method discriminated different use and management conditions in the three soils, reflecting trends towards either deterioration or recovery. We found a significant and positive relationship between carbon content and aggregate stability ($R^2=0.30$), and a significant correlation between both methods ($r=0.51$). The latter varied according to the soil, existing a high degree of correlation in the Mollisols, an intermediate degree of correlation in the Alfisol and no correlation in the Vertisol. There were associations between the coefficients of variation of both methods, being higher in those determined by Hénin. The results will contribute to gain insights into the analysis of the mechanisms of aggregation and disaggregation of each soil in relation to production systems. In turn, the determination of the threshold values of the resource will reveal trends and generate early warning of degradation processes.

Key words. Aggregate stability, *Le Bissonnais* method, Mollisol, Vertisol, Alfisol.

RESUMEN

La estabilidad de agregados, por ser una característica dinámica, es considerada un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos. En la Argentina se han aplicado diferentes métodos de laboratorio para conocer su variación respecto al uso. El método de *Le Bissonnais* basado en el método de Henin, fue desarrollado por INRA de Francia. Se obtiene el diámetro medio ponderado de agregados estables con tres pretratamientos: humectación rápida (DMPE); disgregación mecánica luego de re-humectación con etanol (DMPD) y humectación lenta por capilaridad (DMPC) y, con el promedio se determina un valor que sintetiza la información (DMPm). A nivel mundial fue aplicado en suelos de diferentes condiciones de clima y manejo; sin embargo, es necesario conocer su comportamiento en suelos de la Argentina. Los objetivos fueron: i) evaluar el método *Le Bissonnais* para utilizarlo como indicador de degradación en lotes con diferente grado de intervención en tres órdenes de suelo (Mollisol, Vertisol y Alfisol), ii) relacionar el DMP con el contenido de carbono orgánico (C), iii) correlacionar los métodos de *Le Bissonnais* y Hénin y iv) cuantificar el tiempo operativo requerido en el procedimiento de determinación de la estabilidad de agregados. El método resultó ser sensible para discriminar condiciones de uso y manejo en los tres suelos analizados, reflejando tendencias al deterioro y a la recuperación. Se encontró relación positiva y significativa entre contenido de carbono orgánico y estabilidad de agregados ($R^2=0,30$). Hubo correlación significativa entre ambos métodos ($r=0,51$), que varió según el suelo, existiendo alto grado de correlación en Mollisol, medio en Alfisol y sin asociación en Vertisol. Existieron asociaciones entre los coeficientes de variación de ambos métodos, siendo mayores con Hénin. Los resultados contribuirán a profundizar en el análisis de mecanismos de agregación y desagregación, propios de cada suelo y sistemas productivos que, mediante la determinación de valores umbrales permitirá conocer tendencias del recurso y así generar alertas tempranas de procesos de degradación.

Palabras clave. Estabilidad de agregados, método *Le Bissonnais*, Mollisol, Vertisol, Alfisol.

1 Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER, Ruta 11 km10.5 (3100) Paraná, Entre Ríos-Argentina.

2 Estación Experimental Agropecuaria INTA Paraná, Ruta 11 km 12.5 (3100) Paraná, Entre Ríos-Argentina

* Autor para correspondencia: mwilson@parana.inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

La agregación del suelo es el proceso mediante el cual sus partículas primarias, arena, limo y arcilla, se unen formando unidades secundarias, agregados, debido a la acción de fuerzas naturales y a sustancias derivadas de exudados de las raíces y provenientes también de la actividad microbiana (Soil Science Society of America, 1997). Sin embargo, esta organización es dinámica y compleja y no muy bien comprendida (Lal & Shukla, 2004). La estabilidad de la estructura, es una estimación de la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando se someten a la acción de fuerzas originadas por la acción del agua o de esfuerzos mecánicos externos (Kay, 1990). Hénin *et al.* (1958) indican que la estabilidad de los agregados del suelo está condicionada especialmente por la acción del agua como factor de degradación y por la cohesión en estado húmedo como factor de resistencia. Así, la estabilidad de agregados del suelo, por ser una característica edáfica dinámica, es considerada un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos (Doran & Parkin, 1994) y, se encuentra relacionada con la actividad de los coloides, el contenido orgánico, la actividad microbiana (Pecorari, 1988; Chenu, 1993; Orellana & Pilatti, 1994; Chenu *et al.*, 2000; Sasal *et al.*, 2006; Cosentino *et al.*, 2006), el laboreo del suelo (Gibbs & Reid, 1988), la secuencia y la frecuencia de cultivos en la rotación (Cerana *et al.*, 2006; Novelli *et al.*, 2010).

Existen distintos mecanismos de desagregación en el suelo: desagregación por compresión del aire ocluido que origina ruptura por efecto del estallido, desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia, microfisuración por hinchamiento diferencial y dispersión por procesos físico-químicos (Amézketa, 1999). En general, la medición de la estabilidad estructural en laboratorio intenta reproducir alguno de estos mecanismos (Le Bissonnais, 1996).

En la Argentina se han utilizado diferentes métodos de laboratorio para conocer la estabilidad de agregados de los suelos, además de su variación respecto al uso y manejo. Los más utilizados han sido De Leenher & De Boodt (1958), Hénin *et al.* (1958), Douglas & Goss (1982) y Kemper & Rosenau (1986), entre otros. Los resultados que se obtienen no son equivalentes y, si bien están relacionados entre sí, en general tienden a dar mayor importancia a alguno de los mecanismos individuales de desagregación. Así, cada uno pone énfasis en aspectos particulares de la inestabilidad y es por ello que los resultados obtenidos por diferentes métodos son difícilmente comparables. Por ello, el

principal problema que se plantea en el estudio de la estabilidad de agregados de los suelos es el método (Benito Rueda & Díaz Fierros, 1989), que continua estando escasamente homologado y normalizado.

