

# **Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados**

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Ciencias Agropecuarias*

**Leonardo Esteban Novelli**

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de Entre Ríos - 2007

Grupo de Recursos Naturales y Factores Abióticos - EEA Paraná - INTA



**FAUBA**

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



## COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

**Octavio Pedro Caviglia**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)  
Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Co-director

**Diego Julián Cosentino**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)  
Doctor (Instituto Nacional de Agronomía, París-Grignon)

Consejero de Estudios

**Gervasio Piñeiro**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de la Republica Oriental del Uruguay)  
Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

## JURADO DE TESIS

Director de tesis

**Octavio Pedro Caviglia**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)  
Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO

**Silvia del Carmen Imhoff**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional del Litoral)  
Doctora en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Sao Pablo, Brasil)

JURADO

**Adrián E. Andriulo**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Rosario)  
Doctor en Ciencia del Suelo (Instituto Nacional de Agronomía, París-Grignon)

JURADO

**Guillermo Alberto Studdert**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Mar del Plata)  
Doctor (Universidad de Lleida, España)

Fecha de defensa de la tesis: 26 de Febrero de 2013

## Dedicatoria

---

*A Soledad por acompañarme y apoyarme en este camino...*

## **Agradecimientos**

---

A mi familia por alentarme en todo momento a seguir adelante con mis convicciones.

A mi director Octavio Caviglia por sus valiosas sugerencias aportadas en todo momento y por ser un guía en este camino que decidí transitar.

A mis consejeros Diego y Gervasio por sus valiosos aportes.

Al grupo de Recursos Naturales y Factores Abióticos de la EEA Paraná de INTA por ayudarme en las distintas etapas de esta tesis.

A mis amigos Cristian Schalpeter y Ramiro López por sus consejos y el apoyo brindado cuando necesité una palabra de aliento.

A mis amigas Susana Albarenque, Carolina Gregorutti y Natalia Van Opstal por su colaboración desinteresada en todo momento.

A Walter Hass, Emmanuel Gabioud y Gustavo Mafini por su colaboración en las determinaciones de laboratorio.

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

***Ing. Agr. Leonardo Esteban Novelli***

## **Publicaciones derivadas de la tesis**

---

- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168, 254-260.

- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Wilson, M.G., Sasal, M.C. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196, 260-267.

## Índice general

---

Dedicatoria .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Publicaciones derivadas de la tesis .....	vi
Índice general .....	vii
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Abreviaturas .....	xix
Resumen.....	xx
Abstract .....	xxi
<b>Capítulo 1: Introducción General</b> .....	<b>1</b>
1.1. Introducción .....	2
1.1.1. Crecimiento demográfico y producción de alimentos .....	2
1.1.2. Uso actual de la tierra en Sudamérica.....	2
1.1.3. La intensificación de las secuencias de cultivos como un mecanismo para mejorar la eficiencia de uso de los agro-ecosistemas.....	3
1.1.4. Evaluación del uso de la tierra .....	3
1.1.5. La agregación del suelo: un indicador sensible a los cambios en el uso de la tierra .....	4
1.1.6. La agregación como mecanismo para almacenar COS.....	6
1.1.7. Metodologías para evaluar la estabilidad de los agregados de suelo.....	7
1.1.8. La intensificación de las secuencias de cultivos como un mecanismo para incrementar la agregación y el almacenaje de COS.....	8
1.1.9. La evaluación del COS del suelo .....	9
1.1.9.1. Almacenaje de COS en diferentes tamaños de agregados de suelo.....	9
1.1.9.2. Evaluación del carbono orgánico particulado en agregados de suelo....	10
1.1.9.3. Evaluación de carbohidratos en agregados de suelo .....	10
1.2. Objetivos .....	11
1.2.1. Objetivo general.....	11
1.2.2. Objetivos específicos .....	11
1.2.2.1. Objetivo específico 1.....	11
1.2.2.2. Objetivo específico 2.....	11
1.2.2.3. Objetivo específico 3.....	11
1.3. Hipótesis.....	11
1.3.1. Hipótesis asociadas al objetivo específico 1 .....	11
1.3.2. Hipótesis asociadas al objetivo específico 2 .....	11
1.3.3. Hipótesis asociadas al objetivo específico 3 .....	12
1.4. Organización de la información obtenida para la presentación de los resultados	12
<b>Capítulo 2: Comparación entre índices de uso de la tierra y métodos de estabilidad de agregados en dos suelos contrastantes</b> .....	<b>13</b>
2.1. Introducción .....	14
2.2. Materiales y Métodos.....	16
2.2.1. Sitio de estudio.....	16
2.2.2. Selección de lotes.....	16

2.2.3. Muestreo de suelo y análisis .....	18
2.2.4. Cálculos.....	19
2.2.4.1. Índices de uso de la tierra.....	19
2.2.4.2. Carbono orgánico en masa de suelo equivalente .....	21
2.2.5. Análisis estadísticos .....	21
2.3. Resultados .....	22
2.3.1. Stock de carbono orgánico del suelo.....	22
2.3.2. Relación entre los índices de uso de la tierra y el stock de COS .....	23
2.3.3. Estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais (1996).....	24
2.3.5. Estabilidad de agregados por Le Bissonnais y su relación con la concentración de COS total.....	27
2.3.6. Comparación del diámetro medio ponderado de agregados obtenidos por tres métodos diferentes de estabilidad .....	28
2.3.7. Asociación entre los diámetros medios ponderados de agregados obtenidos por tres métodos diferentes de estabilidad .....	30
2.3.8. Relación entre índices de uso de la tierra y los diámetros medios ponderados de tres métodos de estabilidad estructural.....	31
2.4. Discusión.....	35
2.5. Conclusiones .....	37
2.6. Relación con las hipótesis planteadas .....	37
2.7. Relación con los otros capítulos.....	37
<b>Capítulo 3: Impacto de la frecuencia del cultivo de soja sobre el almacenaje de carbono en un Molisol y un Vertisol .....</b>	<b>39</b>
3.1. Introducción .....	40
3.2. Materiales y Métodos.....	41
3.2.1. Sitio de estudio, muestreo y análisis de suelo .....	41
3.2.2. Cálculos.....	42
3.2.2.1. Cálculo del índice de frecuencia de soja.....	42
3.2.2.2. Carbono orgánico en masa de suelo equivalente .....	42
3.2.2.3. Nivel de estratificación del carbono orgánico del suelo (COS).....	43
3.2.2.4. Almacenaje de carbono orgánico del suelo en fracciones de tamaños de agregados.....	43
3.2.3. Análisis estadísticos .....	43
3.3. Resultados .....	43
3.3.1. Stock de carbono orgánico del suelo.....	43
3.3.2. Concentración de carbono orgánico del suelo .....	45
3.3.3. Nivel de estratificación del carbono orgánico del suelo .....	45
3.3.4. Almacenaje de carbono orgánico del suelo en fracciones de tamaños de agregados .....	46
3.4. Discusión.....	51
3.5. Conclusiones .....	53
3.6. Relación con las hipótesis planteadas .....	53
3.7. Relación con los otros capítulos.....	53
<b>Capítulo 4: Efectos de la secuencia de cultivos y el tipo de suelo sobre la dinámica temporal de la agregación y los contenidos de carbono orgánico del suelo.....</b>	<b>54</b>
4.1. Introducción .....	55
4.2. Materiales y Métodos.....	56
4.2.1. Sitio de estudio y sistemas de cultivos.....	56
4.2.2. Manejo del ensayo y muestreo de biomasa.....	58

4.2.3. Muestreo y análisis de suelos.....	59
4.2.4. Relación entre algunos factores meteorológicos y la dinámica temporal de la agregación del suelo.....	61
4.2.5. Análisis estadísticos.....	62
4.3. Resultados.....	62
4.3.1. Aporte de biomasa aérea de las secuencias de cultivos.....	62
4.3.2. Dinámica temporal del diámetro medio ponderado de los agregados por tamizado en húmedo.....	64
4.3.3. Relación entre el aporte de biomasa aérea, el nivel de intensificación y la agregación.....	66
4.3.4. Relación entre la erosividad de las precipitaciones, la humedad de suelo al momento del muestreo y la agregación.....	67
4.3.5. Dinámica temporal de la concentración de COS.....	68
4.3.6. Dinámica temporal del COS y COP almacenado en macroagregados.....	70
4.3.7. Relación entre el aporte de biomasa, el nivel de intensificación, el COS total y el COS y COP almacenado en macroagregados.....	72
4.4. Discusión.....	74
4.5. Conclusiones.....	76
4.6. Relación con las hipótesis planteadas.....	77
4.7. Relación con los otros capítulos.....	77
<b>Capítulo 5: Efecto de la frecuencia de adición y calidad de residuos sobre la dinámica de la respiración microbiana y la estabilidad de agregados de suelos contrastantes ...</b>	<b>78</b>
5.1. Introducción.....	79
5.2. Materiales y Métodos.....	80
5.2.1. Toma de muestras de suelo y diseño de los experimentos.....	80
5.2.1.1. Experimento 1.....	81
5.2.1.2. Experimento 2.....	82
5.2.2. Cuantificación de la respiración microbiana.....	82
5.2.3. Determinación de la estabilidad de los agregados.....	83
5.2.4. Determinación del contenido de C de los carbohidratos extractables en agua caliente.....	84
5.2.5. Análisis estadísticos.....	84
5.3. Resultados.....	84
5.3.1. Evolución de la respiración del suelo durante la incubación.....	84
5.3.1.1. Experimento 1.....	84
5.3.1.2. Experimento 2.....	88
5.3.2. Evolución de la estabilidad de agregados durante la incubación.....	90
5.3.2.1. Experimento 1.....	90
5.3.2.2. Experimento 2.....	93
5.3.3. Contenido de C de carbohidratos extractables en agua caliente (C-CEAC). 95	
5.3.3.1. Experimento 1.....	95
5.3.3.2. Experimento 2.....	96
5.3.5. Relación entre el contenido de C-CEAC y la estabilidad de agregados.....	98
5.4. Discusión.....	98
5.5. Conclusiones.....	100
5.6. Relación con las hipótesis planteadas.....	100
<b>Capítulo 6: Conclusiones Generales.....</b>	<b>102</b>
6.1. Síntesis global de los resultados obtenidos.....	103
6.2. Utilidad de la información generada.....	108

6.3. Posibles líneas de investigación.....	108
Bibliografía .....	110
Anexo .....	120

## Índice de tablas

---

<b>Tabla 2.1.</b> Descripción de las características texturales de los suelos (Plan Mapa de Suelos, 1998).	16
<b>Tabla 2.2.</b> Secuencia de cultivos de suelos de once lotes de producción y una situación inalterada en un Vertisol y un Molisol de Entre Ríos, Argentina.	17
<b>Tabla 2.3.</b> Índices de uso de la tierra para once sitios cultivados y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.	20
<b>Tabla 2.4.</b> Stock de carbono orgánico del suelo en masa equivalente ( $C_{equiv}$ ) para once sitios cultivados y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.	22
<b>Tabla 2.5.</b> Coeficientes de correlación ( $r$ ) de las relaciones entre los índices de uso de la tierra y el stock de COS en masa equivalente ( $C_{equiv}$ ) para once sitios cultivados y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.	24
<b>Tabla 2.6.</b> Coeficientes de correlación ( $r$ ) de la relación entre los índices de uso de la tierra y el diámetro medio ponderado (DMP) por la metodología de Le Bissonnais (1996) a 0-5 y 5-15 cm de profundidad para once sitios agrícolas y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.	26
<b>Tabla 2.7.</b> Diámetro medio ponderado de tres métodos de determinación de estabilidad de agregados (tamizado en húmedo, tamizado en seco y Le Bissonnais (1996)) a 0-5 y 5-15 cm de profundidad para once sitios agrícolas y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.	29
<b>Tabla 2.8.</b> Coeficientes de correlación ( $r$ ) de la relación entre los índices de uso de la tierra y los diámetros medios ponderados (DMP) por tres métodos de estabilidad estructural (tamizado en seco (TS), tamizado en húmedo (TH), Le Bissonnais (1996) (LB)) a 0-5 y 5-15 cm de profundidad para once sitios agrícolas y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.	33
<b>Tabla 3.1.</b> Ejemplo de cálculo del índice de frecuencia de soja para el sitio 5 de un suelo Molisol de Entre Ríos, Argentina.	42
<b>Tabla 3.2.</b> Frecuencia del cultivo de soja (FCS), clases de tamaños de agregados y carbono orgánico del suelo (COS) almacenados en agregados $>250 \mu m$ y $<250 \mu m$ para once lotes de producción y una situación inalterada, en un Vertisol y un Molisol de Entre Ríos, Argentina.	48
<b>Tabla 4.1.</b> Características de los suelos del sitio experimental (Plan Mapa de Suelos, 1998).	57
<b>Tabla 5.1.</b> Descripción de las características texturales (Plan Mapa de Suelos, 1998) de los suelos.	81
<b>Tabla 5.2.</b> Contenido de C de los carbohidratos extractables en agua caliente (CEAC) en diferentes momentos de evaluación para un Molisol y un Vertisol con diferentes calidades de residuos adicionados.	96
<b>Tabla 5.3.</b> Coeficientes de correlación ( $r$ ) entre el contenido de carbono de los carbohidratos extractables en agua caliente (C-CEAC) y la estabilidad de agregados para dos experimentos de incubación de un suelo Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.	98
<b>Tabla A.1.</b> Diámetros medios ponderados (DMPs) de los agregados de los diferentes pretratamientos de la metodología de Le Bissonnais (1996) para 0-5 y 5-15 cm, once sitios cultivados y una situación inalterada, bajo monte nativo, en un Molisol y un	121

Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

**Tabla A.2.** Diámetros medios ponderados (DMPs) de los agregados de los diferentes pretratamientos de la metodología de Le Bissonnais (1996) para 0-5 y 5-15 cm, once sitios cultivados y una situación inalterada, bajo monte nativo, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina. 122

**Tabla A.3.** Coeficientes de correlación ( $r$ ) de la relación entre los índices de uso de la tierra, el stock de COS en masa equivalente ( $C_{equiv}$ ) y los agregados  $>2000 \mu\text{m}$  de diferentes pretratamientos de estabilidad de agregados por la metodología de Le Bissonnais (1996) en 0-5 y 5-15 cm de profundidad, para once sitios agrícolas y un sitio inalterado, bajo monte nativo, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina. 123

**Tabla A.4.** Coeficientes de variación (CV-%), promedio de los diferentes momentos de muestreo de suelos, del diámetro medio ponderado por la metodología de tamizado en húmedo ( $DMP_{TH}$ ), de la concentración de carbono orgánico del suelo (COS) total, y del COS y carbono orgánico particulado (COP) almacenado en macroagregados de un experimento de secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina. 126

**Tabla A.5.** Tasa respiratoria media de los distintos tratamientos evaluados para un período de 13-15 días posteriores a cada adición de residuos en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina. 127

## Índice de figuras

---

<b>Figura 1.1.</b> Esquema con los diferentes agentes de agregación que interactúan en un suelo (Tisdall y Oades, 1982).	4
<b>Figura 1.2.</b> Esquema de la interacción entre la descomposición de la materia orgánica y la formación-destrucción de agregados (Cosentino, 2006).	5
<b>Figura 1.3.</b> Esquema conceptual de la actividad biológica del suelo en secuencias con diferente nivel de intensificación de las secuencias de cultivos (IIS). El IIS indica el número de cultivos por año. M-S= maíz-soja; T/S-M= trigo/soja de 2º-maíz; T/S-CC <sub>v</sub> /M= trigo/soja de 2º- cultivo de cobertura invernal/maíz. La estimación de la actividad biológica se realizó en base a resultados no publicados (Hass, <i>comunicación personal</i> ).	7
<b>Figura 2.1.</b> Diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados por los tres pretratamientos de estabilidad de los agregados. hr: humedecimiento repentino; dm: disgregación mecánica; hl: humedecimiento lento. Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la media para cada suelo y profundidad (n=36). Letras diferentes sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05). Mayúsculas: entre suelos para una misma profundidad y pretratamiento de estabilidad de agregados. Minúsculas: entre profundidades para un mismo suelo y pretratamiento de estabilidad de agregados.	25
<b>Figura 2.2.</b> Diámetro medio ponderado promedio de tres pretratamientos de estabilidad de agregados (DMP <sub>LB</sub> ) afectado por la concentración de carbono orgánico del suelo (COS), a) en 0-5 cm de profundidad, y b) en 5-15 cm de profundidad. Los círculos vacíos representan el Molisol. Los círculos llenos representan el Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de la media para cada sitio (n=3). Molisol 0-5 cm (Línea discontinua: $R^2=0,59$ , $P<0,01$ ). Molisol 5-15 cm (Línea discontinua: $R^2=0,74$ , $P<0,001$ ). Vertisol 0-5 cm (Línea continua: $R^2=0,74$ , $P<0,001$ ). Vertisol 5-15 cm (Línea continua: $R^2=0,52$ , $P<0,01$ ).	27
<b>Figura 2.3.</b> Relación entre el diámetro medio ponderado (DMP) de los tres métodos evaluados (tamizado húmedo – TH; tamizado seco – TS; Le Bissonnais (1996) – LB) a 0-5 y 5-15 cm de profundidad en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos. a y b indican las relaciones entre los DMP's por tamizado en seco y en húmedo para 0-5 y 5-15 cm de profundidad, respectivamente; c y d indican las relaciones entre los DMP's por tamizado en seco y por Le Bissonnais (1996) para 0-5 y 5-15 cm de profundidad, respectivamente; e y f indican las relaciones entre los DMP's por tamizado en húmedo y Le Bissonnais (1996) para 0-5 y 5-15 cm de profundidad, respectivamente. Los datos encerrados en un círculo indican el sitio inalterado en el Vertisol. Las rectas de regresión presentadas son las que fueron significativas ( $P<0,05$ ) y corresponden al Molisol. La línea diagonal sobre cada figura representa la línea 1:1 ( $y=x$ ).	31
<b>Figura 2.4.</b> Dendrogramas para diferentes índices de uso de la tierra en un Molisol a 0-5 cm de profundidad utilizando el diámetro medio ponderado de los agregados por tamizado en seco (DMP <sub>TS</sub> ), tamizado en húmedo (DMP <sub>TH</sub> ) y por el método de Le Bissonnais (DMP <sub>LB</sub> ). Los dendrogramas se construyeron utilizando el método de encadenamiento promedio de la distancia Euclídea. IIS= índice de intensificación de la secuencia (cultivos por año); IIS <sub>m</sub> = índice de intensificación de la secuencia (meses con cultivos en relación a los meses de la secuencia); ICS= índice del cultivo de soja; ICT= índice del cultivo de trigo; ICC= índice de cultivos cereales; ICP= índice de pasturas; FCS= frecuencia del cultivo de soja; FCT= frecuencia del cultivo de trigo; FCC= frecuencia de cultivos cereales; FCP= frecuencia de pasturas.	34
<b>Figura 3.1.</b> Stock de carbono orgánico del suelo (COS) en masa de suelo equivalente	44

a 0-30 cm de suelo ( $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$ ) en función de la frecuencia del cultivo de soja.  $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$  se calculó utilizando la situación inalterada en cada tipo de suelo como sistema de referencia. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

**Figura 3.2.** Stock de carbono orgánico del suelo (COS) en masa de suelo equivalente afectado por la frecuencia del cultivo de soja; (a): en 0-5 cm ( $C_{\text{equiv}0-5\text{cm}}$ ) y (b): en 5-15 cm ( $C_{\text{equiv}5-15\text{cm}}$ ).  $C_{\text{equiv}}$  se calculó utilizando la situación inalterada en cada tipo de suelo como sistema de referencia. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión. 44

**Figura 3.3.** Concentración de carbono orgánico del suelo (COS) afectado por la frecuencia del cultivo de soja (a): a 0-5 cm de profundidad, y (b): a 5-15 cm de profundidad. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión. 45

**Figura 3.4.** Nivel de estratificación del carbono orgánico del suelo (COS) afectado por la frecuencia del cultivo de soja (a): concentración de COS (0-5cm/5-15cm) y (b): stock de COS ( $C_{\text{equiv}0-5\text{cm}}/C_{\text{equiv}5-15\text{cm}}$ ).  $C_{\text{equiv}}$  fue calculado utilizando la situación inalterada de cada tipo de suelo como sistema de referencia. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión. 46

**Figura 3.5.** Porcentaje de agregados  $>2000\ \mu\text{m}$  afectado por la frecuencia de soja en 0-5 cm de profundidad. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión. 47

**Figura 3.6.** Proporción del COS total almacenado en clases de tamaños de agregados en función de la frecuencia del cultivo de soja a 0-5cm de profundidad, (a): en agregados  $>250\ \mu\text{m}$ , y (b): en agregados  $<250\ \mu\text{m}$ . Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión. 49

**Figura 3.7.** Relación entre el COS asociado con los grandes macroagregados ( $>2000\ \mu\text{m}$ ) y el COS asociado con los agregados  $>250\ \mu\text{m}$ . Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión. 50

**Figura 3.8.** Almacenaje de COS en grandes macroagregados en función de la frecuencia del cultivo de soja en 0-5 cm de profundidad. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión 50

del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

**Figura 3.9.** Stock de carbono orgánico del suelo (COS) ( $C_{\text{equiv } 0-5}$ ) en función del almacenaje de COS; (a): en agregados  $>250 \mu\text{m}$  y (b): en agregados  $<250 \mu\text{m}$ . Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión. 51

**Figura 4.1.** Temperatura media del aire mensual, precipitación total mensual y balance hídrico aparente (precipitación-evapotranspiración) registradas en el sitio experimental durante los períodos 2008-2010. Los triángulos sobre la figura indican las diferentes fechas de muestreos. 57

**Figura 4.2.** Diferentes secuencias de cultivos evaluadas durante el período experimental (2008-2010). S-S: soja-soja; S-M: soja-maíz;  $CC_T/S-M$ : cultivo de cobertura de trigo/soja-maíz; T/S-M: trigo/soja-maíz;  $CC_T/S-CC_T/S$ : cultivo de cobertura de trigo/soja- cultivo de cobertura de trigo/soja; T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja.  $IIS_m$ : índice de intensificación de las secuencia para cada secuencia de cultivos. Líneas negras representan el período con cultivos. Líneas grises, representan el período de barbecho. Las flechas sobre la figura indican las diferentes fechas de muestreo. 58

**Figura 4.3.** Fotografía de la fracción retenida sobre el tamiz de  $53 \mu\text{m}$  para la determinación del carbono orgánico particulado (COP), mostrando la dispersión alcanzada con 3 hs de agitado en ambos suelos evaluados. 60

**Figura 4.4.** Aporte de biomasa aérea acumulada durante el período experimental (2008-2010) en seis secuencias de cultivos y dos suelos. S-S: soja-soja;  $CC_T/S-CC_T/S$ : cultivo de cobertura de trigo/soja-cultivo de cobertura de trigo/soja; T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja; S-M: soja-maíz;  $CC_T/S-M$ : cultivo de cobertura de trigo/soja-maíz; T/S-M: trigo/soja-maíz. Las barras claras dentro de cada suelo indican las secuencias con menores índices de intensificación en cada tipo de suelo. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre secuencias de cultivos para cada tipo de suelo, de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha: 0,05$ ). 63

**Figura 4.5.** Relación entre el aporte de biomasa aérea acumulada durante el período experimental (2008-2010) y el índice de intensificación de las secuencias ( $IIS_m$ ). Círculos vacíos indican el Molisol. Círculos llenos indican el Vertisol. Línea continua: Vertisol. Línea discontinua: Molisol. 63

**Figura 4.6.** Dinámica temporal del diámetro medio ponderado en seis secuencias de cultivos, dos suelos y dos profundidades durante el período de estudio (de abril de 2008 a junio de 2010). S-S: soja-soja (línea roja continua); S-M: soja-maíz (línea roja discontinua);  $CC_T/S-CC_T/S$ : cultivo cobertura de trigo/soja-cultivo cobertura de trigo/soja (línea verde continua);  $CC_T/S-M$ : cultivo cobertura de trigo/soja-maíz (línea verde discontinua); T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja (línea azul continua); T/S-M: trigo/soja-maíz (línea azul discontinua). La comparación de las medias entre las secuencias de cultivos para una misma fecha de muestreo se realizó mediante un test de Tukey ( $\alpha: 0,05$ ) y la significancia se indicó como NS; \*, \*\*, \*\*\* (no significativo,  $P<0,05$ ,  $P<0,01$ ,  $P<0,001$ , respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada fecha de muestreo. 64

**Figura 4.7.** Relación entre a) el porcentaje de macroagregados de 0-5 cm de profundidad al final del experimento, y b) el porcentaje de fracción  $<53 \mu\text{m}$  de 0-5 cm de profundidad al final del experimento y el aporte de biomasa aérea en materia seca durante el período experimental. Círculos vacíos indican suelo Molisol. Círculos llenos indican suelo Vertisol. Línea continua: Vertisol. Línea discontinua: Molisol. 66

**Figura 4.8.** Relación entre el índice de intensificación de las secuencias ( $IIS_m$ ) y el porcentaje de macroagregados de 0-5 cm de profundidad al final del experimento. Círculos vacíos indican suelo Molisol. Círculos llenos indican suelo Vertisol. Línea continua: Vertisol. Línea discontinua: Molisol. 67

**Figura 4.9.** Relación entre el factor de erosividad de las precipitaciones y el porcentaje de macroagregados para tres secuencias de cultivos de un Molisol a 0-5 cm de profundidad. Círculos indican la secuencia soja-soja (S-S, línea punteada). Cuadrados indican la secuencia trigo/soja-maíz (T/S-M, línea continua). Triángulos indican la secuencias trigo/soja-trigo/soja (T/S-T/S, línea con guiones). 68

**Figura 4.10.** Dinámica temporal de la concentración de carbono orgánico del suelo en seis secuencias de cultivos, dos suelos y dos profundidades durante el período de estudio (de Abril de 2008 a Junio de 2010). S-S: soja-soja (línea roja continua); S-M: soja-maíz (línea roja discontinua);  $CC_T/S-CC_T/S$ : cultivo cobertura de trigo/soja-cultivo cobertura de trigo/soja (línea verde continua);  $CC_T/S-M$ : cultivo cobertura de trigo/soja-maíz (línea verde discontinua); T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja (línea azul continua); T/S-M: trigo/soja-maíz (línea azul discontinua). La comparación de las medias entre las secuencias de cultivos para una misma fecha de muestreo se realizó mediante un test de Tukey ( $P < 0,05$ ) y la significancia se indicó como NS; \*, \*\*, \*\*\* (no significativo,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada fecha de muestreo. 69

**Figura 4.11.** Dinámica temporal del carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en macroagregados ( $>250 \mu m$ ) en seis secuencias de cultivos, dos suelos y dos profundidades durante el período de estudio (de Abril de 2008 a Junio de 2010). S-S: soja-soja (línea roja continua); S-M: soja-maíz (línea roja discontinua);  $CC_T/S-CC_T/S$ : cultivo cobertura de trigo/soja-cultivo cobertura de trigo/soja (línea verde continua);  $CC_T/S-M$ : cultivo cobertura de trigo/soja-maíz (línea verde discontinua); T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja (línea azul continua); T/S-M: trigo/soja-maíz (línea azul discontinua). La comparación de las medias entre las secuencias de cultivos para una misma fecha de muestreo se realizó mediante un test de Tukey ( $\alpha: 0,05$ ) y la significancia se indicó como NS; \*, \*\*, \*\*\* (no significativo,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada fecha de muestreo. 70

**Figura 4.12.** Dinámica temporal de la carbono orgánico particulado almacenado en macroagregados ( $>250 \mu m$ ) en seis secuencias de cultivos, dos suelos y dos profundidades durante el período de estudio (de Abril de 2008 a Junio de 2010). S-S: soja-soja (línea roja continua); S-M: soja-maíz (línea roja discontinua);  $CC_T/S-CC_T/S$ : cultivo cobertura de trigo/soja-cultivo cobertura de trigo/soja (línea verde continua);  $CC_T/S-M$ : cultivo cobertura de trigo/soja-maíz (línea verde discontinua); T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja (línea azul continua); T/S-M: trigo/soja-maíz (línea azul discontinua). La comparación de las medias entre las secuencias de cultivos para una misma fecha de muestreo se realizó mediante un test de Tukey ( $P < 0,05$ ) y la significancia se indicó como NS; \*, \*\*, \*\*\* (no significativo,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada fecha de muestreo. 72

**Figura 4.13.** Relación entre la biomasa aportada durante el período experimental y el carbono orgánico del suelo (COS) asociado a macroagregados ( $>250 \mu m$ ) al final del experimento en 0-5 cm de profundidad. Círculos vacíos indican suelo Molisol. Círculos llenos indican suelo Vertisol. La línea continua indica el Vertisol. La línea discontinua indica el Molisol. Las flechas indican la ecuación de ajuste de la regresión para cada suelo. 73

**Figura 4.14.** Relación entre el índice de intensificación de las secuencias ( $IIS_m$ ) y los gramos de carbono orgánico del suelo (COS) asociado a macroagregados de 0-5 cm 74

de profundidad al final del experimento para el conjunto de datos de los dos suelos evaluados. La línea continua indica el Vertisol. La línea discontinua indica el Molisol. Las flechas indican la ecuación de ajuste de la regresión para cada suelo.

**Figura 5.1.** Evolución de la actividad respiratoria del suelo ante distintas calidades y frecuencias de residuos vegetales aportados y testigos sin residuos en: a) un Molisol, b) un Vertisol. M: Maíz; S: Soja; Te: Testigo; F1: 6 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio; F2: 3 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio y 3 Mg ha<sup>-1</sup> al día 62; F3: 2 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio, 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 41 y 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 84. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación. 85

**Figura 5.2.** Respiración acumulada del suelo ante distintas frecuencias de adición de residuos de maíz (Mz, a y c) y soja (Sj, b y d) y testigos sin residuos en un Molisol (a y b) y un Vertisol (c y d). F1: 6 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio; F2: 3 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio y 3 Mg ha<sup>-1</sup> al día 62; F3: 2 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio, 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 41 y 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 84; Te: Testigo. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación. 87

**Figura 5.3.** Proporción del C de los residuos vegetales que fueron respirados durante el período de incubación, a) en cada tipo de suelo (Molisol y Vertisol), b) entre calidades de residuos (maíz y soja), c) entre frecuencias de adición (F1: 6 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio; F2: 3 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio y 3 Mg ha<sup>-1</sup> al día 62; F3: 2 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio, 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 41 y 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 84). Las letras sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05). 88

**Figura 5.4.** Evolución de la actividad respiratoria del suelo ante distintas calidades y frecuencias de aportes de residuos vegetales de trigo y trébol de olor blanco y un testigo sin residuos en, a) un Molisol, b) un Vertisol. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación. 89

**Figura 5.5.** Respiración acumulada del suelo luego de la adición de residuos de trigo y trébol de olor blanco y un testigo sin residuos en: a) un Molisol, b) un Vertisol. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación. 90

**Figura 5.6.** Proporción del C de los restos vegetales de trébol de olor blanco y trigo que fueron respirados durante el período de incubaciones en cada tipo de suelo. Las letras sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05). 90

**Figura 5.7.** Evolución del diámetro medio ponderado de los agregados por el pretratamiento de humedecimiento repentino (DMP<sub>hr</sub>) durante el período de incubación luego de la adición de residuos de maíz (Mz: a, c) y soja (Sj: b, d) y de testigos sin residuos (Te) en un Vertisol (c, d) y un Molisol (a, b). Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación. 91

**Figura 5.8.** Evolución del diámetro medio ponderado de los agregados por el pretratamiento de disgregación mecánica (DMP<sub>dm</sub>) durante el período de incubación luego de la adición de residuos de maíz (Mz: a, c) y soja (Sj: b, d) y de testigos sin residuos (Te) en un Vertisol (c, d) y un Molisol (a, b). Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación. 92

**Figura 5.9.** Evolución del diámetro medio ponderado de los agregados por el pretratamiento de humedecimiento lento (DMP<sub>hl</sub>) durante el período de incubación luego de la adición de residuos de maíz (Mz: a, c) y soja (Sj: b, d) y de testigos sin residuos en un Vertisol (c, d) y un Molisol (a, b). Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación. 93

- Figura 5.10.** Evolución del diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados por tres pretratamientos de la método de estabilidad de agregados de Le Bissonnais (1996) durante el período de incubación luego de la adición de residuos de trigo y trébol de olor blanco y un testigo sin residuos en un Molisol (a, c y e) y un Vertisol (b, d y f).  $DMP_{hr}$ : DMP por el pretratamiento de humedecimiento repentino.  $DMP_{dm}$ : DMP por el pretratamiento de disgregación mecánica.  $DMP_{hl}$ : DMP por el pretratamiento de humedecimiento lento.. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación. 94
- Figura 5.11.** Contenido de C de los carbohidratos extractables en agua caliente (C-CEAC) en diferentes momentos de evaluación (día 41, 84 y 120) y para dos suelos (un Molisol y un Vertisol) de Entre Ríos, Argentina. Las letras sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a Test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05). Mayúsculas: entre suelos para un mismo momento de evaluación. Minúsculas: entre momentos de evaluación para un mismo tipo de suelo. 96
- Figura 5.12.** Tasas respiratorias promedio y tasas de cambio en la estabilidad de los agregados por el pretratamiento de humedecimiento lento ( $DMP_{hl}$ ) ante distintas frecuencias de adición de residuos de maíz (a y c) y soja (b y d) en un Molisol (a y c) y un Vertisol (b y d) de Entre Ríos, Argentina. F1: 6 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio; F2: 3 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio y 3 Mg ha<sup>-1</sup> al día 62; F3: 2 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio, 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 41 y 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 84. Letras diferentes dentro de un mismo período de incubación indican diferencias estadísticas significativas entre frecuencias de adición de residuos de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05). Minúsculas: entre tasas de respiración. Mayúsculas: entre tasas de cambio en el  $DMP_{hl}$ . 97
- Figura 6.1.** Diagrama conceptual sintetizando las principales relaciones detectadas a lo largo de la tesis y mostrando las diferentes causas que afectan la agregación y el almacenamiento de COS en suelos con agentes de agregación contrastantes. Las relaciones entre las variables son descriptas en cada paso por medio de gráficos que resumen los principales hallazgos de la tesis. COS: carbono orgánico del suelo. IIS: índice de intensificación de las secuencias. FCS: frecuencia del cultivo de soja. Ciclos H-S: ciclos de humedecimiento-secado. 105
- Figura A.1.** Diámetro medio ponderado de los agregados (DMPs) afectados por la concentración de COS a 0-5 y 5-15 cm de profundidad. Círculos vacíos representan el Molisol. Círculos llenos representan el Vertisol. a y b) Humedecimiento repentino ( $DMP_{hr}$ ) (Molisol 0-5 cm:  $R^2=0,51$ ,  $P<0,01$ ; Vertisol 0-5cm:  $R^2=0,82$ ,  $P<0,001$ ; Molisol 5-15cm:  $R^2=0,44$ ,  $P<0,05$ ; Vertisol 5-15 cm:  $R^2=0,47$ ,  $P<0,05$ ). c y d) Disgregación mecánica ( $DMP_{dm}$ ) (Molisol 0-5 cm:  $R^2=0,59$ ,  $P<0,01$ ; Vertisol 0-5 cm:  $R^2=0,58$ ,  $P<0,01$ ; Molisol 5-15 cm:  $R^2=0,87$ ,  $P<0,001$ ; Vertisol 5-15 cm:  $R^2=0,32$ ,  $P=NS$ ). e y f) Humedecimiento lento ( $DMP_{hl}$ ) (Molisol 0-5 cm:  $R^2=0,54$ ,  $P<0,01$ ; Vertisol 0-5 cm:  $R^2=0,67$ ,  $P<0,01$ ; Molisol 5-15 cm:  $R^2=0,55$ ,  $P<0,01$ ; Vertisol 5-15 cm:  $R^2=0,68$ ,  $P<0,01$ ). Las barras verticales junto a los círculos representan el desvío estándar de cada media (n=3). 124
- Figura A.2.** Diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados de suelo por tamizado en húmedo, tamizado en seco y por el método de Le Bissonnais, afectados por: a) el índice de intensificación de la secuencia ( $IIS_m$ ) y b) la frecuencia del cultivo de soja (FCS) a 0-5 cm de profundidad en un Molisol de Entre Ríos, Argentina. 125

## Abreviaturas

---

CC <sub>T</sub> /S	Cultivo de cobertura de trigo/soja
CC <sub>T</sub> /S-M	Cultivo de cobertura de trigo/soja-maíz
CEAC	Carbohidratos extractables en agua caliente
C <sub>equiv</sub>	Carbono en masa de suelo equivalente
COP	Carbono orgánico particulado
COS	Carbono orgánico del suelo
DMP	Diámetro medio ponderado
DMP <sub>dm</sub>	DMP pretratamiento disgregación mecánica
DMP <sub>hl</sub>	DMP pretratamiento humedecimiento lento
DMP <sub>hr</sub>	DMP pretratamiento humedecimiento repentino
DMP <sub>LB</sub>	DMP por la metodología de Le Bissonnais
DMP <sub>TH</sub>	DMP por tamizado en húmedo
DMP <sub>TS</sub>	DMP por tamizado en seco
FCC	Frecuencia cereales
FCP	Frecuencia pasturas
FCS	Frecuencia cultivo de soja
FCT	Frecuencia de trigo
ICC	Índice cultivos cereales
ICP	Índice pasturas
ICS	Índice cultivo soja
ICT	Índice cultivo trigo
IIS	Índice intensificación de las secuencias (n° cultivos por años)
IIS <sub>m</sub>	Índice intensificación (meses con cultivos/meses del año)
L	Lino
M	Maíz
P	Pastura
S	Soja
Sg	Sorgo
S-M	Soja-maíz
S-S	Soja-soja
T	Trigo
T/S	Trigo/soja
TOB	Trébol de olor blanco
T/S-M	Trigo/soja-maíz

## Resumen

---

### **Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados**

Los actuales sistemas agrícolas de la región pampeana argentina presentan una elevada frecuencia de barbechos en las secuencias de cultivos lo que resulta en el desperdicio de recursos ambientales y en un mayor impacto de los procesos erosivos sobre la agregación y el almacenaje de carbono orgánico del suelo (COS). La intensificación de las secuencias de cultivos, por medio de la reducción de los períodos de barbecho es una alternativa para mejorar la eficiencia y productividad de dichos sistemas, aunque existe escasa información sobre su impacto en la agregación y en el almacenaje de COS en suelos con agentes de agregación contrastantes. El objetivo de esta tesis fue evaluar en un Molisol y un Vertisol los mecanismos involucrados en la consolidación de la estructura y en el almacenaje de COS ante cambios en el nivel de intensificación y en la composición de la secuencia de cultivos. A través de diferentes escalas de evaluación (lotes de producción, ensayos de campo, incubaciones en laboratorio) se analizó el impacto del tiempo de ocupación con cobertura vegetal viva y el efecto de la calidad y frecuencia de adición de residuos sobre la dinámica de la agregación y el almacenaje de COS. En comparación con el Vertisol, el Molisol demostró una mayor dependencia de agentes orgánicos de la agregación para la formación de agregados. Además, la agregación y el COS almacenado en los macroagregados se asociaron negativamente con la frecuencia de soja en las secuencias. En ambos tipos de suelo, la adición más frecuente de residuos vegetales permitió mantener elevadas las tasas respiratorias y de agregación en comparación con una única adición de residuos en ensayos de laboratorio. A pesar del menor impacto de las secuencias de cultivos en el Vertisol y a la elevada variación temporal en la agregación detectada en los suelos, mantener el suelo ocupado por prolongados períodos de tiempo favoreció el mayor aporte de biomasa, la agregación y las ganancias de COS en macroagregados en ambos tipos de suelo.

**Palabras clave:** *índice de intensificación, frecuencia de soja, agentes de agregación, stock de C, respiración microbiana, Molisol, Vertisol.*

## Abstract

---

### **Intensification of cropping sequences in a Mollisol and a Vertisol: changes in aggregate stability and C storage**

The current agricultural systems in the Argentinean Pampas have a high fallow frequency in the cropping sequences, which lead to a significant waste of potential productivity of the environment and to an important impact of erosion process on soil aggregation and soil organic carbon (SOC) storage. Increasing cropping intensity is a useful tool to improve the efficiency and productivity of these systems, although the knowledge on the impact on soil aggregation and SOC storage in soils with contrasting aggregation agents is scarce. The aim of this thesis was to study the mechanisms involved in soil structure consolidation and SOC storage as affected by cropping intensification and sequence composition in a Mollisol and a Vertisol. The impact of period with vegetal cover and the effect of quality and frequency of residue addition on the dynamics of soil aggregation and SOC storage was evaluated in production fields, field experiment and laboratory incubations. In comparison with the Vertisol, the Mollisol demonstrated a higher dependence on organic aggregation agents. In addition, soil aggregation and SOC storage in macroaggregates were negatively associated with soybean cropping frequency in the crop sequences. In both soil types, more frequent additions of plant residues led to maintain high respiration and aggregation rates as compared with less frequent additions. Despite the low impact of cropping sequences in the Vertisol and the high temporal variation in soil aggregation, maintaining the soil surface with vegetal cover for long periods in the crop sequences led to a higher residue addition and improved soil aggregation and SOC storage in macroaggregates in both soil types.

**Key words:** *intensification index, soybean cropping frequency, aggregation agents, SOC stock, microbial respiration, Mollisol, Vertisol.*

# **Capítulo 1**

## **Introducción General**

## 1.1. Introducción

### 1.1.1. Crecimiento demográfico y producción de alimentos

De acuerdo a estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la población mundial se incrementará de los actuales 6800 millones de habitantes a 9100 millones en 2050, lo que representa un tercio más de personas para alimentar (FAO, 2009). Si bien a nivel mundial un 11 % de la superficie terrestre es actualmente utilizada para la producción de cultivos, lo que equivale a un tercio del área con aptitud agrícola, sólo una parte de la tierra es potencialmente apta para realizar los cultivos de mayor demanda alimenticia (FAO, 2009). Además, dicha superficie se concentra en unos pocos países y, en muchos casos, presenta limitaciones físicas y químicas que la vuelven inviable económicamente para su producción (FAO, 2009).

Las expansión de la agricultura hacia nuevas áreas sin una historia agrícola previa es, por lo tanto, un problema complejo y que en muchos casos conduce a la degradación de los recursos naturales (Wilson, 2008). Esto sugiere que el incremento en la producción de alimentos necesarios para sostener el creciente aumento poblacional debería orientarse a lograr una mayor eficiencia de uso de los agro-ecosistemas actuales (Lal, 2010), lo cual puede conseguirse a través de: a) mayores rendimientos por unidad de superficie, y b) mayor número de cultivos por año lo que equivale a una reducción en la frecuencia de barbechos anuales en las secuencias de cultivos (Caviglia y Andrade, 2010).

### 1.1.2. Uso actual de la tierra en Sudamérica

A nivel mundial, el 43 % de la superficie implantada con soja (*Glycine max* L. Merr.) se encuentra en Sudamérica, principalmente en Brasil (22 %) y Argentina (17 %) (FAOSTAT, 2011). Por otra parte, la relación entre el área sembrada con soja con respecto a otro cultivo estival como el maíz (*Zea mays* L.), es de 6 en Argentina y Uruguay y de 1,7 en Brasil (2005-2009) (FAOSTAT, 2011). Esto evidencia que en algunos países, los sistemas de cultivos extensivos se encuentran dominados por el cultivo de soja, principalmente como único cultivo anual (Caviglia y Andrade, 2010).

Este escenario ha sido favorecido por la introducción de genotipos resistentes al herbicida glifosato junto con la adopción del sistema de siembra directa (los cuales permitieron reducir los costos de producción), así como también a precios internacionales favorables en comparación a los cereales (Satorre, 2005). A su vez, la elevada plasticidad del cultivo de soja a diferentes ambientes permite que sea cultivada en un amplio rango de latitudes (Baigorri, 1997). Esto favoreció el avance sobre áreas de mayor fragilidad ambiental las que tradicionalmente se encontraban ocupadas con ganadería o bosques nativos (Paruelo et al., 2006; Baldi y Paruelo, 2008).

El vertiginoso cambio en el uso de la tierra ocurrido en los últimos años puede afectar de manera negativa las propiedades del suelo involucradas en su funcionalidad, lo que lo convierte en una temática de gran trascendencia y que necesita ser evaluado para generar información de utilidad que contribuya a revertir los efectos negativos sobre los agro-ecosistemas actuales.

### 1.1.3. La intensificación de las secuencias de cultivos como un mecanismo para mejorar la eficiencia de uso de los agro-ecosistemas

De acuerdo a la economía clásica, el término “intensificación”, indica un incremento en la producción a través de un uso más intenso de los factores (i.e. tierra, capital y trabajo), lo que muchas veces lleva a que se asocie el término a una connotación negativa debido a que se asume que deben utilizarse mayor cantidad de insumos sin tener en cuenta la sustentabilidad de los sistemas (Caviglia, 2007).

Sin embargo, existen otras visiones que definen a la intensificación como el proceso hacia un cambio gradual en el uso de la tierra, que hace posible cultivar una porción de tierra de manera más frecuente que antes (Boserup, 1987), lo que involucra el uso de menores períodos de barbecho. De acuerdo a esta visión, la intensificación de las secuencias de cultivos propone un uso más intenso y eficiente de los recursos ambientales a través de una mayor fracción de la estación de crecimiento con cobertura vegetal viva (logrando un aporte frecuente y continuo de residuos vegetales, provenientes no sólo de la parte aérea sino también de raíces), manteniendo o incrementado los rendimientos de los cultivos por unidad de área y utilizando prácticas sustentables orientadas a preservar los recursos naturales (Caviglia y Andrade, 2010).

### 1.1.4. Evaluación del uso de la tierra

El uso de la tierra en los agro-ecosistemas actuales puede ser caracterizado a través de muchas maneras, siendo las más comunes aquéllas que comparan un cambio de acuerdo a un uso corriente (e.g. agrícola, agrícola-ganadera, forestal, etc.) utilizando un pastizal natural o una situación no cultivada como sistema de referencia (Cambardella y Elliot, 1993; Chenu et al., 2000). También, ha habido intentos para cuantificar el cambio en el uso de la tierra y correlacionarlo con las propiedades del suelo, utilizando el tiempo transcurrido desde que surgió un cambio de uso (e.g. años bajo agricultura, pastura, siembra directa, etc.) en comparación con un pastizal natural o una tierra no cultivada (Wilson, 2008).

Para cuantificar el nivel de intensificación de las secuencias de cultivos Farahani et al. (1998) propusieron un índice de intensificación de las secuencias (IIS) el cual se calcula como el cociente entre el número de cultivos y la duración de la secuencia. De esta manera, aquellas secuencias que contengan más de un cultivo por año, como el doble cultivo trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja, tendrán mayor índice de intensificación, mientras que aquéllas con períodos de barbecho frecuente tendrán un IIS menor, como es el caso de las secuencias trigo/barbecho, muy comunes en las grandes planicies de los Estados Unidos (Wood et al., 1990, 1991; Sherrod et al., 2003).