El método de Hénin *et al.* (1958) examina la estabilidad afectada por la acción del agua que, en condiciones naturales, revela ser una de las causas principales del deterioro de la estructura. Las muestras de agregados tienen distintos tratamientos antes de someterse a una fuerte acción del agua: pretratamiento al etanol, pretratamiento al benceno y sin pretratamiento (llamado pretratamiento al agua). La combinación de los tres pretratamientos en el índice de inestabilidad (Is), permite clasificar globalmente distintos suelos y compararlos entre ellos (Mathieu & Pieltain, 1998). Además, numerosos autores argentinos demostraron que este índice se correlaciona significativamente con el contenido de materia orgánica en nuestros suelos (Orellana & Pilatti, 1994; Wilson *et al.*, 2000; Cerana *et al.*, 2006; entre otros). Sin embargo, el benceno requerido para uno de sus pretratamientos está clasificado como cancerígeno de primera categoría, existiendo evidencia científica basada en datos epidemiológicos que indica que la inhalación, ingestión o penetración cutánea producen efectos carcinógenos (Geosalud, 2006), por lo que su uso es fuertemente desaconsejado.

Basado en el método clásico de Hénin *et al.* (1958) e integrando aspectos de otros métodos, Le Bissonnais (1996), propuso utilizar un nuevo método para el análisis de la estabilidad de agregados. La finalidad de este método es describir el comportamiento físico del suelo básicamente cuando es sometido a la acción de la lluvia. Para ello, propone tres pretratamientos de evaluación: humectación rápida por inmersión en el agua, desagregación mecánica por agitación con re-humectación en el etanol y humectación lenta por capilaridad. Este método otorga especial importancia a la utilización del etanol que permite, por un lado controlar la desagregación, y por otro, limita la reagregación de las partículas durante el secado. Al mismo tiempo, el alcohol controla la desagregación de la fracción fina del suelo y el efecto de hinchamiento diferencial, poniendo así en evidencia mecanismos que actúan en la cohesión de los coloides (Benavidez, 1971; Emerson & Greeland, 1990 y Grant & Dexter, 1990, citados por Amézketa, 1999).

El método de Le Bissonnais ha sido aplicado en suelos de diferentes condiciones de clima y de manejo (Le Bissonnais & Arrouays, 1997; Saidi *et al.*, 1999; Chenu *et al.*

al., 2000; Boruvka *et al.*, 2002; Rohošková & Valla, 2004; Taboada-Castro *et al.*, 2004; Blanchart *et al.*, 2004; Cosentino *et al.*, 2006; Annabi *et al.*, 2007). Como hipótesis se plantea que el método propuesto por Le Bissonnais resulta adecuado para determinar la estabilidad de agregados en suelos de la Argentina, aunque éstos presenten marcadas diferencias en composición granulométrica, mineralógica y el estado orgánico. Particularmente, se analizarán suelos donde el carbono orgánico tiene un rol fundamental en la agregación como es el caso de los Molisoles, así como Vertisoles donde la agregación es controlada preponderantemente por la fracción arcilla (Oades, 1993). También, se analizarán las características distintivas de los sistemas productivos locales, particularmente el efecto de distintos grados de intervención. Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar el método de estabilidad de agregados propuesto por Le Bissonnais para utilizarlo como indicador de degradación en lotes con diferentes grados de intervención (desde inalterados hasta muchos años de agricultura) en tres Órdenes de suelo (Molisol, Vertisol y Alfisol), ii) relacionar el diámetro medio de agregados obtenido con el contenido de carbono orgánico, iii) correlacionar los métodos de Le Bissonnais y de Hénin y iv) cuantificar el tiempo operativo requerido en el procedimiento de determinación de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron tres suelos correspondientes a las Series Santiago (Peluderte árgico), Arrúa (Ocracualf vértico), y Tezanos Pinto (Argiudol ácuico); pertenecientes a los Órdenes Vertisol, Alfisol y Molisol, respectivamente (Plan Mapa de Suelos, 1998). En la Tabla 1 se presentan algunas propiedades edáficas correspondientes a las tres Series de suelo. En cada una de ellas se seleccionaron lotes que presentaban diferentes usos de suelo (tratamientos) en el momento del muestreo (Tabla 2).

En cada serie de suelo y tratamiento, se tomaron 3 muestras de suelo a campo, compuestas y sin disturbar del espesor 0-12 cm, utilizando pala de punta (Indelángelo *et al.*, 2007). Se desagregaron a mano y se secaron al aire. Una alícuota de la muestra total fue utilizada para determinar el contenido de carbono total (C) utilizando un autoanalizador LECO Modelo TRU SPEC. Posteriormente, por tamizado se separaron los agregados de 3 a 5 mm para determinar su estabilidad por el método de Le Bissonnais (1996) y los agregados menores a 2 mm por el método de Hénin (1958).

El método de Le Bissonnais (1996) consiste en someter muestras de 10 g de agregados de 3-5 mm, a tres pretratamientos de laboratorio para el cálculo del diámetro medio ponderado de agregados estables (DMP) por: humectación rápida por inmersión en agua o efecto estallido (DMPE), disgregación mecánica por agitación después de la re-humectación en etanol (DMPd) y humectación lenta con agua por capilaridad (DMPc). La fracción >50 µm resultante de cada pretratamiento, se secó en estufa y posteriormente se tamizó en 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. El DMP de cada pretratamiento se obtuvo como la suma algebraica de las masas de las fracciones remanentes de cada tamiz, multiplicado por la apertura de los tamices adyacentes, como lo indica la siguiente fórmula:

$$\Sigma [\text{Diámetros medios entre dos tamices (mm)} * [\% \text{ de partículas retenidas sobre el tamiz}]] / 100$$

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 pretratamientos, para cada muestra de campo, se determinó un índice que sintetiza la información obtenida de los pretratamientos evaluados (DMPm). Para cada muestra de suelo y cada pretratamiento se realizaron tres repeticiones de laboratorio.

Tabla 1. Propiedades del suelo correspondientes al horizonte A de la condición inalterada de las tres Series analizadas.
Table 1. Soil properties of the A horizon under pristine conditions.

Serie de Suelo	pH (1:2,5)	C %	Arcilla	Limo	Arena g kg ⁻¹	Clase textural
Santiago (Peluderte árgico)	7,10	3,82	422	560	18	Arcillo limoso
Arrúa (Ocracualfe vértico)	6,45	3,35	530	445	25	Arcillo limoso
Tezanos Pinto (Argiudol ácuico)	6,50	1,32	274	663	63	Franco arcillo limoso

C: carbono orgánico total.