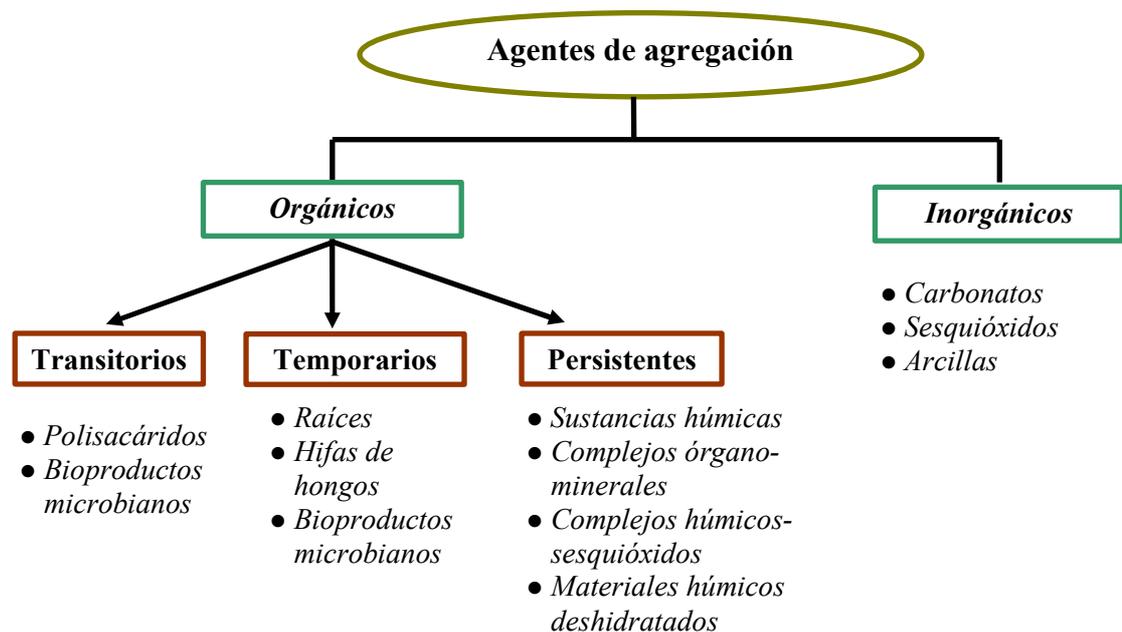
Sin embargo, este índice presenta algunos inconvenientes cuando se considera la utilización de pasturas o cultivos de cobertura en la rotación, o se intenta realizar comparaciones con situaciones inalteradas, ya que sólo tiene en cuenta el número de cultivos y no la duración en la ocupación de la superficie. De acuerdo con esto, índices que incluyan la fracción de tiempo anual con cobertura vegetal viva o la frecuencia de un cultivo particular en la secuencia de cultivos puede ayudar a caracterizar sistemas con diferente intensidad en el uso de la tierra (Franzlubbers et al., 1994; Farahani et al., 1998; Caviglia y Andrade, 2010; Novelli et al., 2011, 2013). En este sentido, los pastizales naturales o tierras bajo rotaciones agrícolas-ganaderas que incluyen pasturas cultivadas pueden ser caracterizadas por una elevada fracción de tiempo anual con cobertura viva en comparación con secuencias de cultivos con elevada frecuencia de

barbecho, basadas en cultivos anuales (Sasal et al., 2010). Un elevado período de ocupación con cobertura vegetal viva es utilizado en esta tesis como un sinónimo de sistemas intensificados los cuales utilizan más eficientemente los recursos del ambiente (i.e. agua y radiación solar) y permiten adiciones frecuentes de residuos vegetales al suelo en comparación con sistemas con frecuentes barbecho.

La selección de un índice de uso de la tierra apropiado para predecir tendencias tempranas en las propiedades del suelo es una herramienta clave para el desarrollo de sistemas agrícolas sustentables, así como también para el diseño de potenciales sistemas de monitoreo los cuales pueden ser de mucha utilidad para el desarrollo de políticas oficiales (Viglizzo et al., 2012).

#### 1.1.5. La agregación del suelo: un indicador sensible a los cambios en el uso de la tierra

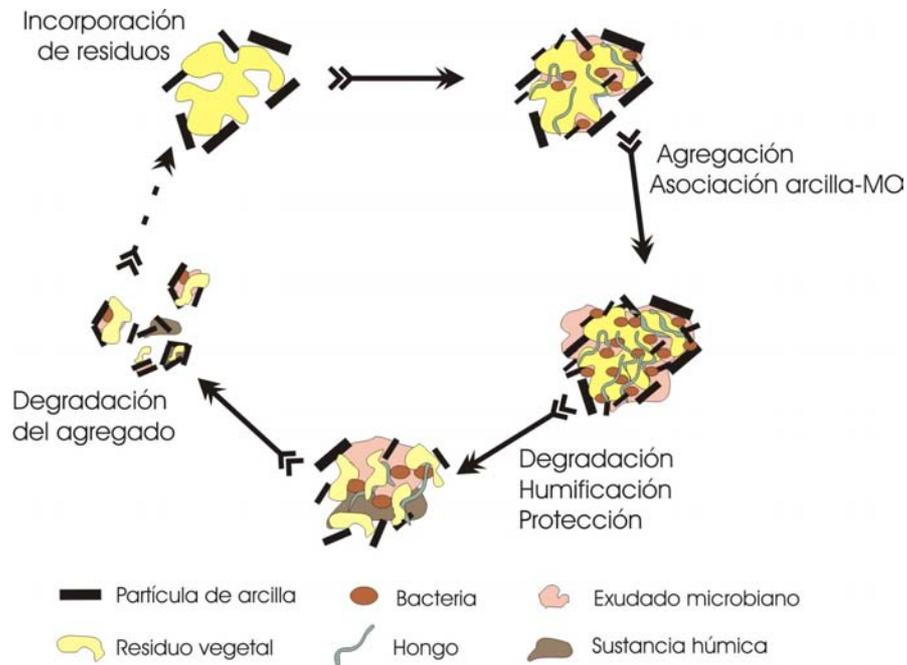
La agregación, es un proceso por el cual las partículas de suelo son unidas a través de diferentes materiales orgánicos e inorgánicos (Figura 1.1) (Tisdall y Oades, 1982; Amezketa, 1999). Es una propiedad dinámica la cual puede presentar fluctuaciones temporales causadas por la interacción de muchos factores incluyendo climáticos, de manejo, debidas al tipo de vegetal presente, a la textura del suelo, a procesos pedogenéticos, a la actividad microbiana, a la presencia de iones intercambiables, etc. (Kay, 1998; Alvaro-Fuentes et al., 2008).



**Figura 1.1.** Esquema con los diferentes agentes de agregación que interactúan en un suelo (Tisdall y Oades, 1982).

Algunos autores sugieren que los macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ) surgen de la unión de microagregados ( $<250 \mu\text{m}$ ), los cuales presentan mayor resistencia a las prácticas agrícolas que los macroagregados debido a su fuerte unión (Edwards y Bremner, 1967). Otros, indican que los agregados se unen en distintos estados (Figura 1.2) a través de agentes de unión orgánicos (Figura 1.1) de tipo transitorios (polisacáridos microbianos

y vegetales), temporarios (raíces e hifas de hongos), y persistentes (materiales aromáticos asociados con cationes de metales polivalentes) (Tisdall y Oades, 1982). Alternativamente se ha sugerido que los macroagregados pueden formarse alrededor de carbono orgánico particulado (COP), proceso que permite protegerlo del ataque microbiano al quedar ocluido dentro de los agregados de suelo (Beare et al., 1994a).



**Figura 1.2.** Esquema de la interacción entre la descomposición de la materia orgánica y la formación-destrucción de agregados (Cosentino, 2006).

La estabilidad de los agregados de suelo, definida como la habilidad para mantener la arquitectura de su fracción sólida y el espacio poroso cuando son sometidos a un estrés (Angers y Carter, 1996), puede ser incrementada por la adición de materia orgánica al suelo debido a la estimulación de la actividad microbiana (Figura 1.2). Esto puede deberse a la acción de hifas de hongos que permiten unir partículas de suelos (Degens et al., 1996), al incremento en la repelencia entre agregados por la producción de sustancias hidrofóbicas (Hallet y Young, 1999), y a los polisacáridos extracelulares exudados por bacterias y hongos que pueden unir las partículas de suelo e incrementar su cohesión (Chenu y Guérif, 1991).

La estabilidad de los agregados de suelo es una de las características más deseables para sostener la productividad agrícola y preservar la calidad ambiental (Amezketta, 1999), y uno de los indicadores de calidad de suelo más ampliamente utilizados debido a que es sensible para detectar cambios tempranos en las propiedades del suelo afectadas por el uso de la tierra (Arshad y Coen, 1992; Amezketta, 1999). Además, ha comenzado a seleccionarse como un indicador de calidad de suelo debido a su relación con el carbono orgánico del suelo (COS), ya que su almacenaje se encuentra estrechamente vinculado con el tamaño de agregados (Six et al., 2000a; Denef et al., 2002; Denef y Six, 2005; Novelli et al., 2011).

### 1.1.6. La agregación como mecanismo para almacenar COS

La agregación del suelo es un mecanismo que incrementa el almacenaje de COS (Tisdall y Oades, 1982; Six et al., 2004), debido a la protección física dentro de los agregados (Figura 1.2) (Beare et al., 1994a; Balesdent et al., 2000). No obstante, la protección del COS puede cambiar en suelos que difieren en los agentes que estabilizan los agregados (Figura 1.1) (Tisdall y Oades, 1982; Oades, 1993; Six et al., 2000a, b; Deneff et al., 2002; Deneff y Six, 2005; Bronick y Lal, 2005 a, b; Fabrizzi et al., 2009; Novelli et al., 2011).

Se ha sugerido que en suelos dominados por arcillas de tipo 2:1, el COS es el mejor agente de unión de agregados debido a que los complejos materia orgánica-metales polivalentes forman puentes entre las cargas negativas de las arcillas 2:1 (Six et al., 2000b). Sin embargo, en suelos dominados por arcillas 1:1, la estabilidad del suelo es inducida por la capacidad de unión de los óxidos y los minerales 1:1 (Oades y Water, 1991).

Estudios previos han demostrado que la arcilla y el COS interactúan en el suelo para formar complejos y microagregados que lo protegen de la degradación (Hassink y Whitmore, 1997), lo que explica la asociación entre el stock de COS y el contenido de limo más arcilla (Hassink y Whitmore, 1997; Plante et al., 2006).

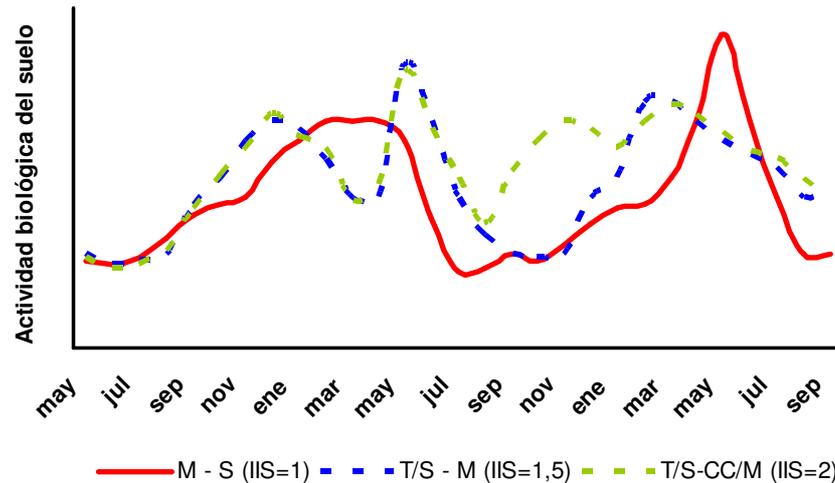
En suelos del orden Molisol, el COS es considerado uno de los principales agentes que estabiliza los agregados del suelo (Fabrizzzi et al., 2009), mientras que en Oxisoles, los óxidos de hierro y de aluminio son responsables del mayor aporte a la estabilidad de los agregados (Dalal y Bridge, 1996; Oades, 1993; Fabrizzzi et al., 2009). Por otra parte, en los Vertisoles, la estabilidad de agregados puede ser principalmente atribuida al elevado contenido de arcillas, principalmente del tipo de las esmectitas, el cual protege al COS (Stephan et al., 1983). Además, la capacidad de contracción y expansión propia de los Vertisoles ha sido sugerida como una propiedad que facilita el reestablecimiento de la estructura del suelo (Pillai y McGarry, 1999).

Esto sugiere que las características mineralógicas pueden influenciar la estabilidad de la estructura y el almacenaje de COS, y que el impacto de la intensificación de las secuencias de cultivos puede ser muy diferente entre suelos que contrastan en su mineralogía.

Mientras que existen numerosos estudios que han evaluado el efecto de las prácticas de labranza sobre el almacenaje de COS y la distribución de agregados (Mikha y Rice, 2004; Wright y Hons, 2004, 2005; Fabrizzzi et al., 2009; López-Fando y Pardo, 2011), existe poca evidencia del impacto de la intensificación de las secuencias de cultivos sobre la consolidación de la estructura y el almacenaje de COS en agregados de suelos contrastantes. En comparación con los Molisoles, los Vertisoles han recibido una menor atención y surgen interrogantes con respecto al impacto de una mayor frecuencia de adición de residuos, debido a la intensificación de las secuencias de cultivos, sobre la agregación y el almacenaje de COS.

La mayor frecuencia de adición de residuos vegetales al intensificar las secuencias de cultivos podría favorecer el mantenimiento de una elevada actividad microbiana por un mayor período de tiempo (Figura 1.3), produciendo diferentes sustancias cementantes (Figura 1.1) que proporcionarían una mayor estabilidad de la estructura del suelo y un incremento en el almacenaje de COS (Six et al., 2006), debido a que disminuiría la velocidad del ciclado de los agregados que comprende su formación, estabilización y destrucción (Figura 1.2) (Six et al., 2004).

Un indicador de la actividad microbiana es la respiración del suelo la cual se encuentra fuertemente asociada con las tasas de descomposición del C adicionado (Cosentino et al., 2006). Se han reportado correlaciones estrechas para distintos suelos entre la respiración acumulada en ensayos de incubaciones y la cantidad de macroagregados producidos (De Gryze et al., 2005). Esto sugiere que la dinámica de la respiración puede ser un indicador adecuado para evaluar el impacto de la frecuencia de adición de residuos (lograda al intensificar las secuencias de cultivos) sobre la consolidación de la estructura y el almacenaje de COS en agregados de suelos con características mineralógicas contrastantes.



**Figura 1.3.** Esquema conceptual de la actividad biológica del suelo en secuencias con diferente nivel de intensificación de las secuencias de cultivos (IIS). El IIS indica el número de cultivos por año. M-S= maíz-soja; T/S-M= trigo/soja de 2º-maíz; T/S-CC<sub>1</sub>/M= trigo/soja de 2º- cultivo de cobertura invernal/maíz. La estimación de la actividad biológica se realizó en base a resultados no publicados (Hass, *comunicación personal*).

#### 1.1.7. Metodologías para evaluar la estabilidad de los agregados de suelo

Diferentes metodologías han sido desarrolladas para evaluar la estabilidad de los agregados debido a diversas razones: a) existen distintos mecanismos que producen desestabilización del suelo, b) por el tipo de escala a la cual puede ser determinada, y c) por razones metodológicas (Amezketeta, 1999; Díaz-Zorita et al., 2002).

Hasta el momento no existe un consenso generalizado entre los investigadores para utilizar una misma metodología de evaluación de la estabilidad de los agregados (Díaz-Zorita et al., 2002), lo cual puede deberse a la naturaleza dinámica del proceso de agregación y a la interacción de diferentes agentes de agregación (orgánicos e inorgánicos) (Figura 1.1) durante la formación y estabilización de los agregados. Dicha situación hace dificultosa la reproducibilidad de la información para diferentes suelos y situaciones (Amezketeta, 1999).

Si bien, la mayoría de los métodos para estudiar la estabilidad de agregados están basados en el fraccionamiento de agregados de suelo por tamizado en seco o en húmedo, algunos han sido diseñados para simular el impacto de la lluvia (e.g. Yoder, 1936), mientras que otros se utilizan para discriminar mecanismos más específicos

involucrados en la desestabilización de la estructura (Le Bissonnais, 1996; Amezketa, 1999).

En este sentido, Le Bissonnais (1996) propuso una metodología para evaluar la estabilidad de los agregados que ha posibilitado reproducir con éxito en laboratorio algunos de los mecanismos de desagregación que se producen en el suelo: la disgregación por compresión del aire ocluido que origina ruptura por efecto del estallido, la desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia, la microfisuración por hinchamiento diferencial y la dispersión por procesos fisicoquímicos.

Si bien no es posible replicar las condiciones de campo en el laboratorio, la determinación de la estabilidad de los agregados bajo diferentes condiciones y por medio de diferentes metodologías puede proveer información importante sobre el comportamiento del suelo en relación a diferentes fuerzas de desagregación (Amezketa, 1999) y podría ser útil para explorar los mecanismos de estabilización de la estructura que son afectados por los cambios en el uso de la tierra en suelos contrastantes.

Existen diversos estudios que comparan los resultados de una variedad de métodos de estabilidad de agregados para evaluar cuál es el más sensible en un amplio rango de situaciones (e.g. Williams et al., 1966; Chisci et al, 1989; Pojasok y Kay, 1990; Haynes, 1993; Le Bissonnais y Arrouays, 1997). Los diferentes métodos de medición de la estabilidad de agregados estuvieron correlacionados en algunos estudios (e.g. Chisci et al, 1989; Pojasok y Kay, 1990; Le Bissonnais y Arrouays, 1997), aunque en otros no (e.g. Haynes, 1993) lo que evidencia que diferentes métodos pueden evaluar distintos mecanismos asociados a la estabilidad de los agregados de un suelo.

La comparación de diferentes métodos de estabilidad de agregados en suelos con agentes de agregación contrastantes no ha sido evaluada en profundidad, y menos aún, afectada por diferentes usos de la tierra. El conocimiento de los procesos involucrados en la consolidación estructural puede ayudar a elaborar estrategias que permitan incrementar la estabilidad de los agregados del suelo. Por otra parte, la evaluación de diferentes metodologías de estabilidad de los agregados puede ser útil para determinar cuál de ellas es más sensible a diferentes usos de la tierra en cada suelo particular y contribuir en la búsqueda de indicadores para el monitoreo de la calidad del suelo.

#### *1.1.8. La intensificación de las secuencias de cultivos como un mecanismo para incrementar la agregación y el almacenaje de COS*

Diversos estudios han reportado que las prácticas de manejo como la siembra directa, la rotación de cultivos o la intensificación de las secuencias de cultivos por el uso de cultivos dobles o cultivos de cobertura, incrementan el almacenaje de COS (Havlin et al., 1990; Peterson et al., 1998; Bronick y Lal, 2005b; Villamil et al., 2006; López-Fando y Pardo, 2011).

Se ha reportado que las secuencias de cultivos que reducen los períodos de barbecho maximizan la cantidad de COS y N secuestrado en el suelo (Sherrod et al., 2003). Luego de 4 años de ensayo, Bowman et al. (1999) observaron mayores valores de COS a 5 cm de profundidad en las secuencias que tenían cultivos continuos en comparación con las secuencias que presentaban algún período de barbecho. Por su parte, Wood et al. (1991) luego de 4 años de un ensayo en siembra directa, observaron que la reducción del período de barbecho de 16 meses (secuencia trigo/barbecho) a 9

meses (secuencia trigo/maíz/mijo (*Panicum miliaceum* L.)/barbecho) incrementó la concentración de COS y N en 0-10 cm de profundidad.

Sin embargo, la mayor parte del COS no se encuentra libre en el suelo, sino que se presenta íntimamente asociado con los agregados, incrementando su estabilidad (Mikha y Rice, 2004; Wright y Hons, 2004; Álvaro-Fuentes et al., 2009). En este sentido, existen evidencias que confirman mejoras en el estado estructural y orgánico del suelo al intensificar las secuencias de cultivos (Peterson et al., 1998; Bowman et al., 1999; Álvaro-Fuentes et al., 2008; López-Fando y Pardo, 2011), aunque surgen interrogantes acerca del impacto de la intensificación de las secuencias de cultivos sobre la consolidación de la estructura del suelo y el almacenaje de COS en agregados de suelos que difieren en su mineralogía.

#### *1.1.9. La evaluación del COS del suelo*

Los modelos diseñados para predecir la dinámica del COS separan distintos compartimentos de acuerdo a su velocidad de reciclado (Parton et al., 1987). En este sentido se separan tres compartimentos del COS: a) un compartimento activo, el cual presenta una corta vida media (i.e. meses a unos pocos años), representa la mayor parte de la actividad biológica de los suelos, y juega un rol primordial en el mantenimiento de la calidad de los suelos, b) un compartimento con un ciclado intermedio (vida media de 20 a 40 años) el cual representa el COS protegido y algunas formas químicas y biológicas resistentes a la descomposición, y c) un compartimento pasivo, integrado por componentes recalcitrantes muy resistentes a la degradación (vida media 200 a 1500 años) el cual comprende la mayor parte del COS total (Parton et al., 1987; Weil, 1992).

Debido a la elevada proporción de fracciones del COS de ciclado lento, la medición del COS total aporta relativamente poco para el estudio de los efectos en el “corto plazo” de las prácticas agronómicas (Galantini, 2008). Las fracciones de mayor labilidad del COS, sensibles a los efectos de diferentes usos de la tierra, pueden ser utilizadas como indicadores tempranos de la dirección de esos cambios (Six et al., 2002).

##### *1.1.9.1. Almacenaje de COS en diferentes tamaños de agregados de suelo*

Debido a que la dinámica de la formación de agregados influye en la transformación del COS, se ha sugerido que la calidad de éste, estaría asociada al tamaño de agregado en la que se encuentre (Beare et al., 1994a). La metodología de tamizado en húmedo (Yoder, 1936) se ha utilizado ampliamente para evaluar la estabilidad de los agregados y para separarlos y evaluar el COS y N asociado a los mismos (Beare et al., 1994b; Wright y Hons, 2004; Mikha y Rice, 2004).

Se ha encontrado que los macroagregados (>2000  $\mu\text{m}$ ) y los pequeños macroagregados (250-2000  $\mu\text{m}$ ) son más sensibles a los efectos disruptivos de las prácticas asociadas a la agricultura que los microagregados (53-250  $\mu\text{m}$ ) (Fabrizzi et al., 2003; Mikha y Rice, 2004), lo que sugiere que la evaluación del COS en diferentes tamaños de agregados (Cambardella y Elliott, 1993) puede ser de utilidad para detectar cambios tempranos asociados al uso de la tierra (Mikha y Rice, 2004).

### *1.1.9.2. Evaluación del carbono orgánico particulado en agregados de suelo*

El carbono orgánico particulado (COP), compuesto por residuos vegetales en diferentes estados de descomposición y comprendido entre 53 y 2000  $\mu\text{m}$ , fue la principal fracción de COS inicialmente perdido cuando suelos nativos fueron incorporados a la agricultura (Cambardella y Elliot, 1992). Chan (1997), trabajando en Vertisoles de Australia, observó que el COP se pierde rápidamente cuando los suelos de pasturas son cultivados.

Cambardella y Elliot (1993) observaron un incremento en el COP proveniente de residuos de trigo en macroagregados en comparación a una situación en barbecho y sugieren que la pérdida de estabilidad de los agregados de suelos cultivados es debido a pérdidas en el COP.

### *1.1.9.3. Evaluación de carbohidratos en agregados de suelo*

Como se señaló anteriormente, la actividad de las raíces y microorganismos asociados producen diferentes compuestos altamente lábiles, principalmente polisacáridos (Tisdall y Oades, 1982). La fracción de carbohidratos del COS está compuesta en gran medida por polisacáridos extracelulares producidos por los microorganismos del suelo (Roberson et al., 1991; Liu et al., 2005).

Baldock et al. (1987) proponen que un pool específico de carbohidratos está involucrado en cambios en la estabilidad de agregados que ocurren en relativamente cortos períodos de tiempo. Los carbohidratos extractables en agua caliente han sido identificados como una fracción del COS que responde rápidamente al ingreso de C por los cultivos de cobertura siendo un importante factor en la estabilización de agregados (Roberson et al., 1995; Six et al., 2006). Su evaluación en ensayos de incubaciones de cortos períodos de tiempo resultaron útiles para explicar los incrementos en la estabilidad de los agregados (Liu et al., 2005), demostrando ser un agente de agregación transitorio asociado a los macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ) (Tisdall y Oades, 1982).

## **1.2. Objetivos**

### *1.2.1. Objetivo general*

Evaluar en un Molisol y un Vertisol los mecanismos involucrados en la consolidación de la estructura y en el almacenaje de COS ante cambios en el nivel de intensificación de la secuencia de cultivos.

### *1.2.2. Objetivos específicos*

#### *1.2.2.1. Objetivo específico 1*

Evaluar el impacto del uso de la tierra, a través de diferentes índices, sobre la estabilidad de los agregados por distintos métodos y sobre el almacenaje de COS en agregados de diferentes tamaños en lotes de producción de un Molisol y un Vertisol.

#### *1.2.2.2. Objetivo específico 2*

Determinar, mediante experimentos de campo, el efecto a corto plazo de secuencias de cultivos que difieren en la intensidad, en la calidad y en la cantidad de los residuos aportados sobre la dinámica temporal de la agregación, los contenidos de COS y COP en macroagregados de un Molisol y un Vertisol.

#### *1.2.2.3. Objetivo específico 3*

Evaluar en laboratorio el efecto del aporte de residuos de diferente calidad y frecuencia de adición sobre la consolidación de la estructura del suelo, la respiración microbiana y el contenido de carbohidratos extractables en agua caliente por medio de incubaciones de un Molisol y un Vertisol.

## **1.3. Hipótesis**

### *1.3.1. Hipótesis asociadas al objetivo específico 1*

1- La relación entre los índices de uso de la tierra y las variables de estabilidad de agregados es más estrecha en el Molisol en comparación con el Vertisol debido a la mayor dependencia de agentes orgánicos de agregación.

2- El pretratamiento de humedecimiento lento por el método de estabilidad de agregados de Le Bissonnais es más adecuado que el de humedecimiento repentino o de disgregación mecánica para evaluar el uso de la tierra en el Vertisol debido a que evalúa la microfisuración por hinchamiento diferencial de las arcillas.

3- El aumento en la frecuencia de soja reduce la estabilidad de los agregados y, en consecuencia, el almacenaje de COS en macroagregados en mayor proporción en el Molisol que en el Vertisol.

### *1.3.2. Hipótesis asociadas al objetivo específico 2*

4- En el corto plazo, el incremento en el índice de intensificación por la incorporación de cultivos dobles invernales (para grano o cobertura) aumenta la proporción de

agregados  $>250 \mu\text{m}$  y el COP en esa fracción de agregados en comparación con el cultivo individual de soja.

5- Los cambios en la proporción de agregados y el COS asociado a ellos en el Molisol, son más afectados por el índice de intensificación que por la composición de la secuencia de cultivos.

### *1.3.3. Hipótesis asociadas al objetivo específico 3*

6- Independiente del tipo de suelo, a igual cantidad de residuos de cosecha adicionados al suelo, la mayor frecuencia de adición determina un incremento en la estabilidad de agregados.

7- Independientemente del tipo de suelo, los cambios en la tasa de respiración microbiana instantánea al momento de la adición de residuos están asociados en mayor medida con la estabilidad de agregados que con la respiración microbiana total.

## **1.4. Organización de la información obtenida para la presentación de los resultados**

Para evaluar el impacto de la intensificación de las secuencias de cultivos sobre la agregación y el almacenaje de COS se realizó un análisis a diferentes escalas: a) en lotes de producción; b) en experimentos de campo; y c) en laboratorio. Se espera que con esta propuesta de evaluación a diferentes escalas se logre una profundización en el conocimiento de los mecanismos involucrados en la consolidación estructural y en el almacenaje de COS en agregados de suelos Molisoles y Vertisoles ante cambios en el uso de la tierra, logrando avanzar de lo general a lo particular, y de un menor a mayor control de las variables de estudio.

Los resultados se presentarán en los siguientes 4 capítulos. En el capítulo 2, se evaluarán distintos índices de uso de la tierra y métodos de evaluación de la estabilidad de los agregados poniendo a prueba las hipótesis 1 y 2. En el capítulo 3 se abordará el impacto de la frecuencia del cultivo de soja sobre el almacenaje de COS y la agregación poniéndose a prueba la hipótesis 3.

En el capítulo 4 se evaluará la dinámica estacional de la agregación y el almacenaje de COS, afectados por el nivel de intensificación de las secuencias, poniéndose a prueba las hipótesis 4 y 5.

En el capítulo 5 se evaluará el impacto de la calidad, cantidad y frecuencia de adición de residuos sobre la agregación, a través de dos experimentos de incubaciones, los cuales permitirán poner a prueba las hipótesis 6 y 7.

Por último, en el capítulo 6, se presentarán las conclusiones generales de la tesis y el alcance de los resultados obtenidos.

## Capítulo 2

# Comparación entre índices de uso de la tierra y métodos de estabilidad de agregados en dos suelos contrastantes\*

---

\* Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Wilson, M.G., Sasal, M.C. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196, 260-267.

## 2.1. Introducción

Como resultado de la creciente demanda de productos agrícolas para la producción de alimentos y fibras, se han producido importantes cambios en el uso de la tierra en muchas áreas del mundo (Gregory et al., 2002). Particularmente, en diversas áreas de Sudamérica, los sistemas de cultivos extensivos han incrementado la proporción del área cultivada con soja (*Glycine max* [L.] Merr.), principalmente como único cultivo anual (Caviglia y Andrade, 2010; FAOSTAT, 2011). Además, se ha producido una progresiva expansión de la agricultura hacia ambientes frágiles, los cuales tradicionalmente se encontraban ocupados con ganadería o montes nativos (Paruelo et al., 2006; Baldi y Paruelo, 2008; Wilson, 2008).

Los cambios en el uso de la tierra pueden afectar fuertemente las propiedades del suelo y, en consecuencia, la productividad y sustentabilidad de los sistemas (Cambardella y Elliot, 1993; Post y Kwon, 2000). Como respuesta al impacto antrópico, se generan modificaciones en la cobertura vegetal del suelo las cuales pueden alterar muchos factores involucrados en los ciclos biogeoquímicos de elementos críticos para la nutrición de las plantas y la funcionalidad del suelo como los de C, N y P (Viglizzo et al., 2011). El monitoreo de las tendencias en las propiedades del suelo es, por lo tanto, una cuestión básica para el mantenimiento de la sustentabilidad de los sistemas, debido a los constantes y crecientes cambios en el uso de la tierra.

En el contexto actual, con elevada frecuencia de soja en las secuencias de cultivos, la intensificación surge como una alternativa promisoría para mejorar la eficiencia de uso de los recursos en los agro-ecosistemas (Caviglia et al., 2004). Se ha reportado que los sistemas que reducen los períodos de barbecho incrementan la infiltración del agua (Shaver et al., 2003), mejoran la agregación (Álvaro-Fuentes et al., 2009, Novelli et al., 2011), incrementan el almacenaje de COS (Wood et al., 1990, 1991; Shaver et al., 2003; Sherrod et al., 2003; Novelli et al., 2011, 2013), reducen el escurrimiento (Sasal et al., 2010), entre otras.

El uso de la tierra puede ser caracterizado a través de muchas maneras, siendo las más comunes aquellas que comparan un cambio de acuerdo a un uso corriente (e.g. agrícola, agrícola-ganadera, forestal, etc.) utilizando un pastizal natural o una situación no cultivada como sistema de referencia (Cambardella y Elliot, 1993; Chenu et al., 2000). También, ha habido intentos para cuantificar el cambio en el uso de la tierra y correlacionarlo con las propiedades del suelo, utilizando el tiempo transcurrido desde que surgió un cambio (e.g. años bajo agricultura, pastura, siembra directa, etc.) en comparación con un pastizal natural o una tierra no cultivada (Studdert et al., 1997; Wilson, 2008).

La selección de un índice de uso de la tierra apropiado para predecir tendencias tempranas en las propiedades del suelo es una herramienta clave para el desarrollo de sistemas agrícolas sustentables, así como también para el diseño de potenciales sistemas de monitoreo, los cuales pueden ser de mucha utilidad para el desarrollo de políticas oficiales (Viglizzo et al., 2012).

Índices que incluyan la fracción de tiempo anual con cobertura vegetal viva o la frecuencia de un cultivo particular en la secuencia de cultivos pueden ayudar a caracterizar sistemas con diferente intensidad en el uso de la tierra (Franzluebbers et al., 1994; Farahani et al., 1998; Caviglia y Andrade, 2010; Novelli et al., 2011). En este sentido, los pastizales naturales o las tierras bajo rotaciones agrícolas-ganaderas que incluyen pasturas cultivadas pueden ser caracterizadas por una elevada fracción de

tiempo anual con cobertura viva en comparación con secuencias de cultivos con elevada frecuencia de barbecho, basadas en cultivos anuales (Sasal et al., 2010). Un elevado período con cobertura vegetal viva, logrado al intensificar las secuencias de cultivos, permite un uso más intenso y eficiente de los recursos ambientales (i.e. agua y radiación solar) y un aporte frecuente de residuos vegetales en comparación con sistemas con largos períodos de barbecho.

La estabilidad de agregados es uno de los indicadores de calidad de suelo más ampliamente utilizados, debido a que es sensible para detectar cambios tempranos en las propiedades del suelo afectadas por el uso de la tierra (Arshad y Coen, 1992; Amezketa, 1999). Además, ha comenzado a seleccionarse como un indicador de calidad de suelo debido a su relación con el COS, ya que su almacenaje se encuentra estrechamente vinculado con el tamaño de agregados (Six et al., 2000a; Deneff et al., 2002; Deneff y Six, 2005; Novelli et al., 2011). En efecto, la agregación no es solo una propiedad funcional primordial del suelo sino también uno de los mecanismos más importante involucrado en el almacenaje y en la estabilización del COS (Tisdall y Oades, 1982; Six et al., 2000a, 2002; Deneff y Six, 2005).

Sin embargo, el impacto del uso de la tierra sobre la agregación puede ser bastante diferente entre suelos que difieren en sus principales agentes de agregación (Six et al., 2000a; Deneff et al., 2002; Deneff y Six, 2005; Fabrizzi et al., 2009; Novelli et al., 2011). Por otra parte, si bien la mayoría de los métodos para estudiar la estabilidad de agregados están basados en el fraccionamiento de agregados de suelo por tamizado en seco o en húmedo, algunos han sido diseñados para simular el impacto de la lluvia (e.g. Yoder, 1936) mientras que otros para discriminar mecanismos más específicos involucrados en la desestabilización de la estructura (Le Bissonnais, 1996; Amezketa, 1999).

La comparación de distintos métodos para evaluar la estabilidad de los agregados en suelos contrastantes permite explorar los diferentes mecanismos de estabilización de la estructura que son afectados por cambios en el uso de la tierra.

Mientras que el impacto del cambio de uso de la tierra sobre el COS, las propiedades físicas del suelo o la estabilidad de los agregados han sido reportados ampliamente para sistemas agrícolas (Wood et al., 1990, 1991; Peterson et al., 1998; Bowman et al., 1999; Álvaro-Fuentes et al., 2008), la relación entre la agregación y el stock de COS en suelos con diferentes agentes de agregación e intensidad en el uso de la tierra ha sido escasamente explorada considerando sistemas agrícolas e inalterados (i.e. montes nativos con pastizales naturales).

El objetivo de este capítulo fue: i) comparar el diámetro medio de los agregados por diferentes metodologías de análisis de estabilidad de agregados (tamizado en húmedo, tamizado en seco, Le Bissonnais (1996)) afectados por el uso de la tierra, y ii) evaluar diversos índices de uso de la tierra sobre la estabilidad de agregados y el stock de COS en dos suelos que difieren en sus principales agentes de agregación.

## 2.2. Materiales y Métodos

### 2.2.1. Sitio de estudio

El estudio fue conducido en dos sitios con diferente tipo de suelo en la provincia de Entre Ríos (Argentina), un Vertisol y un Molisol. La región presenta un clima templado subhúmedo, con una temperatura anual de  $\approx 18,3$  °C y precipitaciones de  $\approx 1000$  mm.

Los lotes seleccionados en el suelo Vertisol se localizaron dentro de un radio de 7 km alrededor de la localidad de Las Tunas ( $31^{\circ}51,5'$  S,  $59^{\circ}45,05'$  W). El suelo fue clasificado como Hapluderte típico, de la Serie Santiago (Plan Mapa de Suelos, 1998) perteneciente a la familia fina, esmectítica, térmica (Soil Survey Staff, 2010) (Tabla 2.1). El Molisol fue localizado dentro de un radio de 10 km alrededor de la Estación Experimental Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) ( $31^{\circ}50,9'$  S;  $60^{\circ}32,3'$  W). Este suelo fue clasificado como Argiudol ácuico de la Serie Tezanos Pinto (Plan Mapa de Suelos, 1998) perteneciente a la familia fina, mixta, térmica (Soil Survey Staff, 2010) (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1.** Descripción de las características texturales de los suelos (Plan Mapa de Suelos, 1998).

Orden	Subgrupo	Horizonte	Profundidad (cm)	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clase Textural
Molisol	Argiudol ácuico <sup>a</sup>	Ap	3-15	4,5	67,9	27,6	Franco arcillo limoso
		B21t	21-33	3,9	54,6	41,5	Arcillo limoso
Vertisol	Hapluderte típico <sup>a</sup>	A1	0-8	4,1	60,9	35	Franco arcillo limoso
		B21t	24-38	4,5	53,5	42	Arcillo limoso

<sup>a</sup> Clasificación USDA (Soil Survey Staff, 2010).

### 2.2.2. Selección de lotes

De un total de 60 lotes de producción en siembra directa se seleccionaron, para cada tipo de suelo, once lotes bajo uso agrícola o agrícola-ganadero y una situación inalterada bajo pastizal natural como referencia (Tabla 2.2).

Los lotes de producción seleccionados presentaron la misma serie y fase de erosión (erosión actual leve-h1), y utilizaron similar nivel tecnológico en lo que respecta a dosis de fertilizante, herbicidas y pesticidas. Por otro lado, para la selección de los lotes se tuvo en cuenta que representaran un rango amplio y similar de la fuente de variación a utilizar (tiempo de ocupación con cultivos o frecuencia de algún cultivo en particular).

**Tabla 2.2.** Secuencia de cultivos de suelos de once lotes de producción y una situación inalterada en un Vertisol y un Molisol de Entre Ríos, Argentina.

Año	Molisol												Vertisol												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
2002-2003		T	P	T	T	M	S	M	S	T	M	S			P	P	T	T	M	S	P	S	T	S	T
		S	M	S	S					S							S	S		S	S	S	S	S	S
2003-2004		T	S	M	M	S	M	S	M	S	S	S			P	P	M	S	S	T	T	T	T	T	S
																			S	S	Sg	S	S	S	S
2004-2005		P	T	T	S	T	T	T	T	T	S	T			P	P	TOB	T	T	M	S	S	S	M	T
			S	S		S	S	S	S	S	S	S					S	S							S
2005-2006		P	M	M	T	M	M	M	T	M	T	S			P	P	S	T	T	S	T	S	T	S	S
					S				S		S						S	S		S	S	S	S	S	
2006-2007		P	M	T	M	T	T	S	S	S	M	T			P	P	T	M	M	T	M	T	M	T	M
			S	S		S	S								S	S	S		S	M	S	S	S	S	M
2007-2008		P	T	M	M	M	M	T	M	T	S	L			T	T	M	T	T	M	T	Sg	S	S	S
		S	S					S		S	S	S			S	S		S	S		S				S

M: maíz (*Zea mays* L.); L: lino (*Linum usitatissimum* L.); TOB: trébol de olor blanco (*Melilotus albus* Medik); P: pastura (*Medicago sativa* L.); S: soja (*Glycine max* L.); Sg: sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench); T: trigo (*Triticum aestivum* L.).

### 2.2.3. Muestreo de suelo y análisis

Entre marzo y octubre de 2008 posterior a la cosecha de los cultivos estivales y antes de implantar el próximo cultivo estival, se recolectaron muestras de suelo (tres repeticiones) sin disturbar de cada lote a 0-5, 5-15 y 15-30 cm de profundidad utilizando una pala de punta. La densidad aparente del suelo en cada sitio de muestreo y para las mismas profundidades descritas anteriormente, fue determinada por el método del cilindro (Porta Casanellas et al., 1999), utilizando cilindros de 68,7 cm<sup>3</sup> (3 cm alto, 5,4 cm diámetro). El muestreo se realizó luego de un evento de lluvia para uniformizar el contenido hídrico del suelo (Villamil et al., 2006) y lo más cercano a capacidad de campo como fue posible.

Las muestras de suelo de 0-5 y 5-15 cm se desterraron manualmente con la humedad de campo por sus líneas de fracturas naturales, removiendo las raíces y restos vegetales presentes. Posteriormente, se tamizaron por 10 mm, se secaron al aire y almacenaron a temperatura ambiente hasta su análisis. Una alícuota de las muestras de las 3 profundidades seleccionadas (0-5, 5-15 y 15-30 cm) se tamizó en seco por 2 mm y se molió a 0,5 mm para determinar su contenido de C por combustión seca, utilizando un autoanalizador LECO modelo TruSpec (Leco Corp., St. Joseph, MI, USA).

Debido a que el LECO determina C total y no C orgánico, se evaluó la presencia de C mineral (CaCO<sub>3</sub>) a través de la adición de ácido clorhídrico sobre una alícuota de las muestras. En las muestras en la cual se detectó la presencia de CaCO<sub>3</sub>, se lo determinó utilizando un calcímetro para descontarlo luego del C total (Loeppert y Suarez, 1996).

En las muestras de 0-5 y 5-15 cm de profundidad, los agregados secos al aire <10 mm se tamizaron en seco por 5 minutos y se separaron en seis clases de tamaño (>5 mm, 3 a 5 mm, 2 a 3 mm, 1 a 2 mm, 0,2 a 1mm y <0,2 mm) utilizando un equipo de vibración. La suma de la fracción de masa de suelo retenido sobre cada tamiz, multiplicado por la apertura media de dos tamices adyacentes se utilizó para determinar el diámetro medio ponderado (DMP) por el método de tamizado en seco (DMP<sub>TS</sub>).

Los agregados de suelo entre 3 y 5 mm separados por tamizado en seco, se secaron a 40°C por 24 h y utilizaron para determinar la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonais (1996). Este método involucra tres pretratamientos (humedecimiento repentino, agitado luego del prehumedecimiento, y humedecimiento lento), los cuales permiten distinguir tres mecanismos de desagregación: estallido, disgregación mecánica y microfisuración (Le Bissonais, 1996; Cosentino et al., 2006).

Se utilizaron 10 g de agregados entre 3 y 5 mm para cada pretratamiento. En el pretratamiento de humedecimiento repentino, los agregados fueron inmersos en agua destilada por 10 minutos; en el pretratamiento de disgregación mecánica los agregados fueron saturados en etanol por 30 minutos y posteriormente transferidos a un erlenmeyer con agua destilada y agitados 10 veces por medio de giros completos del erlenmeyer. Por otra parte, en el pretratamiento de humedecimiento lento, los agregados se humedecieron por capilaridad en agua destilada por 60 minutos.

Los agregados de los distintos pretratamientos fueron tamizados en etanol por 50 µm. Los agregados que quedaron retenidos sobre el tamiz de 50 µm, se secaron a estufa a 40 °C por 48 h, y posteriormente se tamizaron en seco en una columna de 6 tamices (2000 µm, 1000 µm, 500 µm, 200 µm, 100 µm y 50 µm). La suma de la fracción de masa remanente sobre cada tamiz multiplicado por la apertura media de los tamices adyacentes fue utilizada para calcular el diámetro medio ponderado de los agregados

para cada pretratamiento ( $DMP_{hr}$ : humedecimiento repentino;  $DMP_{dm}$ : disgregación mecánica;  $DMP_{hl}$ : humedecimiento lento). Además, y con el objeto de obtener un valor que sintetice los resultados de los tres pretratamientos (Le Bissonnais y Arrouays, 1997; Chenu et al., 2000), se calculó el promedio de los mismos ( $DMP_{LB}$ ) y se utilizó para la comparación con el resto de los métodos de estabilidad de agregados descriptos anteriormente.

Para evaluar el DMP por tamizado en húmedo, se separaron los agregados utilizando la metodología descrita por Wright y Hons (2004) con modificaciones. Alícuotas (100 g) de las muestras agregados de 0-5 y 5-15 cm de profundidad secos al aire fueron humedecidas por capilaridad hasta capacidad de campo por 10 minutos para minimizar el estallido seguida la inmersión en agua. El suelo húmedo fue inmerso en agua sobre una columna de tamices (2000  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$  y 53  $\mu\text{m}$ ) y agitado verticalmente 6 cm 60 veces por un período de 2 min. Se obtuvieron cuatro tamaños de agregados: grandes macroagregados ( $>2000 \mu\text{m}$ ), pequeños macroagregados (250-2000  $\mu\text{m}$ ), microagregados (53-250  $\mu\text{m}$ ) y la fracción asociada a minerales ( $<53 \mu\text{m}$ ). Esta última fracción fue obtenida de la diferencia entre el peso inicial de la muestra y la suma de las tres fracciones de agregados restantes ( $>2000 \mu\text{m} + 250-2000 \mu\text{m} + 53-250 \mu\text{m}$ ).

De manera similar a los otros métodos y para su posterior comparación, se calculó el diámetro medio ponderado de los agregados por tamizado en húmedo ( $DMP_{TH}$ ) como la suma de la fracción de masa de suelo remanente sobre cada tamiz luego del tamizado, multiplicado por la apertura media de los tamices adyacentes.

#### 2.2.4. Cálculos

##### 2.2.4.1. Índices de uso de la tierra

Mediante entrevistas con los productores y propietarios de los lotes seleccionados, se recabó información de las rotaciones que presentaron los sitios de muestreos durante un período de 6 años previos al momento de muestreo de suelo. Con dicha información se calcularon diferentes índices (Tabla 2.3) basados en: i) número de cultivos por año, el cual fue identificado como IIS (índice de intensificación de las secuencias de cultivos en base anual) (Farahani et al., 1998), ii) número de meses con cobertura vegetal viva en relación al número total de meses (Sasal et al., 2010) en un período de 6 años, el cual fue identificado como  $IIS_m$  (índice de intensificación de las secuencias de cultivos en base mensual); iii) el número de meses con soja (ICS), trigo (*Triticum aestivum* L.) (ICT), cereales- incluido maíz (*Zea mays* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) y trigo (ICC) y pasturas (ICP) en relación al número total de meses en un período de 6 años, y, iv) la frecuencia de un cultivo dado, basado en el número de meses cultivados con soja (FCS, Novelli et al., 2011), trigo (FCT), cereales (FCC) incluidos trigo, maíz y sorgo o pastura (FCP) en relación al número total de meses con cultivos para los 6 años previos al muestreo (Tabla 2.3).

Para el cálculo de estos índices, se utilizó un promedio anual de uso de la tierra de 6 meses para el maíz y trigo, y 5 meses para soja. En algunos casos, otros cultivos como trébol de olor blanco (*Melilotus albus* Medik), sorgo, o lino (*Linum usitatissimum* L.) estuvieron presentes dentro de las secuencias de cultivos (Tabla 2.2). Para el trébol de olor blanco se utilizó un promedio anual de uso de la tierra de 8 meses, 5 meses para sorgo y 5,5 meses para lino. Para el sitio inalterado (bajo monte nativo) o durante el período con alfalfa (*Medicago sativa* L.) en la rotación agrícola-ganadera, se utilizó un período de uso de la tierra de 12 meses.