Tabla 2. Detalle del uso de suelo de los diferentes sitios de muestreo.
Table 2. Details of land use at different sampling sites.

Lotes. Serie Santiago (Peluderte árgico)	
Inalterado (Inalt.)	Campo natural, bajo monte. Uso: cría bovina.
Incorporado (Inc.)	Recientemente incorporado a la agricultura (2 años). Secuencia de cultivos utilizada: Sorgo-Soja-Soja. En Siembra Directa.
Agrícola (Agr.)	Historia agrícola de 15 años. Secuencia de cultivos actualmente utilizada: Soja de primera - Trigo/Soja de segunda. Los últimos siete años en Siembra Directa.
Agrícola + (Agr. +)	Historia agrícola de 45 años con participación de varios cultivos. Actualmente con pasturas de segundo año.
Lotes. Serie Arrúa (Ocracualfe vértico)	
Inalterado (Inalt.)	Campo natural con bosque nativo. Uso: cría bovina.
Incorporado (Inc.)	Recientemente incorporado a la agricultura (6 meses). Secuencia de cultivos utilizada: Trigo/Soja de segunda.
Pastura permanente (P.P.)	Pastura polifítica perenne a base de <i>Lotus corniculatus</i> . Antes: pastizal natural con esporádicas siembras de verdes de verano.
Agrícola (Agr.)	Historia agrícola de 3 años. Antes: chacra abandonada. Secuencia de cultivos actualmente utilizada: Trigo/Soja de segunda, en forma continua.
Agrícola + (Agr. +)	Historia agrícola de 5 años. Antes: uso ganadero. Secuencia de cultivos actualmente utilizada: Soja de primera - Trigo/Soja de segunda.
Lotes. Serie Tezanos Pinto (Argiudol ácuico)	
Inalterado (Inalt.)	Pastizal natural sin laboreo ni pastoreo.
Agrícola Maíz-Trigo/Soja (Mz-Tr/Sj)	Historia agrícola de 30 años. Los últimos 10 años en Siembra Directa.
Agrícola Trigo/Soja (Tr/Sj)	Historia agrícola de 30 años. Los últimos 10 años en Siembra Directa.
Agrícola Soja continua (Sj. cont.)	Historia agrícola de 30 años. Los últimos 10 años en Siembra Directa.

La determinación de la Inestabilidad de agregados (*I_s*) por el método de Hénin *et al.* (1958), se basa en el uso de tres pre-tratamientos que impiden o acentúan los procesos de degradación de la estructura (agua, etanol y benceno), (Mathieu & Pieltain, 1998). El índice de inestabilidad se calcula de la siguiente manera:

$$I_s = \% \text{ máximo de fracción inestable (arcilla + limo)} / [(\text{Promedio de agregados estables (\%)} - (0,9 \% \text{ de arena gruesa}))]$$

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el análisis de la varianza y la diferencia de medias a través del Test de Tukey al 5%. Se realizaron regresión entre el DMPm y el C y correlación entre los coeficientes de variación (CV) de los valores obtenidos con los métodos de Le Bissonnais y Hénin (DMPm vs. *I_s*), respectivamente, utilizando el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1989).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estabilidad de agregados en los tres suelos

Al comparar la condición inalterada de los tres suelos (Fig. 1), pudo observarse que el Vertisol (DMPm = 2,77 mm), no se diferenció significativamente ($p < 0,05$) del Molisol

(DMPm = 2,21) y sí del Alfisol (DMPm = 2,01 mm). Lo expuesto corrobora la baja estabilidad de agregados que presentan los Alfisoles, aún en la condición inalterada, siendo condicionalmente aptos para la agricultura, con muy bajos índices de productividad (Tasi y Bedendo, 2001).

En la Figura 1 se presentan además los DMPm para los usos evaluados en los tres suelos. Los valores medios hallados variaron entre 2,77 mm y 0,92 mm, valores similares a los citados por Le Bissonnais (1996) y Chenu *et al.* (2000), utilizando el mismo método para suelos de Francia.

El análisis de la varianza de los tratamientos en los tres suelos resultó altamente significativo. Si bien el DMPm permitió diferenciar situaciones de uso para los tres suelos, en el caso del Vertisol y el Alfisol, la sensibilidad del método resultó mayor, por lo que podría considerarse a esta variable como indicadora de su calidad. Sin embargo, debe resaltarse que en dichos suelos, las situaciones de uso evaluadas son muy contrastantes; es decir, que en ambos se comparó una situación inalterada con lotes agrícolas de muchos años. En el caso del Molisol, también pudo diferenciarse la situación de campo natural del resto, pero no existieron diferencias significativas entre las secuencias de cultivo debido a que presentaban igual número de años de agricultura.