**Tabla 2.3.** Índices de uso de la tierra para once sitios cultivados y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Suelo	Sitios	Índices de uso de la tierra									
		IIS	IIS <sub>m</sub>	ICS	ICT	ICC	ICP	FCS	FCT	FCC	FCP
Molisol	1	2	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	2	1,83	0,88	0,14	0,17	0,17	0,57	0,16	0,19	0,19	0,65
	3	1,50	0,67	0,14	0,17	0,42	0	0,21	0,25	0,63	0
	4	1,50	0,71	0,21	0,25	0,50	0	0,30	0,35	0,70	0
	5	1,33	0,63	0,21	0,17	0,42	0	0,33	0,27	0,67	0
	6	1,33	0,63	0,21	0,17	0,42	0	0,33	0,27	0,67	0
	7	1,33	0,63	0,21	0,17	0,42	0	0,33	0,27	0,67	0
	8	1,33	0,61	0,28	0,17	0,33	0	0,46	0,28	0,54	0
	9	1,33	0,61	0,28	0,17	0,33	0	0,46	0,28	0,54	0
	10	1,50	0,68	0,35	0,25	0,33	0	0,51	0,37	0,49	0
	11	1,17	0,57	0,32	0,08	0,25	0	0,56	0,14	0,44	0
	12	1,33	0,62	0,38	0,17	0,17	0	0,61	0,27	0,27	0
Vertisol	13	2	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	14	2	0,97	0,07	0,08	0,08	0,82	0,07	0,08	0,08	0,84
	15	2	0,96	0,14	0,08	0,08	0,74	0,15	0,08	0,08	0,77
	16	1,33	0,65	0,21	0,17	0,33	0	0,32	0,26	0,51	0
	17	1,67	0,76	0,28	0,33	0,42	0	0,37	0,43	0,55	0
	18	1,5	0,69	0,28	0,25	0,42	0	0,41	0,36	0,61	0
	19	1,33	0,61	0,28	0,17	0,33	0	0,46	0,28	0,54	0
	20	1,67	0,75	0,35	0,25	0,33	0,07	0,47	0,33	0,44	0,09
	21	1,33	0,58	0,28	0,17	0,31	0	0,48	0,29	0,53	0
	22	1,50	0,68	0,35	0,25	0,33	0	0,51	0,37	0,49	0
	23	1,33	0,60	0,35	0,17	0,33	0	0,58	0,28	0,55	0
	24	1,33	0,61	0,36	0,17	0,25	0	0,59	0,28	0,41	0

IIS= índice de intensificación de la secuencia (cultivos por año); IIS<sub>m</sub>= índice de intensificación de la secuencia (meses con cultivos en relación a los meses de la secuencia); ICS= índice del cultivo de soja; ICT= índice del cultivo de trigo; ICC= índice de cultivos cereales; ICP= índice de pasturas; FCS= frecuencia del cultivo de soja; FCT= frecuencia del cultivo de trigo; FCC= frecuencia de cultivos cereales; FCP= frecuencia de pasturas. Los índices fueron calculados utilizando la fracción de tiempo anual con cobertura vegetal viva en un período de 6 años previos al período del muestreo de suelos (2002-2008).

#### 2.2.4.2. Carbono orgánico en masa de suelo equivalente

Para cuantificar el stock de COS a cada profundidad y a 0-15 cm y 0-30 cm, los valores de stock fueron corregidos a masa de suelo equivalente (Lee et al., 2009), utilizando la situación inalterada en cada tipo de suelo como sistema de referencia. Para ello, se utilizó la siguiente ecuación:

$$C_{equiv(0-5cm)} = (M_{i(0-5cm)} - M_{i,add(0-5cm)}) * \%C_{(0-5cm)} \quad (II-1)$$

$$C_{equiv(5-15cm)} = (M_{i,add(0-5cm)} * \%C_{(0-5cm)}) + ((M_{i(5-15cm)} - (M_{i,add(5-15cm)} + M_{i,add(0-5cm)})) * \%C_{(5-15cm)}) \quad (II-2)$$

$$C_{equiv(15-30cm)} = (M_{i,add(5-15cm)} * \%C_{(5-15cm)}) + ((M_{i(15-30cm)} - (M_{i,add(15-30cm)} + M_{i,add(5-15cm)})) * \%C_{(15-30cm)}) \quad (II-3)$$

$$C_{equiv(0-15cm)} = (II-1) + (II-2)$$

$$C_{equiv(0-30cm)} = (II-1) + (II-2) + (II-3)$$

donde  $C_{equiv}$  es el C en masa equivalente ( $Mg\ ha^{-1}$ ),  $M_i$  es la masa de suelo seca para cada capa ( $Mg\ ha^{-1}$ ), obtenida del producto del espesor de la capa (m), la densidad aparente del suelo ( $Mg\ m^{-3}$ ) y un factor de conversión  $10^4$  ( $m^2\ ha^{-1}$ ), y  $M_{i,add}$  es la diferencia entre  $M_i$  y la masa en el sistema de referencia.

Los stocks de COS fueron recalculados en masa de suelo equivalente debido a que la situación inalterada (seleccionado como sistema de referencia) presentó la densidad más baja en comparación con los sitios bajo agricultura. En efecto, las densidades aparentes de las situaciones inalteradas fueron  $1,05\ Mg\ m^{-3}$  (0-5 cm),  $1,25\ Mg\ m^{-3}$  (5-15 cm) y  $1,32\ Mg\ m^{-3}$  (15-30 cm) para el Molisol, y  $1,09\ Mg\ m^{-3}$  (0-5 cm),  $1,06\ Mg\ m^{-3}$  (5-15 cm) y  $1,11\ Mg\ m^{-3}$  (15-30 cm) para el Vertisol, mientras que para las situaciones cultivadas fueron, en promedio  $1,14\ Mg\ m^{-3}$  (0-5 cm),  $1,37\ Mg\ m^{-3}$  (5-15 cm) y  $1,34\ Mg\ m^{-3}$  (15-30 cm) para el Molisol, y  $1,17\ Mg\ m^{-3}$  (0-5 cm),  $1,28\ Mg\ m^{-3}$  (5-15 cm) y  $1,20\ Mg\ m^{-3}$  (15-30 cm) para el Vertisol.

#### 2.2.5. Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de correlación y de regresión entre los distintos índices de uso de la tierra, concentración y stock de COS, y la estabilidad de agregados considerando todos los usos de la tierra y aquéllas con uso agrícola continuo. Para evaluar las diferencias entre suelos y entre las situaciones agrícolas y las inalteradas se realizaron test de t. Para poder comparar los promedios de los DMP's dentro de cada suelo y profundidad se realizó el test no paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P < 0,05$ ). Por último, para poder sintetizar la información y analizar la sensibilidad de diferentes índices de uso de la tierra, se realizó un análisis de conglomerados con los DMP's de los tres métodos evaluados (tamizado en seco, tamizado en húmedo y Le Bissonnais). Como resultado se construyó un dendrograma con el método de encadenamiento promedio utilizando la distancia Euclídea.

Todos los análisis se realizaron utilizando el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2011).

## 2.3. Resultados

### 2.3.1. Stock de carbono orgánico del suelo

Los valores de stock de COS fueron similares entre suelos en 0-5 cm de profundidad en las situaciones inalteradas (sitios 1 y 13) ( $C_{\text{equiv 0-5 cm}}$ , ca. 30  $\text{Mg ha}^{-1}$ ). Sin embargo, en profundidad, el stock de COS ( $C_{\text{equiv5-15cm}}$ ,  $C_{\text{equiv0-15cm}}$  y  $C_{\text{equiv0-30cm}}$ ) fue 44, 22 y 36 % más alto en el Vertisol que en el Molisol (Tabla 2.4).

En los lotes bajo uso agrícola,  $C_{\text{equiv0-5cm}}$  y  $C_{\text{equiv0-30cm}}$  presentaron rangos de 10,4 a 16,1  $\text{Mg ha}^{-1}$  y de 55,2 a 75,7  $\text{Mg ha}^{-1}$  respectivamente en el Molisol, mientras que en el Vertisol  $C_{\text{equiv0-5cm}}$  y  $C_{\text{equiv0-30cm}}$  presentaron rangos de 14,8 a 24,4  $\text{Mg ha}^{-1}$  y de 57,3 a 84,7  $\text{Mg ha}^{-1}$  respectivamente (Tabla 2.4).

**Tabla 2.4.** Stock de carbono orgánico del suelo en masa equivalente ( $C_{\text{equiv}}$ ) para once sitios cultivados y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Suelo	Sitio	$C_{\text{equiv}}$ ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )			
		0-5 cm	5-15 cm	0-15 cm	0-30 cm
Molisol	1	29,6 ± 1,6 <sup>a</sup>	28,4 ± 4,3	58,0 ± 4,9	92,8 ± 13,4
	2	16,1 ± 0,6	25,4 ± 1,1	41,5 ± 0,7	75,7 ± 1,5
	3	12,5 ± 0,7	23,9 ± 2,7	36,3 ± 3,0	63,5 ± 8,3
	4	15,1 ± 1,3	25,3 ± 1,7	40,4 ± 0,4	71,6 ± 3,1
	5	12,4 ± 0,5	22,3 ± 4,6	34,7 ± 5,0	64,9 ± 5,8
	6	14,5 ± 2,7	21,2 ± 0,6	34,3 ± 3,0	62,1 ± 3,7
	7	16,1 ± 1,2	27,2 ± 0,7	43,3 ± 2,9	73,6 ± 2,9
	8	10,7 ± 0,5	21,9 ± 2,3	32,7 ± 2,4	63,2 ± 5,5
	9	14,3 ± 0,5	27,2 ± 0,6	41,4 ± 0,4	72,5 ± 2,7
	10	10,4 ± 0,6	20,2 ± 0,7	30,5 ± 1,1	55,2 ± 1,0
	11	12,6 ± 0,4	21,8 ± 3,5	34,4 ± 3,8	64,5 ± 8,1
	12	11,5 ± 0,8	23,7 ± 0,8	35,3 ± 2,9	66,5 ± 4,5
	Media	14,5	24,0	38,6	68,8
	EE <sup>b</sup>	0,8	0,6	1,3	1,7
Vertisol	13	29,7 ± 9,6	40,9 ± 7,9	70,6 ± 15,6	126,1 ± 18,0
	14	19,7 ± 0,7	25,7 ± 4,0	45,4 ± 3,6	84,7 ± 3,5
	15	17,1 ± 0,9	24,5 ± 5,4	41,5 ± 5,9	74,8 ± 7,0
	16	15,7 ± 2,3	21,3 ± 4,4	37,1 ± 4,0	59,8 ± 6,1
	17	16,2 ± 2,9	23,4 ± 7,2	39,6 ± 6,7	66,4 ± 13,5
	18	24,4 ± 3,0	26,9 ± 6,6	51,3 ± 8,1	82,5 ± 8,1
	19	14,8 ± 1,4	19,5 ± 2,1	34,3 ± 1,2	59,6 ± 5,2
	20	15,5 ± 1,4	19,5 ± 3,8	35,1 ± 4,4	57,3 ± 10,8
	21	18,2 ± 2,6	27,2 ± 5,1	45,3 ± 2,5	76,3 ± 4,5
	22	16,8 ± 2,6	23,2 ± 5,2	40,0 ± 6,2	68,8 ± 11,7
	23	15,7 ± 0,3	26,9 ± 4,8	42,7 ± 4,9	78,6 ± 7,3
	24	15,6 ± 1,7	26,0 ± 4,8	41,6 ± 4,3	79,2 ± 10,0
	Media	18,3	25,4	43,7	76,2
	EE <sup>a</sup>	0,9	1,2	1,8	3,2

<sup>a</sup>Desvío estándar de la media para cada sitio (n=3). <sup>b</sup>EE: Error estándar de la media para cada suelo (n=36).  $C_{\text{equiv}}$  fue calculado utilizando la situación inalterada de cada tipo de suelo como sistema de referencia.

En las situaciones inalteradas de ambos suelos, los stocks de COS ( $C_{\text{equiv0-30cm}}$ ) fueron diferentes de aquéllas bajo uso agrícola (Molisol:  $P<0,01$ ; Vertisol:  $P<0,001$ ) (Tabla 2.4).

### 2.3.2. Relación entre los índices de uso de la tierra y el stock de COS

El stock de COS ( $C_{\text{equiv}0-5\text{cm}}$ ,  $C_{\text{equiv}0-15\text{cm}}$  y  $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$ ) en el Molisol se relacionó positivamente con el índice de intensificación de las secuencias ya sea como cultivos por año ( $\text{IIS}-P<0,01$ ) o como meses con cultivos ( $\text{IIS}_m-P<0,01$ ), pero no sucedió lo mismo en el Vertisol (Tabla 2.5). Además, se detectó una relación positiva entre el stock de COS ( $C_{\text{equiv}0-5\text{cm}}$ ,  $C_{\text{equiv}0-15\text{cm}}$  y  $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$ ) y los índices ICP y FCP en ambos suelos, aunque la relación fue más estrecha en el Molisol (Tabla 2.5).

Por otra parte, los stocks de COS, principalmente  $C_{\text{equiv}0-5\text{cm}}$  y  $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$  se relacionaron negativamente con los índices ICS, ICT, ICC, FCS, FCT y FCC en el Molisol (Tabla 2.5). En el Vertisol, por su parte, el stock de COS ( $C_{\text{equiv}0-5\text{cm}}$ ) se relacionó negativamente sólo con los índices ICS y FCS, mientras que al considerar el total de las profundidades ( $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$ ) se detectó una relación negativa con los índices que incluyeron al trigo y demás cereales (i.e. ICT, FCT, ICC, FCC) (Tabla 2.5).

Sin embargo, estas relaciones son debidas principalmente a las diferencias entre la situación inalterada y las agrícolas más que a la composición de las secuencias. Considerando sólo las tierras bajo uso agrícola no se observaron diferencias significativas en el stock de COS para ninguno de los suelos ni profundidades analizadas (datos no presentados). A pesar de que en ambos suelos no se registraron diferencias significativas en el stock de COS por el uso de la tierra entre las situaciones en uso agrícola, los valores más bajos de stock de COS se detectaron en los sitios que presentaron un bajo  $\text{IIS}_m$  y alta FCS (Tabla 2.5).

**Tabla 2.5.** Coeficientes de correlación (r) de las relaciones entre los índices de uso de la tierra y el stock de COS en masa equivalente ( $C_{equiv}$ ) para once sitios cultivados y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Suelo	Variables	Stock de COS ( $Mg\ ha^{-1}$ )			
		$C_{equiv0-5cm}$	$C_{equiv5-15cm}$	$C_{equiv0-15cm}$	$C_{equiv0-30cm}$
Molisol	IIS	0,76 **	0,50 NS	0,72 **	0,70 *
	IIS <sub>m</sub>	0,83 ***	0,53 NS	0,78 **	0,77 **
	ICS	-0,81 **	-0,58 *	-0,77 **	-0,73 **
	ICT	-0,71 **	-0,38 NS	-0,64 *	-0,65 *
	ICC	-0,59 *	-0,32 NS	-0,54 NS	-0,59 *
	ICP	0,88 ***	0,55 NS	0,82 **	0,83 ***
	FCS	-0,77 **	-0,55 NS	-0,74 **	-0,70 *
	FCT	-0,78 **	-0,44 NS	-0,71 **	-0,73 **
	FCC	-0,61 *	-0,36 NS	-0,57 NS	-0,62 *
	FCP	0,86 ***	0,54 NS	0,81 **	0,82 **
	Vertisol	IIS	0,50 NS	0,41 NS	0,47 NS
IIS <sub>m</sub>		0,55 NS	0,46 NS	0,52 NS	0,56 NS
ICS		-0,66 *	-0,60 *	-0,65 *	-0,67 *
ICT		-0,48 NS	-0,62 *	-0,58 *	-0,68 *
ICC		-0,48 NS	-0,60 *	-0,56 NS	-0,68 *
ICP		0,61 *	0,61 *	0,63 *	0,70 *
FCS		-0,62 *	-0,51 NS	-0,58 *	-0,58 *
FCT		-0,51 NS	-0,59 *	-0,58 NS	-0,67 *
FCC		-0,48 NS	-0,54 NS	-0,56 NS	-0,63 *
FCP		0,59 *	0,60 *	0,62 *	0,69 *

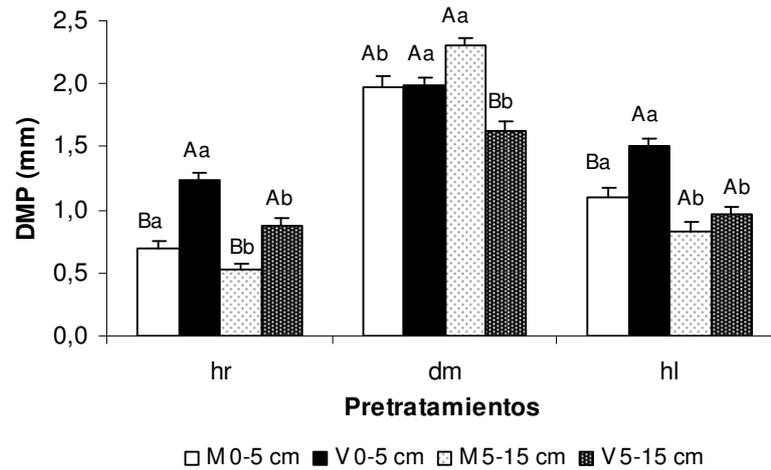
NS, \*, \*\*, \*\*\* indica no significativo,  $P<0,05$ ,  $P<0,01$ ,  $P<0,001$ , respectivamente. IIS= índice de intensificación de la secuencia (cultivos por año); IIS<sub>m</sub>= índice de intensificación de la secuencia (meses con cultivos en relación a los meses de la secuencia); ICS= índice del cultivo de soja; ICT= índice del cultivo de trigo; ICC= índice de cultivos cereales; ICP= índice de pasturas; FCS= frecuencia del cultivo de soja; FCT= frecuencia del cultivo de trigo; FCC= frecuencia de cultivos cereales; FCP= frecuencia de pasturas. Los índices se calcularon utilizando la fracción de tiempo anual con cobertura viva durante los 6 años previos al muestreo de suelos (2002-2008).  $C_{equiv}$  fue calculado utilizando la situación inalterada de cada tipo de suelo como sistema de referencia.

### 2.3.3. Estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais (1996).

Los DMP's de los agregados por la metodología de Le Bissonnais (1996) fueron diferentes entre pretratamientos y suelos evaluados. Promediando todas las situaciones de manejo para cada suelo, el DMP<sub>hr</sub> y el DMP<sub>hl</sub> fueron 72 y 28% mayores en el Vertisol que en el Molisol. En contraste, el DMP<sub>dm</sub> fue mayor en el Molisol (16%) (Figura 2.1, Tabla A.1).

En ambos suelos, los DMP's a 0-5 cm para los diferentes pretratamientos fueron mayores que a 5-15 cm ( $P<0,001$ ), excepto en el pretratamiento de disgregación mecánica en el Molisol en que el DMP<sub>dm</sub> a 5-15 cm fue mayor que a 0-5 cm ( $P<0,001$ ) (Figura 2.1).

En el Molisol, el mayor DMP fue detectado con el pretratamiento de disgregación mecánica, mientras que el pretratamiento de humedecimiento repentino fue el más agresivo, con los menores valores de DMP (Figura 2.1). En este suelo, el sitio que incluyó pastura en la rotación (sitio 2) (Tabla 2.2) presentó un DMP tan alto como en la situación inalterada (Tabla A.1). De manera similar a lo registrado en el Molisol, el pretratamiento de disgregación mecánica presentó los mayores DMP en comparación con el resto de los pretratamientos en el Vertisol (Figura 2.1, Tabla A.1).



**Figura 2.1.** Diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados por los tres pretratamientos de estabilidad de los agregados. hr: humedecimiento repentino; dm: disgregación mecánica; hl: humedecimiento lento. Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la media para cada suelo y profundidad (n=36). Letras diferentes sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05). Mayúsculas: entre suelos para una misma profundidad y pretratamiento de estabilidad de agregados. Minúsculas: entre profundidades para un mismo suelo y pretratamiento de estabilidad de agregados.

La proporción de agregados  $>2000 \mu\text{m}$  para cada pretratamiento de estabilidad de agregados registraron un comportamiento similar al detectado con los DMP's (Tabla A.2.). En ambos suelos, el DMP y la proporción de agregados  $>2000 \mu\text{m}$  decreció secuencialmente como sigue: disgregación mecánica  $>$  humedecimiento lento  $>$  humedecimiento repentino (Tabla A.1 y A.2).

#### 2.3.4. Relación entre los índices de uso y la estabilidad de agregados por *Le Bissonnais*

Los DMP's y la proporción de agregados  $>2000 \mu\text{m}$  se relacionaron positivamente con los índices IIS, IIS<sub>m</sub>, ICP, FCP en el Molisol para las dos profundidades consideradas, principalmente con los pretratamientos de humedecimiento repentino y humedecimiento lento (Tabla 2.6; Tabla A.3). En el Vertisol, sólo se detectó una relación positiva entre la estabilidad de agregados y los índices IIS<sub>m</sub>, ICP y FCP con el pretratamiento de humedecimiento lento a 5-15 cm (Tabla 2.6). La inclusión frecuente del cultivo de soja (ICS y FCS) se asoció de manera negativa con la estabilidad de los agregados en ambas profundidades del Molisol, principalmente con los pretratamientos de humedecimiento repentino y lento (Tabla 2.6; Tabla A.3). En el Vertisol, el impacto de la inclusión frecuente del cultivo de soja fue imperceptible utilizando estos índices, detectándose sólo una relación negativa con el pretratamiento de humedecimiento lento a 5-15 cm de profundidad (Tabla 2.6 y Tabla A.3).

En el Molisol, considerando todas las tierras bajo uso agrícola con excepción de la situación con pastura cultivada, no se detectaron diferencias entre los índices de uso de la tierra evaluados y la estabilidad de agregados por ningún pretratamiento. En el Vertisol, hubo una pobre y negativa relación ( $P < 0,05$ ) entre la FCC y el DMP<sub>hr</sub> y el DMP<sub>dm</sub> a 5-15 cm (datos no presentados). Estos resultados reflejan la fuerte influencia de la situación inalterada o los sitios con rotación agrícola-ganadera en el promedio de los datos.

**Tabla 2.6.** Coeficientes de correlación (r) de la relación entre los índices de uso de la tierra y el diámetro medio ponderado (DMP) por la metodología de Le Bissonnais (1996) a 0-5 y 5-15 cm de profundidad para once sitios agrícolas y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

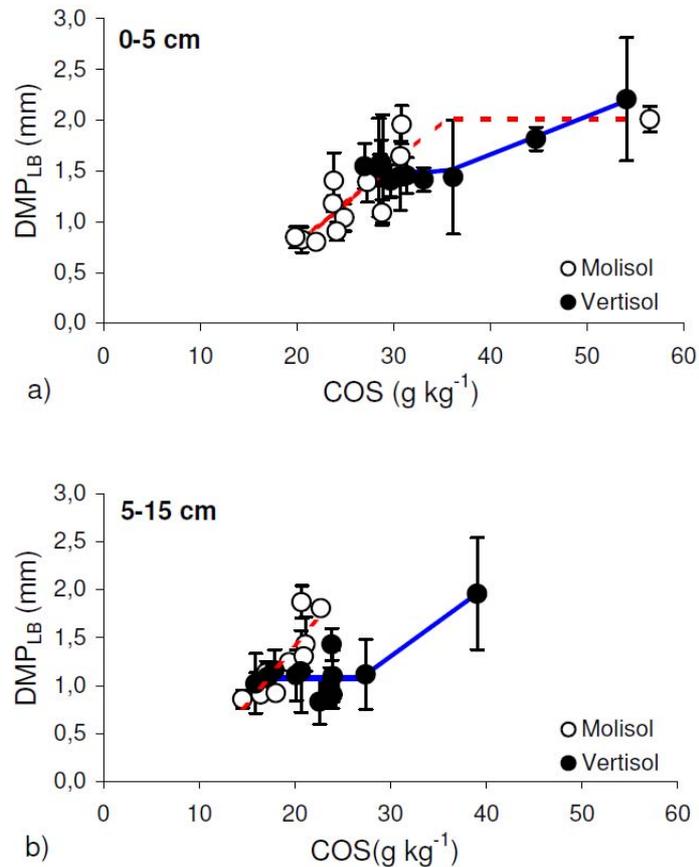
Suelo	Profundidad	DMP	Índices de uso de la tierra									
			IIS	IIS <sub>m</sub>	ICS	ICT	ICC	ICP	FCS	FCT	FCC	FCP
Molisol	0-5 cm	hr	0,80 **	0,81 **	-0,79 **	-0,46 NS	-0,51 NS	0,82 **	-0,81 **	-0,62 *	-0,57 NS	0,84 ***
		dm	0,66 *	0,68 *	-0,84 ***	-0,41 NS	-0,23 NS	0,66 *	-0,84 ***	-0,52 NS	-0,28 NS	0,66 *
		hl	0,76 **	0,78 **	-0,78 **	-0,46 NS	-0,48 NS	0,79 **	-0,80 **	-0,61 *	-0,53 NS	0,80 **
	5-15 cm	hr	0,81 **	0,84 ***	-0,68 *	-0,45 NS	-0,61 *	0,86 ***	-0,71 **	-0,64 *	-0,68 *	0,88 ***
		dm	0,48 NS	0,56 NS	-0,64 *	-0,43 NS	-0,26 NS	0,59 *	-0,61 *	-0,51 NS	-0,30 NS	0,59 *
		hl	0,82 **	0,86 ***	-0,73 **	-0,47 NS	-0,58 *	0,87 ***	-0,76 **	-0,66 *	-0,66 *	0,89 ***
Vertisol	0-5 cm	hr	0,35 NS	0,42 NS	-0,57 NS	-0,56 NS	-0,47 NS	0,53 NS	-0,51 NS	-0,54 NS	-0,44 NS	0,52 NS
		dm	0,07 NS	0,15 NS	-0,33 NS	-0,33 NS	-0,19 NS	0,24 NS	-0,25 NS	-0,27 NS	-0,15 NS	0,22 NS
		hl	0,36 NS	0,45 NS	-0,54 NS	-0,48 NS	-0,45 NS	0,50 NS	-0,50 NS	-0,49 NS	-0,44 NS	0,49 NS
	5-15 cm	hr	0,31 NS	0,37 NS	-0,55 NS	-0,33 NS	-0,26 NS	0,41 NS	-0,50 NS	-0,33 NS	-0,26 NS	0,39 NS
		dm	0,08 NS	0,15 NS	-0,38 NS	-0,12 NS	-0,05 NS	0,16 NS	-0,32 NS	-0,09 NS	-0,04 NS	0,15 NS
		hl	0,52 NS	0,58 *	-0,70 *	-0,52 NS	-0,53 NS	0,64 *	-0,66 *	-0,55 NS	-0,54 NS	0,62 *

NS, \*, \*\*, \*\*\* indica no significativo,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente. hr= pretratamiento de humedecimiento repentino; dm= pretratamiento de disgregación mecánica; hl= pretratamiento de humedecimiento lento. IIS= índice de intensificación de la secuencia (cultivos por año); IIS<sub>m</sub>= índice de intensificación de la secuencia (meses con cultivos en relación a los meses de la secuencia); ICS= índice del cultivo de soja; ICT= índice del cultivo de trigo; ICC= índice de cultivos cereales; ICP= índice de pasturas; FCS= frecuencia del cultivo de soja; FCT= frecuencia del cultivo de trigo; FCC= frecuencia de cultivos cereales; FCP= frecuencia de pasturas. Los índices fueron calculados utilizando la fracción de tiempo anual con cobertura vegetal viva en un periodo de 6 años previos al periodo del muestreo de suelos (2002-2008).

### 2.3.5. Estabilidad de agregados por Le Bissonnais y su relación con la concentración de COS total

En el Molisol, el máximo valor de DMP por la metodología propuesta por Le Bissonnais (1996) fue encontrado con valores de concentración de COS de ca. 30 y 20 g C kg<sup>-1</sup>, a 0-5 y 5-15 cm de profundidad respectivamente (Figura 2.2 a y b). En este suelo, considerando ambas profundidades, el DMP estuvo estrecha y positivamente relacionado con la concentración de COS hasta 30 g C kg<sup>-1</sup>, principalmente con el pretratamiento de disgregación mecánica (Figura 2.2; Figura A.1).

En el Vertisol, el máximo valor de DMP, coincidente con la situación inalterada, fue encontrado con valores de concentración de COS de 50 y 40 g C kg<sup>-1</sup> a 0-5 y 5-15 cm de profundidad, respectivamente (Figura 2.2 a y b). Sin embargo, y a diferencia del Molisol, la estabilidad de agregados en el Vertisol no se incrementó en un rango de concentración de COS de 25 a 35 g C kg<sup>-1</sup>, el cual incluyó todos lotes en uso agrícola (Figura 2.2 a y b).



**Figura 2.2.** Diámetro medio ponderado promedio de tres pretratamientos de estabilidad de agregados ( $DMP_{LB}$ ) afectado por la concentración de carbono orgánico del suelo (COS), a) en 0-5 cm de profundidad, y b) en 5-15 cm de profundidad. Los círculos vacíos representan el Molisol. Los círculos llenos representan el Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de la media para cada sitio ( $n=3$ ). Molisol 0-5 cm (Línea roja discontinua:  $y = -0,84 + 0,08 * COS$  si  $COS < 35,34$ ;  $y = 2,01$  si  $COS > 35,34$ ;  $R^2=0,59$ ,  $P<0,01$ ). Molisol 5-15 cm (Línea roja discontinua:  $y = -0,89 + 0,11 * COS$ ;  $R^2=0,74$ ,  $P<0,001$ ). Vertisol 0-5 cm (Línea azul continua:  $y = 1,51$  si  $COS < 36$ ;  $y = 0,16 + 0,04 * COS$  si  $COS > 36$ ;  $R^2=0,74$ ,  $P<0,001$ ). Vertisol 5-15 cm (Línea azul continua:  $y = 1,08$  si  $COS < 26,86$ ;  $y = -0,87 + 0,07 * COS$  si  $COS > 26,86$ ;  $R^2=0,52$ ,  $P<0,01$ ).

### *2.3.6. Comparación del diámetro medio ponderado de agregados obtenidos por tres métodos diferentes de estabilidad*

El DMP por tamizado en seco ( $DMP_{TS}$ ) o en húmedo ( $DMP_{TH}$ ), así como también el obtenido con el promedio de los pretratamientos del método de Le Bissonnais (1996) ( $DMP_{LB}$ ), difirieron entre los diferentes sitios en el Molisol, para ambas profundidades evaluadas (Tabla 2.7). En el Vertisol, en contraste, sólo el  $DMP_{TH}$  a 5-15 cm difirió entre sitios muestreados.

En el Molisol a 0-5 cm, las diferencias entre los sitios de muestreo fueron mejor reflejadas por el  $DMP_{TS}$ , que por el  $DMP_{TH}$  y por el  $DMP_{LB}$  como indica la separación de las medias (Tabla 2.7). A 5-15 cm, las diferencias entre los sitios de muestreo fueron mayores para  $DMP_{TH}$  que para  $DMP_{TS}$  y  $DMP_{LB}$ .

El  $DMP_{TH}$  a 0-5 cm de profundidad presentó valores de 1,1 mm-3,0 mm, y de 1,9 mm-3,1 mm en el Molisol y en el Vertisol, respectivamente. Por otro lado, en 5-15 cm el  $DMP_{TH}$  presentó un rango de 1,0 mm-3,1 mm y de 1,1 mm-2,7 mm en el Molisol y en el Vertisol, respectivamente (Tabla 2.7).

El  $DMP_{TS}$  presentó un rango de 1,8 mm a 3,9 mm a 0-5 cm de profundidad en el Molisol, mientras que en el Vertisol presentó un rango de 2,1 mm a 3,9 mm. En 5-15 cm el  $DMP_{TS}$  presentó un rango de 2,5 mm a 4,1 mm y de 3,3 mm-4,9 mm en el Molisol y Vertisol, respectivamente (Tabla 2.7).

El  $DMP_{LB}$  presentó un rango de 0,8 mm a 2,0 mm a 0-5 cm de profundidad en el Molisol, mientras que en el Vertisol presentó un rango de 1,4 mm a 2,2 mm. En 5-15 cm de profundidad el  $DMP_{LB}$  dio como resultado un rango similar entre suelos (0,9 mm a 1,9 mm en el Molisol; 0,8 mm a 2,0 mm en el Vertisol) (Tabla 2.7).

**Tabla 2.7.** Diámetro medio ponderado de tres métodos de determinación de estabilidad de agregados (tamizado en húmedo, tamizado en seco y Le Bissonnais (1996)) a 0-5 y 5-15 cm de profundidad para once sitios agrícolas y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Suelo	Sitios	Diámetro medio ponderado (mm)								
		0-5 cm			5-15 cm					
		Tamizado húmedo	Tamizado seco	Le Bissonnais	Tamizado húmedo	Tamizado seco	Le Bissonnais			
Molisol	1	2,96 e	3,85 f	2,01 d	1,64 cdef	4,00 cd	1,81 cd			
	2	2,72 de	2,62 cdef	1,96 d	3,06 f	3,26 abcd	1,87 d			
	3	2,64 de	2,90 ef	1,40 bcd	1,78 def	3,53 bcd	1,06 ab			
	4	1,71 abcd	2,49 abc	1,09 abcd	1,13 abc	3,07 abc	1,24 bcd			
	5	2,01 bcde	2,97 def	1,18 abcd	1,00 ab	4,14 d	1,13 abc			
	6	1,32 ab	2,32 abcde	1,04 abc	1,21 abcd	3,44 bcd	1,01 ab			
	7	2,20 cde	2,42 abcdef	1,64 cd	1,95 ef	3,20 abcd	1,43 bcd			
	8	1,39 abc	1,90 ab	0,82 a	0,99 a	2,97 ab	0,91 a			
	9	1,84 abcde	2,14 abcd	1,39 bcd	1,43 abcdef	2,73 ab	1,30 bcd			
	10	1,38 abc	2,53 bcdef	0,85 a	1,25 abcde	3,41 abcd	0,86 a			
	11	1,14 a	1,88 abc	0,90 ab	1,53 bcdef	2,91 ab	1,13 abcd			
	12	1,47 abc	1,82 a	0,80 a	0,96 a	2,49 a	0,92 a			
Vertisol	13	2,35 a	2,12 a	2,21 a	2,46 cd	3,29 a	1,96 a			
	14	2,49 a	3,11 a	1,44 a	2,51 cd	4,23 a	1,12 a			
	15	3,08 a	3,57 a	1,45 a	1,27 ab	4,44 a	0,83 a			
	16	2,53 a	3,15 a	1,58 a	1,96 bcd	4,79 a	1,16 a			
	17	2,17 a	3,20 a	1,40 a	2,68 d	4,06 a	1,15 a			
	18	2,51 a	3,19 a	1,81 a	2,11 bcd	4,41 a	1,43 a			
	19	2,74 a	3,51 a	1,55 a	1,58 abc	4,62 a	1,09 a			
	20	2,29 a	3,91 a	1,53 a	1,06 a	4,15 a	1,02 a			
	21	2,41 a	3,57 a	1,41 a	2,32 bcd	4,14 a	1,10 a			
	22	1,92 a	3,14 a	1,45 a	1,92 abcd	4,01 a	1,11 a			
	23	2,91 a	3,81 a	1,52 a	1,73 abcd	4,68 a	0,99 a			
	24	3,14 a	3,72 a	1,56 a	1,50 abc	4,87 a	0,90 a			

Letras diferentes para cada suelo, profundidad y método de estabilidad de agregados, indica diferencias significativas entre sitios de muestreo de acuerdo al test de Kruskal-Wallis ( $P < 0,05$ ).

Los rangos de DMP a 0-5 cm fueron amplios por el método de tamizado en seco, intermedios por el de tamizado en húmedo y reducidos por el de Le Bissonnais (1996). A 5-15 cm, los rangos de DMP fueron amplios y similares entre los métodos de tamizado en seco y húmedo, mientras que reducidos por el de Le Bissonnais (1996).

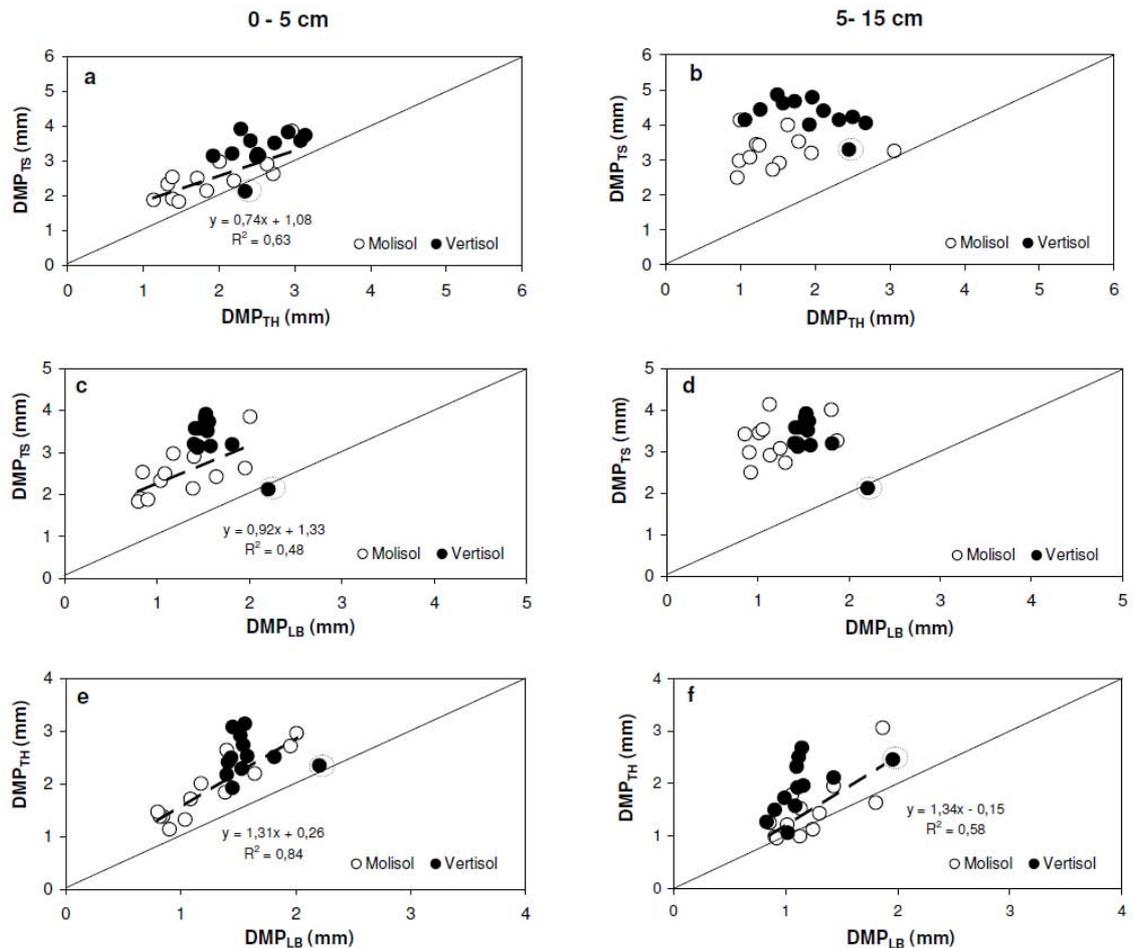
En promedio, los DMP's fueron mayores en el Vertisol que en el Molisol (Tabla 2.7) aunque las diferencias entre suelos fueron mayores para  $DMP_{TS}$  o  $DMP_{TH}$  (ca. 32 %) que para  $DMP_{LB}$  (10 %). Además, el  $DMP_{TH}$  y el  $DMP_{LB}$  fueron mayores, en promedio, a 0-5 que a 5-15 cm para ambos suelos. En contraste el  $DMP_{TS}$  fue mayor a 5-15 cm que a 0-5 cm (Tabla 2.7).

### *2.3.7. Asociación entre los diámetros medios ponderados de agregados obtenidos por tres métodos diferentes de estabilidad*

Las asociaciones entre los DMP's por los tres métodos de estabilidad de agregados fueron mayores para el Molisol a 0-5 cm que para 5-15 cm, mientras que los métodos no se relacionaron en el Vertisol (Figura 2.3).

Los  $DMP_{TH}$  y  $DMP_{TS}$  se asociaron estrechamente sólo a 0-5 cm del Molisol (Figura 2.3a) y para los lotes bajo uso agrícola en el Vertisol, i.e. sin considerar la situación inalterada, en la que fue detectado un bajo valor de  $DMP_{TS}$ .

En el Molisol a 0-5 cm, los  $DMP_{LB}$  estuvieron más estrechamente asociados con los  $DMP_{TH}$  ( $P < 0,001$ ) (Figura 2.3e) que con los  $DMP_{TS}$  ( $P < 0,05$ ) (Figura 2.3c). Además, los  $DMP_{LB}$  estuvieron asociados con los  $DMP_{TH}$  ( $P < 0,01$ ) a 5-15 cm (Figura 2.3f).



**Figura 2.3.** Relación entre el diámetro medio ponderado (DMP) de los tres métodos evaluados (tamizado húmedo – TH; tamizado seco – TS; Le Bissonnais (1996) – LB) a 0-5 y 5-15 cm de profundidad en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos. a y b indican las relaciones entre los DMP's por tamizado en seco y en húmedo para 0-5 y 5-15 cm de profundidad, respectivamente; c y d indican las relaciones entre los DMP's por tamizado en seco y por Le Bissonnais (1996) para 0-5 y 5-15 cm de profundidad, respectivamente; e y f indican las relaciones entre los DMP's por tamizado en húmedo y Le Bissonnais (1996) para 0-5 y 5-15 cm de profundidad, respectivamente. Los datos encerrados en un círculo indican el sitio inalterado en el Vertisol. Las rectas de regresión presentadas son las que fueron significativas ( $P < 0,05$ ) y corresponden al Molisol. La línea diagonal sobre cada figura representa la línea 1:1 ( $y=x$ ).

### 2.3.8. Relación entre índices de uso de la tierra y los diámetros medios ponderados de tres métodos de estabilidad estructural

Las asociaciones entre los índices de uso de la tierra y DMP's de los métodos de estabilidad de agregados fueron diferentes entre suelos y profundidades (Tabla 2.8). En el Molisol a 0-5 cm, hubo una asociación positiva entre los DMP's por todos los métodos e IIS, IIS<sub>m</sub>; ICP y FCP ( $P < 0,05$ ) (Tabla 2.8; Figura A.2a) mientras que la asociación fue negativa entre los DMP's por todos los métodos e ICS y FCS ( $P < 0,001$ ) (Tabla 2.8; Figura A.2b). A 5-15 cm, solamente el DMP<sub>LB</sub> se asoció positivamente con IIS, IIS<sub>m</sub>; ICP y FCP ( $P < 0,01$ ) y negativamente con ICS y FCS ( $P < 0,01$ ). Además, a esta profundidad, se detectó una pobre relación negativa entre el DMP<sub>TS</sub> y los índices ICS y FCS ( $P < 0,05$ ).

En el Vertisol a 0-5 cm, no se detectaron relaciones significativas entre los índices de uso de la tierra y los DMP's de los agregados. Aunque los DMP<sub>TS</sub> se asociaron positivamente con los índices ICS y FCS ( $P < 0,01$ ) y negativamente con ICP ( $P < 0,05$ ), estos resultados estuvieron fuertemente influenciados por la situación inalterada (Tabla 2.8). De manera similar, a 5-15 cm hubo una pobre relación entre los DMP<sub>TS</sub> y los índices IIS, IIS<sub>m</sub> para este suelo.

El análisis de conglomerados realizado con los DMP's de los diferentes métodos de estabilidad estructural, sólo permitió la separación de los diferentes sitios de muestreo de manera consistente con el uso de la tierra en el Molisol y a 0-5 cm de profundidad. En general, los diferentes dendrogramas presentaron dos ramas principales, agrupando los sitios inalterados y con pasturas, y separándose de los sitios agrícolas (Figura 2.4).

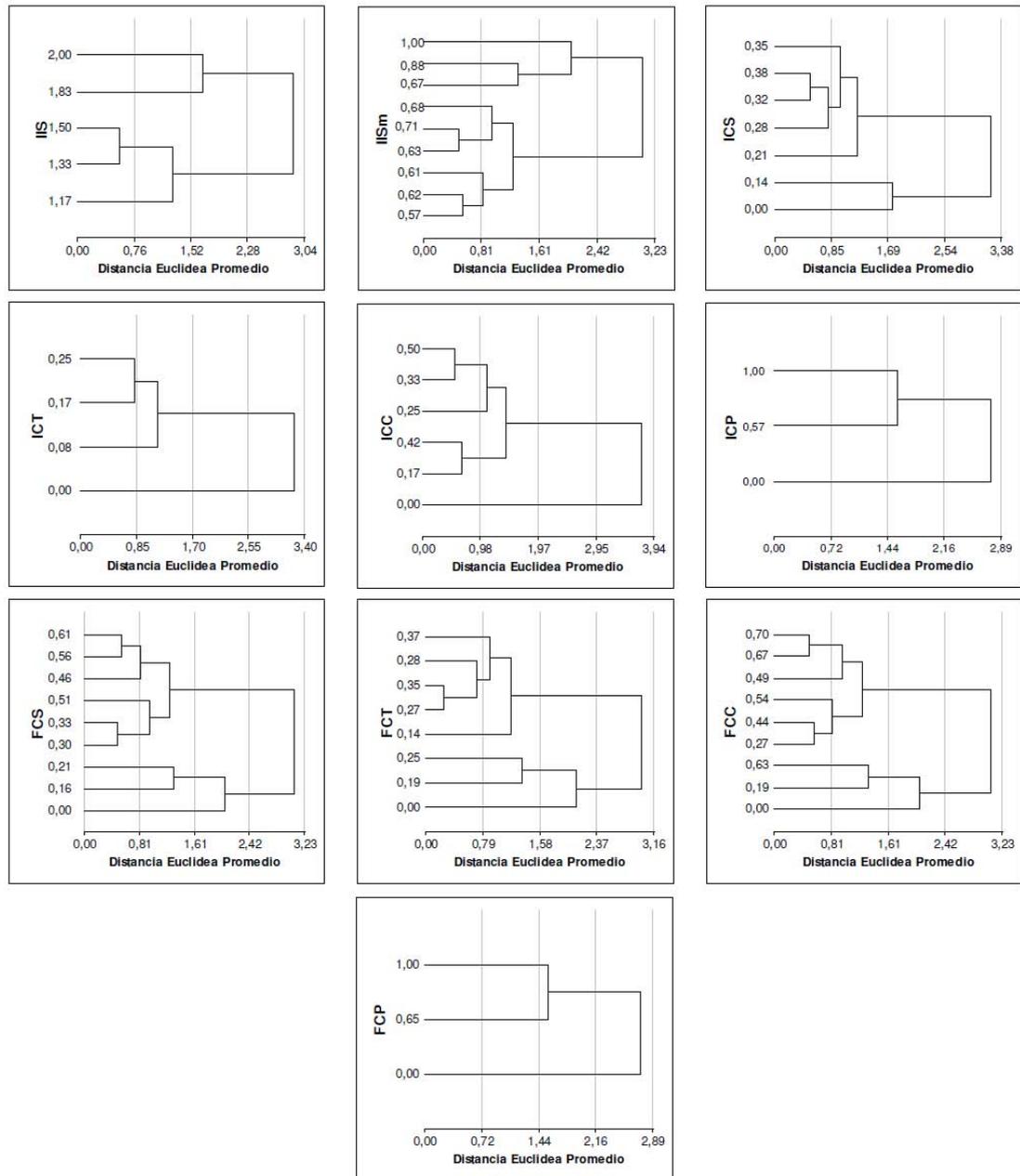
Para el índice de intensificación de las secuencias, ya sea basado en el número de cultivos por año (IIS) o en los meses con cultivos en relación al número total de meses de la secuencia (IIS<sub>m</sub>), el dendrograma separó claramente los sitios menos intensificados de los más intensificados (Figura 2.4). De manera similar, los dendrogramas obtenidos con los índices FCS e ICS presentaron una clara separación entre los sitios con alta y baja proporción de soja en las secuencias de cultivos (Figura 2.4).