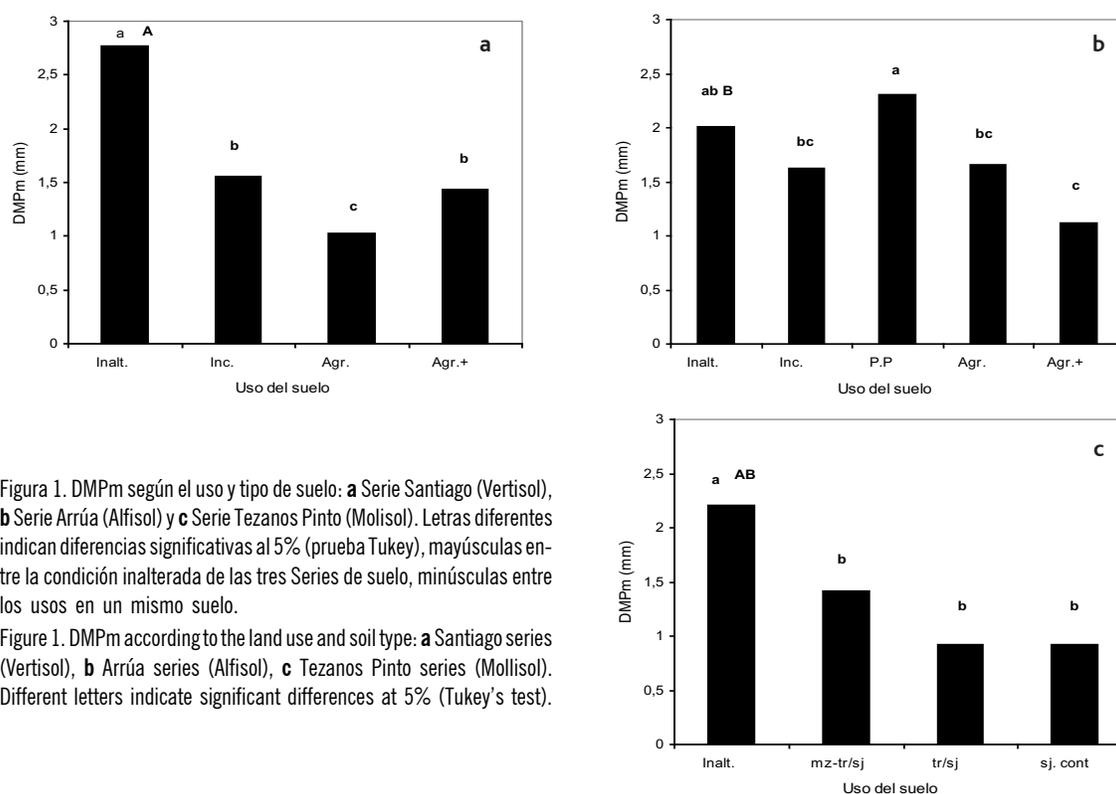


Figura 1. DMPm según el uso y tipo de suelo: **a** Serie Santiago (Vertisol), **b** Serie Arrúa (Alfisol) y **c** Serie Tezanos Pinto (Mollisol). Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% (prueba Tukey), mayúsculas entre la condición inalterada de las tres Series de suelo, minúsculas entre los usos en un mismo suelo.

Figure 1. DMPm according to the land use and soil type: **a** Santiago series (Vertisol), **b** Arrúa series (Alfisol), **c** Tezanos Pinto series (Mollisol). Different letters indicate significant differences at 5% (Tukey's test).

Evaluación de los pretratamientos por el método de Le Bissonnais

Para detectar diferencias cuando las situaciones de manejo no son tan contrastantes, como por ejemplo en el caso del Mollisol (distintas secuencias de cultivos con la misma antigüedad) o bien para identificar los distintos mecanismos de desagregación por acción del agua preponderantes en cada tipo de suelo, el método permite analizar los DMP de cada uno de los pretratamientos. Así, puede analizarse la respuesta de cada uso o tipo de suelo a las condiciones impuestas de velocidad de humectación y de energía aplicada (Le Bissonnais, 1996). La metodología propuesta por Le Bissonnais *et al.* (2002), posee tres pretratamientos de una muestra para la evaluación de tres mecanismos de desagregación: disgregación por compresión del aire ocluido que origina ruptura por efecto del estallido, desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia y microfisuración por expansión diferencial.

En la Figura 2 se muestran los resultados de cada pretratamiento para los distintos usos y suelos. En general, el análisis de varianza resultó altamente significativo para los pretratamientos evaluados en los tres suelos. En el Vertisol (Fig. 2a) los tres pretratamientos permitieron discriminar

las situaciones de manejo en forma equiparable. Amezketa *et al.* (1996) utilizando la misma metodología encontraron que en suelos muy inestables o muy estables los tres pretratamientos tienen resultados similares, indicando que su comportamiento estructural es casi independiente de condiciones externas. En general, los Vertisoles presentan alta estabilidad de agregados en condiciones naturales debido a los complejos arcillo-húmicos; sin embargo, son afectados severamente por el manejo agrícola que provoca pérdidas de materia orgánica y erosión (Wilson & Cerana, 2004). Así, para los tres pretratamientos hubo diferencia significativa entre el inalterado y los demás tratamientos. Se diferenciaron tres clases estadísticas, donde la peor condición la mostró el tratamiento agrícola. Se esperaba que los valores más bajos de DMP los presentara la condición agrícola+, al contar con más años de agricultura (45 vs. 15). Sin embargo, probablemente la incorporación de una pastura en los últimos dos años permitió mostrar mayor valor de agregados estables.

En el Alfisol, el pretratamiento de humectación por capilaridad fue el que mejor diferenció las situaciones de manejo, con tres clases estadísticas. Este pretratamiento permite analizar el mecanismo de disrupción debido a la

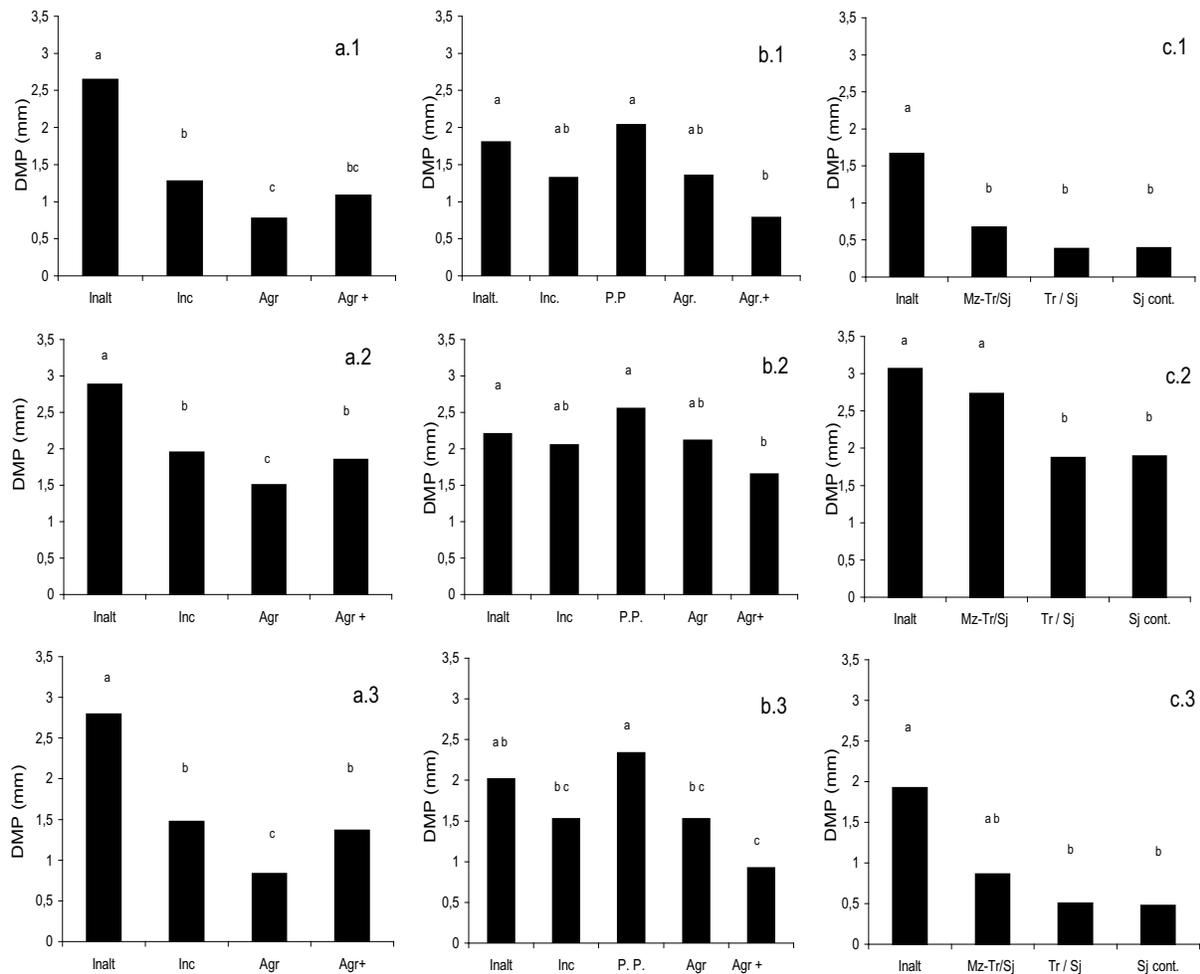


Figura 2. DMP según el uso del suelo, para los tres pretratamientos del método *Le Bissonnais*, donde en sentido horizontal: **1** humectación rápida, **2** disgregación mecánica y **3** humectación por capilaridad, y según Serie de suelo (en sentido vertical): **a** Santiago (Vertisol), **b** Arrúa (Alfisol) y **c** Tezanos Pinto (Molisol). Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% (prueba Tukey).

Figure 2. DMP according to land use, for the three pretreatments of the method of *Le Bissonnais*, each row of figures representing: 1 fast wetting, 2 mechanical disintegration, and 3 wetting by capilarity, and according to soil series, where figures in columns represent: a Santiago (Vertisol), b Arrúa (Alfisol), c Tezanos Pinto (Mollisol). Different letters indicate significant differences at 5% (Tukey's test).

presión interna por expansión diferencial de arcillas (predominantemente esmectitas) durante el humedecimiento. También, pudo observarse que la condición de pastura permanente en los tres pretratamientos mostró los valores más altos, aunque no se diferenció significativamente de la condición inalterada. Los tratamientos incorporado, agrícola y agrícola+, no difirieron significativamente, siendo esta última la que presentó los valores más bajos (DMP = 0,92 mm) (Fig. 2 b.3).

En el Molisol, el pretratamiento de disgregación mecánica logró diferenciar los tratamientos soja continua y

trigo/soja del campo natural y la rotación maíz-trigo/soja y los valores de DMPd fueron más elevados que los de DMPe y DMPm (Fig. 2 c.2). El pretratamiento de disgregación mecánica simula la energía de la disrupción por impacto de la gota de lluvia que dispersa mecánicamente las partículas fundamentalmente cuando el suelo está húmedo y los agregados tienen una débil cohesión interna (Cosentino, 2006). Así, estas presiones externas tienen efecto diferencial en función de la cohesión en húmedo del suelo debida al contenido de arcilla y materia orgánica. Este mecanismo es particularmente importante en suelos limosos (escasa

proporción de arcillas expandentes) con condiciones de alto contenido hídrico en superficie. Sin embargo, la importancia de este mecanismo se reduce bajo SD por el rol de la vegetación o de la cobertura sobre el suelo que protege la superficie del impacto de la lluvia. Por ello, el tratamiento con menor proporción de soja en la secuencia (maíz-trigo/soja) no se diferenció del inalterado y fue mayor a los tratamientos con alta frecuencia de soja, con bajo aporte de residuos de cosecha en superficie y de baja relación C:N.

Los resultados obtenidos sugieren que las diferencias texturales, mineralógicas y del estado orgánico entre Órdenes de suelo son captadas en forma diferencial por los distintos pretratamientos. Por lo que es necesario profundizar el estudio para identificar los factores que producen este comportamiento diferencial. Posiblemente aspectos relacionados con el aporte de materia seca de los cultivos y su relación C:N, la exploración radical, la actividad biológica y los años agrícolas luego del desmonte, deberían ser abordados. Cosentino *et al.* (2006) realizaron un experimento de incubación adicionando rastrojos al suelo y observaron que se estimuló la actividad microbiana. En consecuencia, se produjo estabilización de agregados por incremento de la cohesión de las partículas y de la hidrofobicidad otorgada por la materia orgánica.

Estabilidad de agregados por Le Bissonnais y su relación con el Carbono total

El C total sólo explicó el 30% de la variación del DMPm ($p < 0,01$) (Fig. 3), considerando los tres suelos. Cerana *et al.* (2006) con el método de Hénin *et al.* (1958), mostraron correlaciones altamente significativas entre el contenido de materia orgánica y los valores de estabilidad de agregados en Vertisoles de Entre Ríos, al igual que Arias & De

Battista (1984) con el método de Leenheer & de Boodt (1958). En este trabajo, cabe mencionar que el contenido de C fue determinado mediante la extracción de una alícuota de la muestra total y que posiblemente sería mayor el coeficiente de determinación midiendo el C total de la muestra de agregados comprendidos entre 3 a 5 mm, tamaño que utiliza este método para el análisis. A su vez, se podrían analizar otras fracciones del carbono total, como lo son el carbono orgánico lábil o la materia orgánica particulada, en búsqueda de mejores relaciones con los valores de estabilidad de agregados. Por otro lado, el rol de la materia orgánica puede ser tanto de agente dispersante como floculante, favoreciendo sólo en este último caso a la estabilidad de los agregados. En este sentido, el papel de la materia orgánica en relación a la estabilidad de agregados todavía está sujeto a controversias y debe tenerse presente el rol de diferentes agentes de agregación en los diferentes suelos. En los Vertisoles es clave el rol de la cantidad y tipo de arcilla predominantes (esmeclitas), ya que aporta mayor superficie específica a los agregados del suelo (Paz Ferreira *et al.*, 2009) y actúa como protector del carbono orgánico en dichos suelos (Stephan *et al.*, 1983).