Debido a las escasas situaciones con pasturas los dendrogramas obtenidos con los índices ICP y FCP presentaron sólo tres ramas principales, agrupando la situación inalterada y la que presentó pastura, y separándose de las situaciones agrícolas. De similar manera, los escasos sitios con un número diferente de cultivos de trigo en las secuencias de cultivos generó un dendrograma con sólo 4 ramas, separando la situación inalterada (ICT=0) de los sitios con agricultura. Los demás índices evaluados (FCT, ICT y FCC) no fueron lo suficientemente sensibles para separar los diferentes sitios de muestreo, debido a que no se ordenaron de manera progresiva en función del uso de la tierra (Figura 2.4).

**Tabla 2.8.** Coeficientes de correlación (r) de la relación entre los índices de uso de la tierra y los diámetros medios ponderados (DMP) por tres métodos de estabilidad estructural (tamizado en seco (TS), tamizado en húmedo (TH), Le Bissonnais (1996) (LB)) a 0-5 y 5-15 cm de profundidad para once sitios agrícolas y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Suelo	Profundidad	DMP (mm)	Índices de uso de la tierra									
			IIS	IIS <sub>m</sub>	ICS	ICT	ICC	ICP	FCS	FCT	FCC	FCP
Molisol	0-5 cm	TS	0,78 **	0,78 **	-0,86 ***	-0,41 NS	-0,28 NS	0,72 **	-0,87 ***	-0,51 NS	-0,34 NS	0,70 *
		TH	0,78 **	0,76 **	-0,85 ***	-0,38 NS	-0,35 NS	0,71 **	-0,87 ***	-0,52 NS	-0,42 NS	0,72 **
		LB	0,75 **	0,77 **	-0,84 ***	-0,45 NS	-0,40 NS	0,77 **	-0,84 ***	-0,59 *	-0,45 NS	0,78 **
	5-15 cm	TS	0,47 NS	0,48 NS	-0,68 *	-0,27 NS	-0,01 NS	0,43 NS	-0,69 *	-0,32 NS	-0,03 NS	0,42 NS
		TH	0,53 NS	0,52 NS	-0,47 NS	-0,18 NS	-0,30 NS	0,50 NS	-0,52 NS	-0,37 NS	-0,38 NS	0,54 NS
		LB	0,74 **	0,80 **	-0,74 **	-0,49 NS	-0,50 NS	0,82 **	-0,75 **	-0,65 *	-0,56 NS	0,83 ***
Vertisol	0-5 cm	TS	-0,48 NS	-0,56 NS	0,74 **	0,43 NS	0,47 NS	-0,58 *	0,71 **	0,47 NS	0,49 NS	-0,57 NS
		TH	-0,12 NS	-0,08 NS	0,01 NS	-0,39 NS	-0,25 NS	0,09 NS	0,09 NS	-0,32 NS	-0,16 NS	0,09 NS
		LB	0,27 NS	0,35 NS	-0,50 NS	-0,47 NS	-0,39 NS	0,44 NS	-0,44 NS	-0,45 NS	-0,36 NS	0,43 NS
	5-15 cm	TS	-0,61 *	-0,58 *	0,51 NS	0,23 NS	0,41 NS	-0,51 NS	0,54 NS	0,32 NS	0,46 NS	-0,53 NS
		TH	0,19 NS	0,21 NS	-0,43 NS	-0,04 NS	-0,06 NS	0,21 NS	-0,39 NS	-0,06 NS	-0,08 NS	0,20 NS
		LB	0,32 NS	0,38 NS	-0,57 NS	-0,33 NS	-0,29 NS	0,42 NS	-0,52 NS	-0,34 NS	-0,29 NS	0,40 NS

NS, \*, \*\*, \*\*\* indica no significativo,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente. IIS= índice de intensificación de la secuencia (cultivos por año); IIS<sub>m</sub>= índice de intensificación de la secuencia (meses con cultivos en relación a los meses de la secuencia); ICS= índice del cultivo de soja; ICT= índice del cultivo de trigo; ICC= índice de cultivos cereales; ICP= índice de pasturas; FCS= frecuencia del cultivo de soja; FCT= frecuencia del cultivo de trigo; FCC= frecuencia de cultivos cereales; FCP= frecuencia de pasturas. Los índices fueron calculados utilizando la fracción de tiempo anual con cobertura vegetal viva en un periodo de 6 años previos al periodo del muestreo de suelos (2002-2008).



**Figura 2.4.** Dendrogramas para diferentes índices de uso de la tierra en un Molisol a 0-5 cm de profundidad utilizando el diámetro medio ponderado de los agregados por tamizado en seco ( $DMP_{TS}$ ), tamizado en húmedo ( $DMP_{TH}$ ) y por el método de Le Bissonnais ( $DMP_{LB}$ ). Los dendrogramas se construyeron utilizando el método de encadenamiento promedio de la distancia Euclídea. IIS= índice de intensificación de la secuencia (cultivos por año); IIS<sub>m</sub>= índice de intensificación de la secuencia (meses con cultivos en relación a los meses de la secuencia); ICS= índice del cultivo de soja; ICT= índice del cultivo de trigo; ICC= índice de cultivos cereales; ICP= índice de pasturas; FCS= frecuencia del cultivo de soja; FCT= frecuencia del cultivo de trigo; FCC= frecuencia de cultivos cereales; FCP= frecuencia de pasturas.

## 2.4. Discusión

En este capítulo se demostró que los índices que contemplaron el nivel de intensificación de las secuencias de cultivos y la frecuencia del cultivo de soja fueron los más apropiados para evaluar el impacto del uso de la tierra sobre la estabilidad de los agregados y el almacenaje de COS, principalmente en el Molisol (Tablas 2.5, 2.6, 2.8).

La estrecha relación positiva detectada entre el stock de COS y el IIS en el Molisol (Tabla 2.5) y los altos valores de stock de COS en 0-5 cm registrados en sitios inalterados o en rotación con pasturas en ambos suelos evaluados (Tablas 2.3, 2.4) estarían asociados con el tiempo de ocupación con cobertura vegetal viva que permite mantener una actividad continua de microorganismos y raíces durante períodos prolongados. Una alta intensidad de uso de recursos ambientales, i.e. lluvia y radiación solar, típicos de sistemas caracterizados por un elevado IIS (Caviglia y Andrade, 2010) puede incrementar la cantidad total de residuos vegetales retornados al suelo (Caviglia et al., 2011). A su vez, un retorno más frecuente de residuos vegetales en sistemas con elevado IIS favorece la adición de agentes orgánicos de agregación, particularmente de tipo transitorios y temporarios (Tisdall y Oades, 1982), los cuales pueden contribuir a incrementar la estabilidad de agregados (Alvaro-Fuentes et al., 2009), y en consecuencia el almacenaje de COS (Wood et al., 1990, 1991; Peterson, et al., 1998; Shaver et al., 2003; Sherrod et al., 2003).

Los diferentes índices de uso de la tierra analizados sólo se asociaron con los DMP's de los diferentes métodos de estabilidad estructural evaluados en el Molisol, principalmente a 0-5 cm de profundidad. Los DMP's en el Molisol estuvieron estrecha y positivamente asociados con el período con cobertura vegetal viva (i.e. IIS y IIS<sub>m</sub>) (Tabla 2.8, Figura A.2a). Además, cuando el período de barbecho se incrementó por una mayor FCS los DMP's se redujeron notablemente (Figura A.2b).

En el Vertisol, la mayor estabilidad de agregados detectada en comparación con el Molisol, puede ser impartida por su alto contenido de arcilla de tipo esmectita desde la superficie (Novelli et al., 2011, 2013). Además, este suelo posee área específica (Paz Ferreiro et al., 2009) y capacidad de intercambio catiónico elevadas, lo cual incrementa la interacción físico-química de las partículas de suelo (Amezketta, 1999). Sumado a esto, la capacidad de auto-estructuración de los Vertisoles puede favorecer el restablecimiento de la estructura del suelo luego de un proceso de alteración (Pillai y McGarry, 1999; Bravo-Garza et al., 2009; Fabrizzi et al., 2009), lo que explica el menor impacto del uso de la tierra en este suelo, sobre todo en las situaciones bajo agricultura.

La estabilidad de los agregados por la metodología de Le Bissonnais (1996) mostró un comportamiento diferencial entre los suelos y los pretratamientos evaluados (Tabla A.1). En ambos suelos, los valores más bajos de DMP por la metodología de Le Bissonnais (1996) fueron encontrados con el pretratamiento de humedecimiento repentino, mientras que los más altos se encontraron con el pretratamiento de disgregación mecánica (Figura 2.1; Tabla A.1), lo que coincide con lo reportado previamente por otros investigadores (Le Bissonnais y Arrouays, 1997; Chenu et al., 2000; Gabioud et al., 2011). Aunque los tres pretratamientos en general proporcionan resultados de DMP similares para diferentes sistemas evaluados, la mayor agresividad del pretratamiento de humedecimiento repentino hace que sea un indicador menos sensible para evaluar el impacto del uso de la tierra en suelos frágiles en su estructura (Le Bissonnais, 1996). El pretratamiento de humedecimiento lento surge como un indicador adecuado para evaluar suelos arcillosos debido a que la microfisuración por

hinchamiento diferencial se incrementa con el contenido de arcilla (Le Bissonnais, 1996). De acuerdo con esto, en este capítulo solamente el pretratamiento de humedecimiento lento permitió detectar cambios debido al  $IIS_m$  y la FCS en el Vertisol (Tabla 2.6).

La contrastante diferencia detectada entre los suelos evaluados al relacionar la concentración de COS con el DMP por los distintos pretratamientos de la metodología de Le Bissonnais (1996) puede deberse a los agentes de agregación involucrados en cada suelo (Figura 2.2, Figura A.1). En efecto, la estabilidad de los agregados puede ser proporcionada por otros agentes de agregación diferentes al COS, como la arcilla o los óxidos de hierro y de aluminio (Fabrizzi et al., 2009; Novelli et al., 2011, 2013).

En esta tesis, el COS fue un agente de agregación importante en el Molisol hasta los  $30 \text{ g COS kg}^{-1}$ , sin incrementos apreciables en la estabilidad de los agregados con valores mayores al mencionado (Figura 2.2; Figura A.1). Sin embargo, el COS surgió como un importante agente de agregación en el Vertisol con valores superiores a  $35 \text{ g COS kg}^{-1}$ , pero fue irrelevante a valores inferiores de COS. El rol de las arcillas esmectitas sobre la protección del COS, aunque permanece sin dilucidar completamente, ha sido una explicación frecuente de la mayor concentración de COS detectada en el Vertisol en comparación con el Molisol (Stephan et al., 1983; Cerana et al., 2006; Fabrizio et al., 2009).

Reportes previos sugieren que la concentración de COS no es importante *per se* para el desarrollo estructural en Vertisoles, en donde las fracciones lábiles del COS pueden tener una influencia positiva (McGarry, 1996; Bravo-Garza y Bryan, 2005). En efecto, la concentración de COS y la estabilidad de los agregados en el Vertisol fueron máximas en sitios con altos  $IIS$  y bajas FCS (sitios inalterados y en rotación con pasturas), pero no se detectaron cambios evidentes en los DMP's en los sitios agrícolas (Figura 2.2). En concordancia con estos resultados, Chan (1997) reportó una importante reducción en las fracciones lábiles del COS durante la transición de un pastizal natural hacia agricultura en un Vertisol de Australia. Esto evidencia que las fracciones lábiles del COS podrían jugar un rol importante en la estabilidad de los agregados del Vertisol cuando los valores de concentración de COS superan los  $35 \text{ g COS kg}^{-1}$  (Figura 2.2).

La búsqueda de un nivel de concentración de COS por encima o debajo del cual la estabilidad de los agregados permanece estable para un Molisol y un Vertisol, respectivamente, no ha sido sugerida previamente. Estos resultados contribuyen al conocimiento del rol diferencial del COS sobre la agregación en cada tipo de suelo y provee información útil para el desarrollo de indicadores de calidad de suelo que permitan predecir las tendencias en las propiedades del suelo de manera temprana.

En este capítulo se demostró que el uso de la tierra, evaluado a través del DMP como una medida de la estabilidad de agregados, fue más dependiente del tipo de suelo que del método utilizado para evaluarla. Además, se resalta la importancia de seleccionar índices que sean simples e intuitivos como el  $IIS_m$  o FCS y que permitan detectar de manera temprana el impacto del uso de la tierra sobre algunas propiedades del suelo.

## 2.5. Conclusiones

Los índices de uso de la tierra basados en el período con cobertura vegetal viva (i.e. IIS e IIS<sub>m</sub>) y la frecuencia del cultivo de soja (FCS) fueron adecuados para predecir el cambio en el stock de COS y en la estabilidad de agregados en el Molisol, principalmente a 0-5 cm de profundidad. En el Vertisol, los cambios en el COS y en la estabilidad de los agregados fueron menos evidentes que en el Molisol, sólo detectándose diferencias entre las situaciones inalteradas o en rotación con pasturas frente a las agrícolas.

Los diferentes métodos de estabilidad de agregados permitieron discriminar sitios con usos de la tierra contrastantes en ambas profundidades del Molisol. En este suelo, los DMP<sub>TH</sub> y DMP<sub>LB</sub> fueron mayores en el sitio inalterado y en el que presentó rotación con pasturas, en comparación con aquellos en agricultura continua. Sin embargo, en el Vertisol solamente los DMP<sub>TH</sub> a 5-15 cm difirieron entre sitios de muestreo. Esto sugiere que el impacto del uso de la tierra sobre la estabilidad de los agregados fue más dependiente del tipo de suelo que del método utilizado para evaluar la estabilidad de los agregados.

## 2.6. Relación con las hipótesis planteadas

La relación entre los índices de uso de la tierra evaluados como FCS o IIS<sub>m</sub> y las variables de agregación fué más estrecha y sensible para detectar diferentes situaciones de uso en el Molisol. Estos resultados no proporcionan evidencias suficientes para rechazar la hipótesis 1 de esta tesis que establece que *“la relación entre los índices de uso de la tierra y las variables de estabilidad de agregados es más estrecha en el Molisol en comparación con el Vertisol debido a la mayor dependencia de agentes orgánicos de agregación”*.

Por otro lado, si bien el impacto del uso de la tierra sobre la estabilidad de agregados fue menos notorio en el Vertisol, el pretratamiento de humedecimiento lento fue el más adecuado para este suelo, debido a que evalúa la microfisuración por hinchamiento diferencial de las arcillas, muy común en este tipo de suelos. Este resultado no proporciona evidencias suficientes para rechazar la hipótesis 2 de esta tesis que establece que *“el pretratamiento de humedecimiento lento por el método de estabilidad de agregados de Le Bissonnais es más adecuado que el de humedecimiento repentino o de disgregación mecánica para evaluar el uso de la tierra en el Vertisol debido a que evalúa la microfisuración por hinchamiento diferencial de las arcillas”*, y resulta en una contribución de gran utilidad al momento de seleccionar un método apropiado para evaluar el impacto del uso de la tierra en un Vertisol.

Si bien en este capítulo no se puso a prueba la hipótesis 3, la cual será planteada en el próximo capítulo, se encontraron resultados que permitirían sugerir un impacto negativo de la frecuencia del cultivo de soja sobre la agregación, principalmente en el Molisol.

## 2.7. Relación con los otros capítulos

En este capítulo se evaluaron diferentes índices de uso de la tierra y métodos para determinar la estabilidad de agregados, mediante muestreos en lotes de producción. A pesar de presentarse un menor control de las variables en estudio en este tipo de

evaluaciones, se resalta que los índices que utilizan el tiempo de cobertura vegetal viva (IIS e IIS<sub>m</sub>), como así también los que utilizan la frecuencia del cultivo de soja (FCS, ICS), permitieron discriminar entre usos de la tierra. Además, la evaluación de diferentes métodos de estabilidad estructural permitió detectar los más apropiados para evaluar el impacto del uso de la tierra en cada suelo evaluado.

En el próximo capítulo se evaluará cuál es el impacto de la frecuencia del cultivo de soja sobre el almacenaje de COS en agregados de diferentes tamaños, utilizando los mismos sitios de muestreo del presente capítulo.

## **Capítulo 3**

# **Impacto de la frecuencia del cultivo de soja sobre el almacenaje de carbono en un Molisol y un Vertisol\***

---

\* Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168, 254-260.

### 3.1. Introducción

La elevada frecuencia del cultivo de soja (*Glycine max* [L.] Merr.) en los sistemas agrícolas actuales, principalmente como único cultivo anual, favorece el desaprovechamiento de recursos clave (i.e. agua y radiación solar) de la productividad potencial del ambiente durante los períodos de barbecho, reduciendo la eficiencia y productividad de los sistemas (Caviglia et al., 2004). Por otro lado, el cultivo de soja provee una limitada cantidad de residuos de cultivos con una baja relación carbono:nitrógeno (C:N) (Wright y Hons, 2004) lo que promueve una rápida degradación de los residuos de cosecha y expone al suelo a un mayor impacto de los procesos erosivos durante el período de barbecho.

Existe evidencia que indica que una elevada proporción de soja en las secuencias de cultivos puede afectar el carbono orgánico del suelo (COS) y reducir la macroagregación, lo cual está asociado con la calidad y el bajo aporte de residuos, en comparación con sistemas de cultivos más balanceados en su composición (Franzluebbers et al., 1998; Studdert y Echeverría, 2000; Wright y Hons, 2004, 2005).

Diversos estudios han demostrado que prácticas de manejo como la siembra directa, las rotaciones y la intensificación de las secuencias de cultivos por el uso de cultivos dobles o cultivos de cobertura, mejoran la agregación del suelo (Mikha y Rice, 2004; Wright y Hons, 2004; Álvaro-Fuentes et al., 2009) e incrementan el secuestro de COS (Havlin et al., 1990; Peterson et al., 1998; Bronick y Lal, 2005b; Villamil et al., 2006; López-Fando y Pardo, 2011).

La agregación del suelo es un mecanismo que está íntimamente asociado con el almacenaje de COS (Tisdall y Oades, 1982; Six et al., 2004), debido a la protección física dentro de los agregados (Beare et al., 1994a; Balesdent et al., 2000). No obstante, la protección del COS puede cambiar en suelos con diferentes agentes que estabilizan los agregados (Bronick y Lal, 2005a, b; Deneff y Six, 2005; Fabrizzi et al., 2009).

En Molisoles, el COS es considerado uno de los principales agentes que estabilizan los agregados de suelo (Fabrizzi et al., 2009), mientras que en Oxisoles, la acción del hierro y del aluminio son responsables de la mayor estabilidad de los agregados de suelo (Dalal y Bridge, 1996; Oades, 1993; Fabrizzi et al., 2009), y en los Vertisoles, la estabilidad de agregados puede ser mayormente atribuida al elevado contenido de arcillas, principalmente del tipo de las esmectitas, el cual protege el COS a través de la formación de complejos arcillos-húmicos (Stephan et al., 1983). Esto sugiere que el almacenaje de COS ante una elevada frecuencia del cultivo de soja puede diferir entre suelos que contrasten en su textura, mineralogía y estado orgánico.

Mientras que el efecto de las labranzas y las prácticas de fertilización sobre el almacenaje de COS y la distribución de agregados ha sido ampliamente estudiada (Mikha y Rice, 2004; Wright y Hons, 2004, 2005; Fabrizzi et al., 2009; López-Fando y Pardo, 2011), existe poca evidencia sobre el impacto del incremento de la frecuencia del cultivo de soja sobre la agregación y el almacenaje de COS en suelos contrastantes en sus principales agentes de agregación. En comparación con los Molisoles, los Vertisoles han recibido menor atención, por lo que el estudio de aquella relación es importante para generar estrategias que permitan minimizar los impactos negativos del uso de la tierra en estos suelos y contribuye al conocimiento de los mecanismos involucrados en la estabilización del COS.

El enriquecimiento de COS producido a nivel de superficie por la siembra directa favorece la estratificación del mismo, situación que es comúnmente detectada en

muchos ecosistemas naturales (Franzluebbers, 2002). Esto tiene un rol importante en el mantenimiento de la calidad del suelo, ya que la superficie es una interface que recibe el mayor impacto de las prácticas agrícolas y las precipitaciones, las cuales impulsan los procesos erosivos y de degradación del suelo (Franzluebbers, 2010). Debido a que el nivel de estratificación del COS puede ser utilizado como un indicador de la calidad del suelo (Franzluebbers, 2002), el cambio en el nivel de estratificación por el incremento en la frecuencia de soja puede indicar su tendencia al deterioro o mejora.

El objetivo de este capítulo fue evaluar el impacto de la frecuencia del cultivo de soja sobre el almacenaje de COS en diferentes tamaños de agregados de suelo de un Molisol y un Vertisol.

## **3.2. Materiales y Métodos**

### *3.2.1. Sitio de estudio, muestreo y análisis de suelo*

Para el desarrollo de esta sección de la tesis se utilizaron los mismos sitios de muestreos y muestras de suelos presentados previamente en el Capítulo 2, sobre un Vertisol y un Molisol de Entre Ríos, Argentina.

Tal como se comentó en el capítulo anterior, las muestras de suelo (tres repeticiones) en cada sitio se colectaron entre marzo y octubre de 2008 posterior a la cosecha de los cultivos estivales y antes de implantar el próximo cultivo estival. Las mismas se obtuvieron a 0-5, 5-15 y 15-30 cm de profundidad utilizando una pala de punta. Además, en cada sitio de muestreo y profundidad, se determinó la densidad aparente por triplicado utilizando el método del cilindro (Porta Casanellas et al., 1999).

Las muestras de suelo de 0-5 y 5-15 cm fueron tamizadas por 10 mm, removiendo las raíces y restos vegetales, secadas al aire y almacenadas a temperatura ambiente hasta su análisis. Una alícuota de las muestras de suelo de 0-5, 5-15 y 15-30 cm fue tamizada por 2 mm, molida posteriormente a 0,5 mm y utilizada para determinar su contenido de C por combustión seca, utilizando un autoanalizador LECO modelo TruSpec (Leco Corp., St. Joseph, MI, USA).

Tal como se describió en el capítulo anterior, se evaluó la presencia de C mineral ( $\text{CaCO}_3$ ) a través de la adición de ácido clorhídrico sobre una alícuota de las muestras. En las muestras en la cual se detectó la presencia de  $\text{CaCO}_3$ , se lo determinó utilizando un calcímetro para descontarlo luego del C total (Loeppert y Suarez, 1996).

Las muestras de 0-5 cm y 5-15 cm de profundidad se utilizaron para separar los agregados estables al agua utilizando la metodología de tamizado en húmedo descrita por Wright y Hons (2004) con modificaciones. Las muestras de suelo (100 g) fueron humedecidas por capilaridad hasta capacidad de campo por 10 minutos para minimizar el estallido luego de la inmersión en agua. El suelo húmedo, fue inmerso en agua sobre una columna de tamices (2000  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$  y 53  $\mu\text{m}$ ) y agitados verticalmente 6 cm, 60 veces por un período de 2 minutos. Este tiempo fue seleccionado para asegurar una cantidad mínima de macroagregados de acuerdo a análisis preliminares.

Cuatro clases de tamaños de agregados fueron obtenidas: grandes macroagregados (>2000  $\mu\text{m}$ ), pequeños macroagregados (250-2000  $\mu\text{m}$ ), microagregados (53-250  $\mu\text{m}$ ) y la fracción asociada a los minerales (<53  $\mu\text{m}$ ). Esta última fracción fue obtenida por diferencia entre la muestra inicial y la suma de las tres fracciones de agregados (>2000  $\mu\text{m}$  + 250-2000  $\mu\text{m}$  + 53-250  $\mu\text{m}$ ).