Relación entre los índices de Le Bissonnais y Hénin

Los resultados de estabilidad de agregados obtenidos por diferentes métodos están normalmente relacionados entre sí, aunque la capacidad de los mismos para diferenciar suelos y usos es muy variable (Hénin *et al.*, 1958). Se halló una correlación significativa entre el DMPm y el Is ($r = 0,51$), observándose menor dispersión de los datos en las muestras con mayor estabilidad de agregados (valores bajos de Is representan mayor estabilidad), y la mayor dispersión se produjo en las muestras que presentaron baja

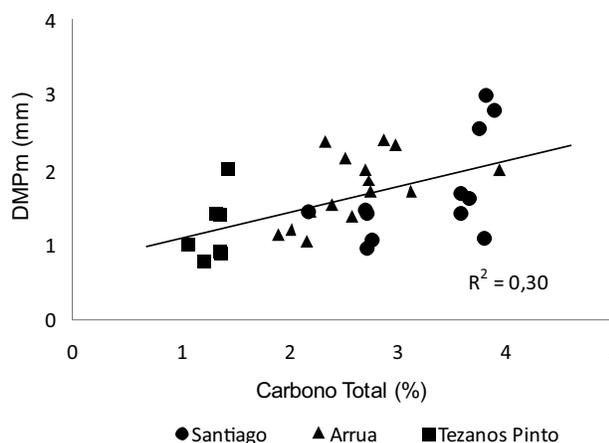


Figura 3. Relación entre el C total (%) y los valores de DMPm determinado por el método de Le Bissonnais.

Figure 3. Relationship between total C (%) and DMPm values determined by Le Bissonnais method.

estabilidad determinada por Le Bissonnais (Fig. 4). Al analizar la correlación entre ambos métodos, pero separando suelos, se observó que la mejor asociación se produjo en el Molisol ($r=0,97$). En el Alfisol ambas variables también tuvieron una asociación significativa pero con coeficiente de correlación menor, mientras que en el Vertisol no hubo ajuste significativo. Los valores de DMPm mostraron en todos los casos rangos de variación entre 1 y 3; mientras que el Is se comportó en forma similar sólo en el Molisol. En el Vertisol el método de Hénin tiende a subestimar la medida de estabilidad de agregados (Fig. 4). Fundamentalmente, la diferencia metodológica entre los dos métodos es el tamaño de agregados analizados, la presentación de la información y la eliminación del pretratamiento con benceno. Este compuesto se fija sobre la materia orgánica aumentando así su carácter hidrófobo y por lo tanto limita el accionar del agua sobre la desagregación del agregado (Hénin *et al.*, 1958). En este sentido, los valores medios de C total del Vertisol y el Alfisol son más elevados que el del Molisol (C total = 3,26%; 2,61% y 1,28%, respectivamente). Esta puede ser la causa de la menor asociación entre los métodos para ambos suelos.

El método de Hénin se ha mostrado muy sensible y reflejó cambios en la estabilidad de agregados a través de su índice Is y sus pretratamientos, a causa del uso y manejo de los suelos (Orellana & Pilatti, 1994; Wilson *et al.*, 2000; Cerana *et al.*, 2006; entre otros). Dicho método utiliza agregados < 2 mm y refleja sólo lo que ocurre en el suelo a ese nivel de agregación aunque, a pesar de las limitaciones reconocidas, presenta buena consistencia estadística (Benavidez & Wilson, 2006). Por otra parte, el método de Le Bissonnais utiliza agregados comprendidos entre 3-5 mm y desarrolla una distribución de tamaño de agregados luego de la acción de los pretratamientos y el tamizado en hú-

medo, poniendo de manifiesto mayores elementos para interpretar los mecanismos de desagregación de los suelos a causa del uso y manejo.

El análisis de los coeficientes de variación de las metodologías tuvo como finalidad comparar los valores de variabilidad que presentan, y así determinar si existieron diferencias debidas a motivos muestrales o a las características del suelo. Se encontró correlación significativa ($r=0,61$) entre los CV de DMPm e Is (Fig. 5). La presencia de la mayor cantidad de puntos sobre la bisectriz indica que los CV del método de Hénin son mayores a los que presenta la metodología de Le Bissonnais. Mientras que los CV del DMPm no superaron el 20%, los del Is llegaron hasta el 60%. Estos altos valores no se deben a variabilidad por causas de muestreo, sino metodológicas ya que ambos métodos fueron aplicados a las mismas muestras, pero como se expresó, a diferentes fracciones de agregados. Al mismo tiempo, no se observó un efecto del tipo de suelo sobre la asociación entre los coeficientes de variación (Fig. 5).

Tiempo demandado para determinar la estabilidad de agregados por Le Bissonnais

Luego de probar distintos tiempos para la determinación de la estabilidad de agregados con el método de Le Bissonnais, se consideró apropiado trabajar con 4 muestras a la vez para cada uno de los pretratamientos. Se comenzó primero con el pretratamiento de disgregación mecánica, luego el de estallido y se finalizó con el de capilaridad. Cabe aclarar que como cada uno de los pretratamientos tiene tiempos operativos diferentes, se tuvo que ajustar el solapamiento entre ellos, para optimizar el tiempo global del procedimiento. El tiempo insumido para 4 muestras con los tres pretratamientos correspondientes fue

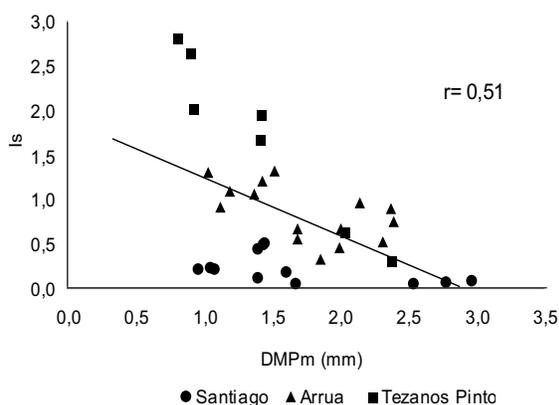


Figura 4. Correlación entre el DMPm (Le Bissonnais) y el Is (Hénin), en las tres Series de suelos evaluadas.

Figure 4. Correlation between DMPm (Le Bissonnais) and Is (Henin), which includes data from the three analyzed soils.

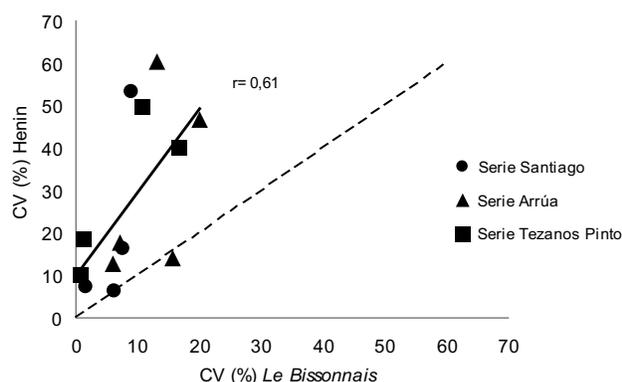


Figura 5. Correlación entre los CV (%) correspondientes a los valores de DMPm (método de *Le Bissonnais*) e Is (Hénin).

Figure 5. Correlation between VC (%) for the DMPm values (*Le Bissonnais*) and Is (Henin).

de 1h 35 min, aproximadamente, estando sujeto dicho tiempo a la pericia que adquirió el operario. Luego del secado, el tamizado en seco para el total de las muestras con sus pretratamientos demandó además un tiempo de 1h 15 min. Con ello el tiempo total de determinación de la estabilidad de agregados para las 4 muestras con sus 3 pretratamientos fue de 2h 50 min, es decir que por muestra se insumió un tiempo total de 43 min, aproximadamente. Así, respecto al método de Hénin, se trata de un procedimiento más simple, de mayor rapidez y de menor costo, ya que sólo utiliza en la determinación agua destilada y alcohol, eliminando del laboratorio el uso del benceno para la determinación de agregados estables.

CONCLUSIONES

El método propuesto por Le Bissonnais busca reproducir la acción de diferentes mecanismos de desagregación sobre el suelo. Resultó ser sensible para discriminar situaciones de uso y manejo en los tres suelos analizados. De esta manera el DMPm y los DMP obtenidos con cada pretratamiento evaluado, podrían ser tomados como indicadores de calidad de suelo y reflejar tendencias al deterioro y a la recuperación cuando el suelo es expuesto a diferentes usos. El análisis de los resultados obtenidos con cada pretratamiento permitió concluir sobre distintas características intrínsecas de los suelos y la dinámica que adquieren, ya que para estimar la estabilidad de agregados cada uno de ellos reproduce las acciones disruptivas a causa de largos períodos de uso agrícola y logra separar diferentes mecanismos de agregación y desagregación ante al accionar del agua.

Al comparar los valores determinados mediante los métodos de Le Bissonnais y Hénin, se determinó una

correlación significativa. Ese grado de significancia varió según el suelo, existiendo un alto grado de correlación en el Molisol, medio en el Alfisol y no presentó asociación en el Vertisol. Existió asociación entre los CV de ambos métodos, resultando ser mayores los CV determinados por el método de Hénin; no se observó variación atribuible al tipo de suelo, por lo que estas variaciones encontradas se deben a causas metodológicas. Ante lo expuesto se concluye que el método propuesto por Le Bissonnais demuestra ser una alternativa válida para la evaluación de la estabilidad de agregados en suelos de la Argentina, y los resultados obtenidos pretenden ser de referencia para otros laboratorios de suelo que requieran incorporar este método a su rutina. El tiempo total de determinación de la estabilidad de agregados en laboratorio por muestra fue de 43 min, aproximadamente.

En concordancia con trabajos de investigación que hallaron relación significativa entre el contenido de carbono y la estabilidad de agregados, en este trabajo se determinó una relación positiva y significativa entre el C total y el DMPm. Un mejor ajuste del grado de regresión queda sujeto a posteriores análisis, teniendo en cuenta para tal motivo, la determinación de carbono en la fracción de agregados utilizados en este método y otras variables relacionadas a la materia orgánica.

Asimismo sería necesario profundizar en los alcances del método. Por un lado, analizar las diferencias en la sensibilidad del método en su performance en otros Órdenes de suelo. Además, corroborar los resultados obtenidos en otras series de suelo dentro de los Órdenes analizados.

La potencialidad del método, al distinguir diversos mecanismos de desagregación, es notable. Los resultados

logrados contribuirán a profundizar el análisis de los mecanismos de agregación y desagregación propios de cada suelo en relación a los sistemas productivos incorporados. La determinación de valores umbrales para distintos suelos con diferentes usos y prácticas de manejo, permitirá conocer tendencias del recurso suelo y así generar alertas tempranas de procesos de degradación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto de INTA 093012 «Indicadores agroambientales (suelo y agua) para la evaluación de la sustentabilidad ambiental en áreas sujetas al cambio en el uso de la tierra». Queremos expresar nuestro agradecimiento al Téc, Agrónomo Carlos V. Acosta y al Ing. Agr. Nicolás Indelángelo por las actividades de apoyo realizadas y al Dr. Diego Cosentino por su colaboración y seguimiento intelectual en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Amézqueta, E. 1999. Soil aggregate stability: A review. *Jour. of Sustainable Agriculture* 14: 83-150.
- Annabi, M; S Houot; C Francou; M Poitrenaud & Y Le Bissonnais. 2007. Soil Aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71: 413-423.
- Arias, NM & JJ De Battista. 1984. Evaluación de métodos para la determinación de estabilidad estructural en Vertisoles de Entre Ríos. *Ciencia del suelo* 2(1): 87-92.
- Benavidez, RA. 1971. Mecanisme d' action du chaulage. These Doctoral 3^o Cycle geologie dynamique. Faculte des Ciñeses de Paris, France. pp 66.
- Benito Rueda, E & F Díaz Fierro. 1989. Estudio de los principales factores que intervienen en la estabilidad estructural de los suelos de Galicia. *An. Edafol. Agrobiol.*, 48: 229-253.
- Benavidez, RA & MG Wilson. 2006. Estabilidad estructural en suelos arroceros. *En: El arroz. Su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos.* Editorial UNER y Ediciones de la UNL. Director de obra René Benavidez. Tomo II. 527-545.
- Blanchart, E; A Albrecht; G Brown; T Decaens; A Duboisset; P Lavelle; L Mariani & E Roose. 2004. Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 303-315.
- Boruvka, L; M Valla; H Donátová & K Nemecek. 2002. Vulnerability of soil aggregates in relation to soil properties. *Rostlinná Vyroba* 48(8): 329-334.
- Cerana, J; MG Wilson; JJ De Battista; J Noir & C Quintero. 2006. Estabilidad estructural de los Vertisoles en un sistema arrocero regado con agua subterránea. *Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA* 35(1): 87-106.
- Cosentino, D ; C Chenu & Y Le Bissonnais. 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 2053-2062.
- Chenu, C. 1993. Clay- or sand-polysaccharide associations as models for the interface between microorganisms and soil: water related properties and microstructure. *Geoderma* 56: 143-156.
- Chenu, C ; Y Le Bissonnais & D Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1479-1486.
- De Leenher, L & M De Boodt. 1958. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. Inter Sysmp. on soil structure. Medeligen. Rykskandbouwhogesechool, *Gent. Belgie*, 24: 290-300.
- Doran, JW & TB Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *In: JW Doran, DC Coleman, DF Bezdicek, and BA Stewart (eds.)*, Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Spec. Pub. No. 35, Soil Sci. Soc. Am., Am. Soc. Argon., Madison, WI. p. 3-21.
- 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.
- GEOSALUD 2006. Características del Benceno. Página web: www.geosalud.com. Noviembre del 2006.
- Gibbs, RJ & JB Reid. 1988. A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, 8: 123-149.
- Hénin, S; G Monnier & A Combeau. 1958. Méthode pour l' étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 9: 73-92.
- Indelángelo, N; MG Wilson & HAA Tasi. 2007. Indicadores de calidad para dos suelos con características vérticas de Entre Ríos (Argentina). *Cadernos do Laboratorio Xeológico do Laxe*. 32: 111-125.
- Kay, BD. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Science* 12: 1-52.
- Kemper, WD & RC Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. *In: Klute A (ed.)* Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods, 2nd ed. Madison, Wis., ASA, Agronomy N° 9: 425-442.
- Lal, R & MK Shukla. 2004. Principles of Soil Physics. New York, NY: Marcel Dekker. 716 pp.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *European J. Soil Sci.*, 47: 425-437.
- Le Bissonnais, Y & D Arrouays. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 39-48.
- Mathieu, C & F Pieltain. 1998. Analyse physique des sols: Méthodes choisies. Lavoisier Tec. Doc. París. London, New York. Pp. 275.
- Novelli, L; O Caviglia; MG Wilson & MC Sasal. 2010. Impacto de la frecuencia de soja sobre la agregación y el almacenaje de Cen Molisoles y Vertisoles de Entre Ríos. *En: Anales del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Rosario, Argentina. Trabajo en CD.
- Oades, JM. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- Orellana, de J & M Pilatti. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del Suelo* 12: 75-80.
- Plan Mapa de Suelos, Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos. 1998. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos. Memoria Técnica, un Mapa de suelos a escala aprox. 1:100.000 y 14 mapas temáticos a color. EEA Paraná, Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 17, 114 pp.

- Paz Ferreiro, J; MG Wilson & E Vidal Vázquez. 2009. Multifractal description of nitrogen adsorption isotherms. *Vadose Zone Journal* 8: 209-219.
- Pecorari, C. 1988. Inestabilidad estructural de los suelos de la pampa ondulada. EEA-INTA Pergamino. Informe Técnico N° 216. 16 p.
- Rohošková, M & M Valla. 2004. Comparison of two methods for aggregate stability measurement-a review. *Plant Soil Environ.*, 50(8): 379-382.
- Saidi, D; A Douaoui; Y Le Bissonnais & C Walter. 1999. Sensibilité de la surface des sols des plaines du Chélif a la dégradation structurale. *Étude et Gestion des Sols* 6(1) : 15-25.
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/STAT User's guide, Version 6. 4th edition. Vol. 2. Cary, NC: SAS Institute Inc. 846p.
- Sasal, MC; A Andriulo & M Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in argentinian pampas. *Soil Till. Res.*, 87(1) : 9-18.
- Soil Science Society of America. 1997. Glossary of Soil Science Terms 1996. Soil Science Society of America. Madison WI. 138 p.
- Stephan, S; J Berrier; AA De Petre; C Jeanson; MJ Kooistra; HW Scharpenseel & H Shiffmann. 1983. Characterization of in situ organic matter constituents in Vertisols from Argentina, using submicroscopic and cytochemical methods-first report. *Geoderma*. 30: 21-34.
- Taboada-Castro, MM; Y Le Bissonnais & O Duval. 2004. Aggregate breakdown mechanism by water in tillage horizons in NW Spain. ISCO 2004 – 13th International Soil Conservation Organisation Conferences. Brisbane, July 2004. Paper N° 657. 4 p.
- Tasi, HAA & DJ Bedendo. 2001. Aptitud agrícola de las Tierras de la Provincia de Entre Ríos. Plan Mapa de Suelos. INTA Serie Extensión N° 19. 10 p.
- Wilson, MG; CD Quintero; NG Boschetti; WA Mancuso & RA Benavidez. 2000. Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. *Revista Facultad de Agronomía*. 20(1): 23-30.
- Wilson, MG & J Cerana. 2004. Mediciones físicas en suelos con características vérticas. *Revista Científica Agropecuaria* 8(1): 11-22.