Los agregados de suelo retenidos sobre el tamiz, fueron enjuagados con agua destilada, transferidos a recipientes, secados en estufa a 60 °C por 3 días, pesados, molidos y tamizados a través de 0,5 mm y el contenido de C total determinado por combustión seca utilizando el autoanalizador LECO. Los datos de COS no fueron corregidos por el contenido de arena, debido a que los mismos fueron similares entre suelos y profundidades (Tabla 2.1), aunque se detectaron diferencias en la granulometría de la arena (Molisol: 3,3 % 50-100 µm, 0,9 % 100-250 µm, 0,3 % 250-500 µm; Vertisol: 1,1 % 50-100 µm, 1,9 % 100-250 µm, 1,1 % 500-1000 µm). Basado en diversos trabajos previos, se asumió que la arena puede encontrarse contenida completamente dentro de los grandes macroagregados, y debido a ello se la considera como parte de los agregados (Chung et al., 2009; Sainju et al., 2009; Wright y Inglett, 2009; Wright y Hons, 2005).

### 3.2.2. Cálculos

#### 3.2.2.1. Cálculo del índice de frecuencia de soja

La frecuencia del cultivo de soja (FCS) tal como se comentó en el Capítulo 2 de esta tesis, fue calculada como el número de meses ocupados con soja en relación con el total de meses ocupados con cultivos en los últimos 6 años al momento del muestreo.

Para el cálculo de este índice, se utilizó una ocupación promedio anual de 6 meses para maíz (*Zea mays* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) y 5 meses para soja. En algunos casos, otros cultivos estuvieron presentes dentro de la secuencia de cultivos (Tabla 2.2). Para el caso del trébol de olor blanco (*Melilotus albus* Medik) se utilizó una ocupación promedio de 8 meses, 5 meses para sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) y 5,5 meses para lino (*Linum usitatissimum* L.). En la tabla 3.1 se presenta un ejemplo para el sitio de muestreo 5.

**Tabla 3.1.** Ejemplo de cálculo del índice de frecuencia de soja para el sitio 5 de un suelo Molisol de Entre Ríos, Argentina.

Año	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008
Secuencia de cultivo	T/S	M	S	T/S	M	M
Meses de ocupación	11	6	5	11	6	6

T: trigo; S: soja; M: maíz.

$$\text{Frecuencia del cultivo de soja} = \frac{5_{(2002-2003)} + 5_{(2004-2005)} + 5_{(2005-2006)}}{11+6+5+11+6+6} = \frac{15}{45} = 0,33$$

#### 3.2.2.2. Carbono orgánico en masa de suelo equivalente

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 2, la situación inalterada presentó una menor densidad aparente en comparación con las situaciones bajo uso agrícola. El cálculo de stock de COS para cada profundidad y a 0-30 cm se realizó en masa de suelo equivalente (Lee et al., 2009), utilizando la situación inalterada en cada tipo de suelo como sistema de referencia. Para ello se utilizaron las ecuaciones II-1, II-2 y II-3, descriptas en el capítulo 2 de esta tesis.

### 3.2.2.3. Nivel de estratificación del carbono orgánico del suelo (COS)

El nivel de estratificación de la concentración de COS fue calculado como la relación entre la concentración de COS a 0-5 cm y la concentración de COS a 5-15 cm (Franzluebbbers, 2002). Del mismo modo, el nivel de estratificación del stock de COS fue calculado como la relación entre  $C_{\text{equiv}0-5\text{cm}}$  (II-1) y  $C_{\text{equiv}5-15\text{cm}}$  (II-2) utilizando el stock en masa equivalente y la situación inalterada como sistema de referencia en cada suelo.

### 3.2.2.4. Almacenaje de carbono orgánico del suelo en fracciones de tamaños de agregados

El almacenaje de COS en cada fracción de agregados fue obtenida como el producto del COS en los agregados (%) y la masa de cada fracción de tamaño de agregado (g).

### 3.2.3. Análisis estadísticos

Los cambios en el COS por efecto de la frecuencia del cultivo de soja fueron analizados utilizando regresiones lineales. Los datos fueron ajustados utilizando el procedimiento PROC REG (SAS Institute, 2003) y PROC N-LIN (SAS Institute, 2003) para funciones lineales y lineal-plateau, respectivamente. Se seleccionaron los modelos que presentaron los menores residuos, que exhibieron un patrón aleatorio y fueron normalmente distribuidos.

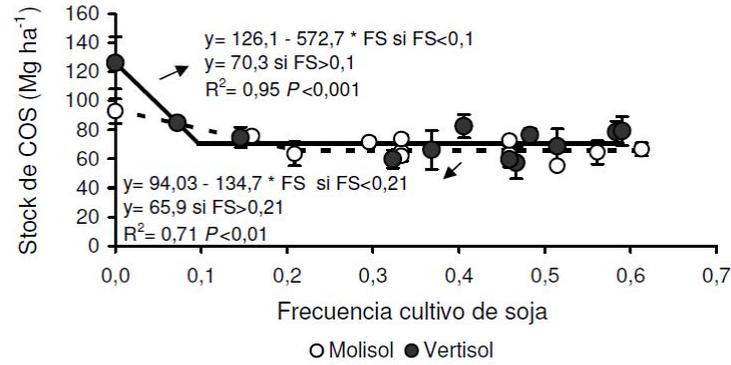
Para detectar diferencias entre la situación inalterada y las agrícolas en el Vertisol se realizó un test de T.

## 3.3. Resultados

### 3.3.1. Stock de carbono orgánico del suelo

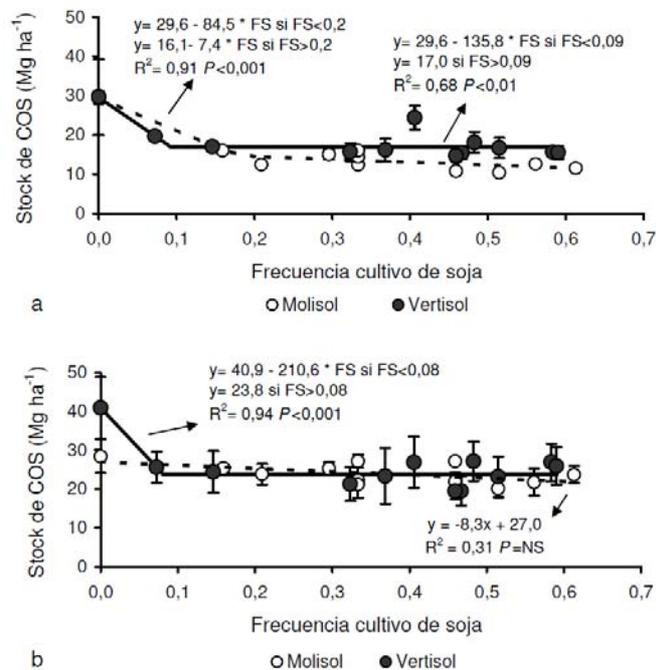
En ambos tipo de suelo evaluados, el incremento en la frecuencia del cultivo de soja no afectó el stock de COS ( $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$ ) en las situaciones bajo agricultura, sólo evidenciándose cambios en  $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$  entre la situación inalterada y las agrícolas (Figura 3.1).

Promediando los datos obtenidos en cada suelo, el stock de COS ( $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$ ) fue de 69 Mg C ha<sup>-1</sup> en el Molisol y 76 Mg C ha<sup>-1</sup> en el Vertisol, mientras que considerando sólo las situaciones bajo agricultura el  $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$  fue de 67 Mg C ha<sup>-1</sup> en el Molisol y 72 Mg C ha<sup>-1</sup> en el Vertisol. El máximo valor de stock de COS ( $C_{\text{equiv}0-30\text{cm}}$ ) fue encontrado en la situación inalterada del suelo Vertisol (126 Mg C ha<sup>-1</sup>) (Figura 3.1).



**Figura 3.1.** Stock de carbono orgánico del suelo (COS) en masa de suelo equivalente a 0-30 cm de suelo ( $C_{equiv0-30cm}$ ) en función de la frecuencia del cultivo de soja.  $C_{equiv0-30cm}$  se calculó utilizando la situación inalterada en cada tipo de suelo como sistema de referencia. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

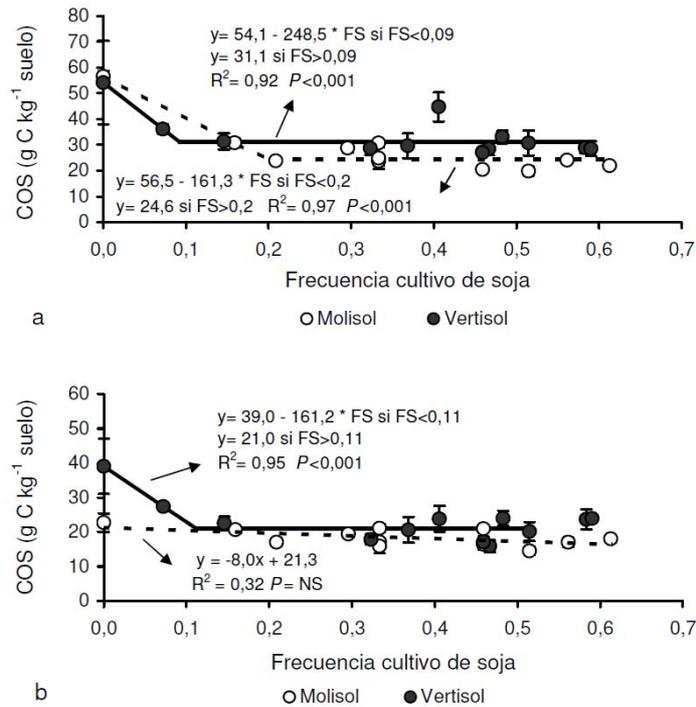
En ambos suelos, se detectaron diferencias entre el stock de COS ( $C_{equiv0-5cm}$ ) entre la situación inalterada y las agrícolas ( $P < 0,001$ ), aunque analizando únicamente los sitios agrícolas, sólo se registró una disminución en el  $C_{equiv0-5cm}$  con el incremento de la frecuencia del cultivo de soja en el Molisol ( $P < 0,05$ ) (Figura 3.2a). El stock de COS ( $C_{equiv5-15cm}$ ) sólo registró un cambio entre la situación inalterada y las agrícolas del suelo Vertisol (Figura 3.2b).



**Figura 3.2.** Stock de carbono orgánico del suelo (COS) en masa de suelo equivalente afectado por la frecuencia del cultivo de soja; (a): en 0-5 cm ( $C_{equiv0-5 cm}$ ) y (b): en 5-15 cm ( $C_{equiv5-15cm}$ ).  $C_{equiv}$  se calculó utilizando la situación inalterada en cada tipo de suelo como sistema de referencia. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

### 3.3.2. Concentración de carbono orgánico del suelo

Al igual que para el stock de COS ( $C_{equiv0-5cm}$ ), la concentración de COS en ambos suelos fue significativamente diferente ( $P<0,001$ ) entre las situaciones agrícolas y la inalterada. Sin embargo, considerando sólo las situaciones bajo agricultura, el incremento en la frecuencia de soja redujo la concentración de COS únicamente en el Molisol ( $P<0,05$ ) (Figura 3.3 a). En 5-15 cm de profundidad, sólo se detectaron diferencias estadísticas significativas entre la situación inalterada y las agrícolas del Vertisol ( $P<0,001$ ) (Figura 3.3 b).



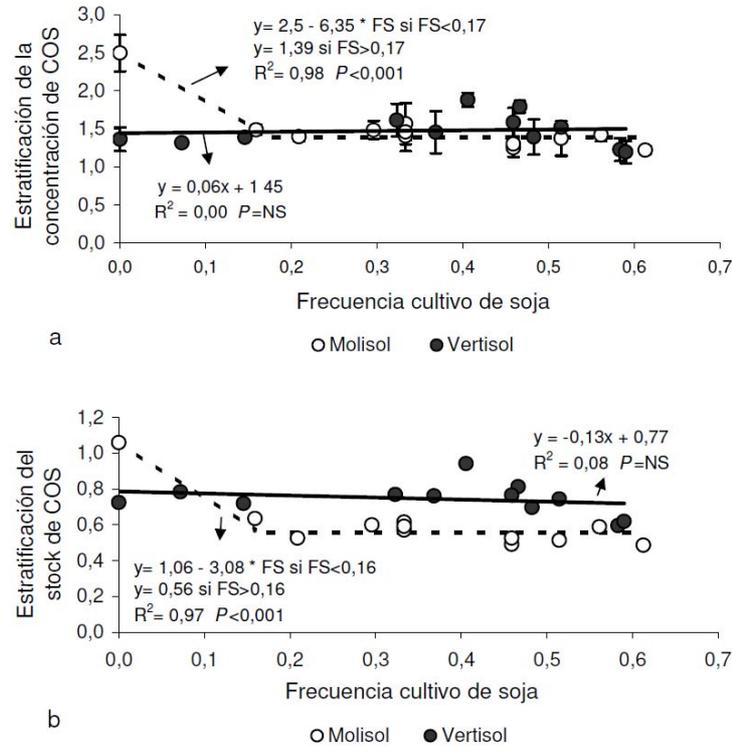
**Figura 3.3.** Concentración de carbono orgánico del suelo (COS) afectado por la frecuencia del cultivo de soja (a): a 0-5 cm de profundidad, y (b): a 5-15 cm de profundidad. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

### 3.3.3. Nivel de estratificación del carbono orgánico del suelo

El nivel de estratificación de la concentración de COS fue afectado por el incremento de la frecuencia del cultivo de soja en el Molisol (Figura 3.4a). En este suelo, se registró un nivel de estratificación de 2,5 para la situación inalterada, mientras que de 1,4 en el promedio de las situaciones agrícolas. Si bien la diferencia más evidente en el Molisol se detecta entre la situación inalterada y las agrícolas ( $P<0,001$ ), se registró una reducción significativa al considerar sólo las situaciones bajo agricultura ( $P<0,05$ ) (Figura 3.4a). En contraste, en el Vertisol, el nivel de estratificación de la concentración de COS no fue afectado por incrementos en la frecuencia del cultivo de soja.

De manera similar a lo mencionado utilizando concentración de COS, el incremento de la frecuencia del cultivo de soja redujo el nivel de estratificación del stock de COS (Figura 3.4b). Si bien la principal diferencia se registró entre la situación

inalterada y las agrícolas del Molisol ( $P<0,001$ ), al considerar sólo las situaciones bajo agricultura se registró una leve disminución del nivel de estratificación del stock de COS ( $P<0,06$ ) (Figura 3.4b). En el Vertisol no se evidenciaron cambios en el nivel de estratificación del stock de COS asociados a la frecuencia del cultivo de soja (Figura 3.4b).

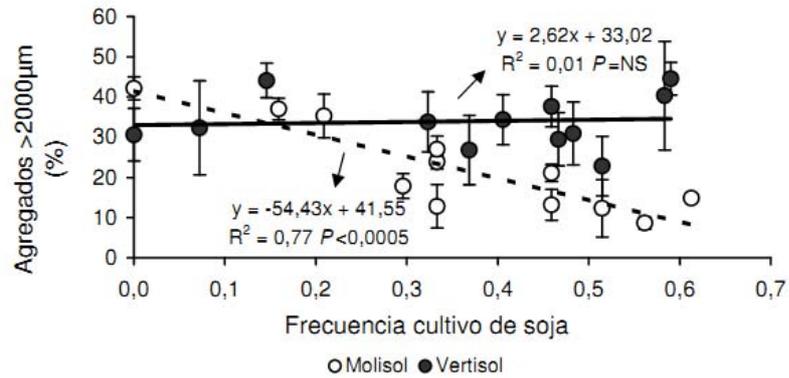


**Figura 3.4.** Nivel de estratificación del carbono orgánico del suelo (COS) afectado por la frecuencia del cultivo de soja (a): concentración de COS (0-5cm/5-15cm) y (b): stock de COS ( $C_{equiv0-5cm} / C_{equiv5-15cm}$ ).  $C_{equiv}$  fue calculado utilizando la situación inalterada de cada tipo de suelo como sistema de referencia. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

### 3.3.4. Almacenaje de carbono orgánico del suelo en fracciones de tamaños de agregados

El incremento en la frecuencia del cultivo de soja se asoció con disminuciones en la cantidad de grandes macroagregados ( $>2000 \mu m$ ) a 0-5 cm del Molisol ( $P<0,0005$ ) (Figura 3.5) con un subsecuente incremento en las clases de tamaños de agregados menores ( $250-2000 \mu m$ :  $P<0,01$ ;  $53-250 \mu m$ :  $P<0,01$ ). Del mismo modo, el incremento en la frecuencia del cultivo de soja se asoció con menores cantidades de agregados  $>250 \mu m$  y, como consecuencia de ello, se incrementó la cantidad de agregados  $<250 \mu m$  ( $P<0,05$ ) (Tabla 3.2).

En el Molisol, a 5-15 cm, la mayor frecuencia del cultivo de soja provocó sólo la disminución de la cantidad de pequeños macroagregados ( $P<0,05$ ) (datos no presentados). En el Vertisol, la frecuencia del cultivo de soja no afectó la cantidad de agregados para ninguna clase de tamaños ni profundidad analizada (Tabla 3.2, Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Porcentaje de agregados >2000 μm afectado por la frecuencia de soja en 0-5 cm de profundidad. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

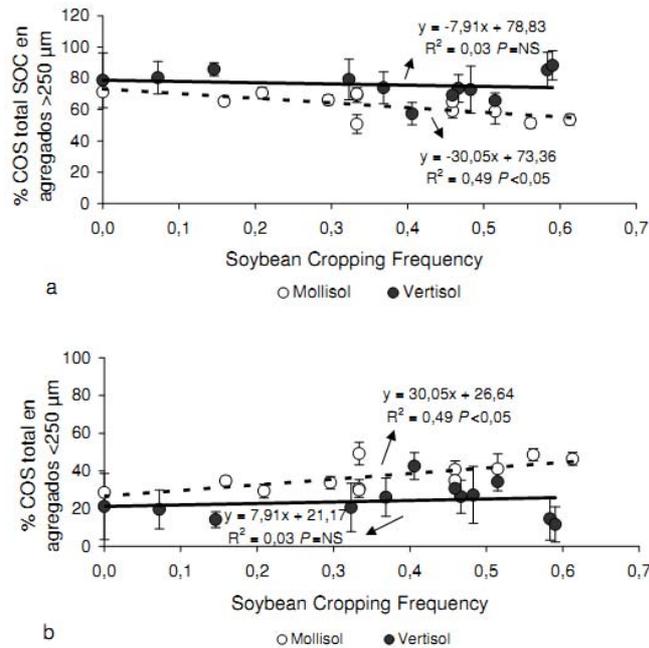
Se registró una menor concentración de COS solamente en los pequeños macroagregados ( $P < 0,05$ ) y en los microagregados ( $P < 0,005$ ) de la capa de 0-5 cm del suelo Molisol asociados al incremento de la frecuencia del cultivo de soja (datos no mostrados). En el Vertisol, fue observado un cambio significativo ( $P < 0,05$ ) en la concentración de COS solamente entre la situación inalterada y las agrícolas en todas las clases de tamaños de agregados y en ambas profundidades (datos no presentados).

**Tabla 3.2.** Frecuencia del cultivo de soja (FCS), clases de tamaños de agregados y carbono orgánico del suelo (COS) almacenados en agregados >250  $\mu\text{m}$  y <250  $\mu\text{m}$  para once lotes de producción y una situación inalterada, en un Vertisol y un Molisol de Entre Ríos, Argentina.

Suelo	Sitio	FCS	Clases de tamaños de agregados (%)						COS almacenado en agregados ( $\text{g C kg}^{-1}$ soil)			
			0-5 cm			5-15 cm			0-5 cm		5-15 cm	
			>250 $\mu\text{m}$	<250 $\mu\text{m}$	DE <sup>a</sup>	>250 $\mu\text{m}$	<250 $\mu\text{m}$	DE	>250 $\mu\text{m}$	<250 $\mu\text{m}$	>250 $\mu\text{m}$	<250 $\mu\text{m}$
Molisol	1	0	78,95	21,05	3,22	67,84	32,16	1,51	20,50	8,04	11,86	5,52
	2	0,16	79,20	20,80	2,10	87,01	12,99	3,13	20,14	10,69	16,44	4,26
	3	0,21	79,67	20,33	5,03	73,36	26,64	5,07	16,82	7,01	11,69	5,38
	4	0,30	72,17	27,83	5,74	65,04	34,96	1,69	19,10	9,70	12,75	6,89
	5	0,33	72,41	27,59	1,34	61,69	38,31	1,38	16,46	7,76	9,98	6,13
	6	0,33	58,45	41,55	4,47	64,44	35,56	2,90	12,49	10,24	9,71	5,64
	7	0,33	75,98	24,02	0,65	78,76	21,24	0,09	21,58	9,15	16,15	4,95
	8	0,46	62,26	37,74	5,70	60,25	39,75	4,50	12,13	8,37	9,25	6,67
	9	0,46	69,07	30,93	1,51	68,69	31,31	2,08	17,76	9,54	13,53	7,40
	10	0,51	66,47	33,53	8,31	66,63	33,37	0,82	11,66	8,18	9,50	5,03
	11	0,56	60,38	39,62	1,23	70,43	29,57	6,06	12,40	11,73	11,36	5,68
	12	0,61	62,78	37,22	2,37	60,17	39,83	2,51	11,80	10,20	11,20	8,07
Vertisol	13	0	72,67	27,33	12,14	78,90	21,10	1,23	41,19	12,91	29,02	10,01
	14	0,07	80,03	19,97	3,17	87,17	12,83	1,35	28,97	7,20	23,22	4,18
	15	0,15	80,86	19,14	1,87	68,39	31,61	1,96	26,84	4,52	14,26	8,31
	16	0,32	76,21	23,79	6,48	76,39	23,61	7,40	22,68	6,06	14,18	3,69
	17	0,37	74,96	25,04	5,18	85,47	14,53	3,45	21,68	8,02	18,32	2,31
	18	0,41	71,83	28,17	4,04	77,14	22,86	9,40	25,49	19,23	16,67	7,17
	19	0,46	78,23	21,77	7,64	71,08	28,92	5,47	18,74	8,26	12,64	4,46
	20	0,47	73,28	26,72	4,48	60,37	39,63	6,25	21,11	7,36	9,60	6,30
	21	0,48	78,74	21,26	8,29	81,48	18,52	10,35	23,88	9,22	18,93	5,04
	22	0,51	69,38	30,62	7,85	75,84	24,16	4,21	20,20	10,50	17,81	2,32
	23	0,58	82,68	17,32	5,56	77,85	22,15	6,45	24,59	4,27	18,22	5,45
	24	0,59	84,71	15,29	3,29	77,51	22,49	5,38	25,08	3,48	18,34	5,56

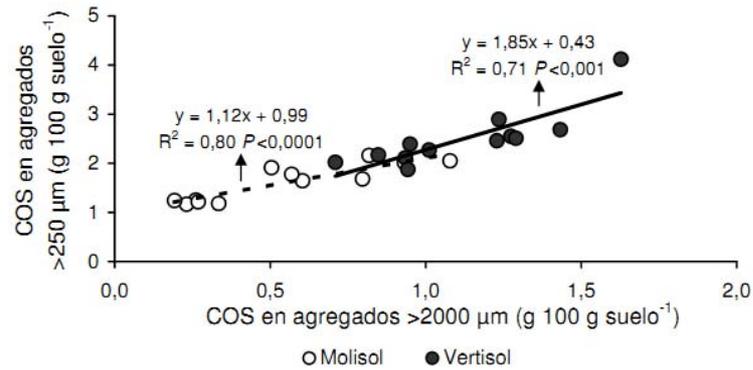
<sup>a</sup> DE: desvío estándar para cada media.

La proporción del COS total almacenada en macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ) de 0-5 cm fue significativamente reducido ( $P<0,05$ ) con incrementos en la frecuencia del cultivo de soja en el Molisol, sin evidenciarse cambios en el Vertisol (Figura 3.6a). En promedio de todos los datos, se observó que la mayor proporción de COS total se almacenó en los agregados  $>250 \mu\text{m}$ , con un rango de 50-71 % y 57-88 % en el Molisol y en el Vertisol, respectivamente. En el Molisol, el aumento de la frecuencia del cultivo de soja provocó el incremento ( $P<0,01$ ) de la proporción de COS total almacenado en los agregados  $<250 \mu\text{m}$  a 0-5 cm (Figura 3.6b) sin detectarse cambios en el Vertisol.



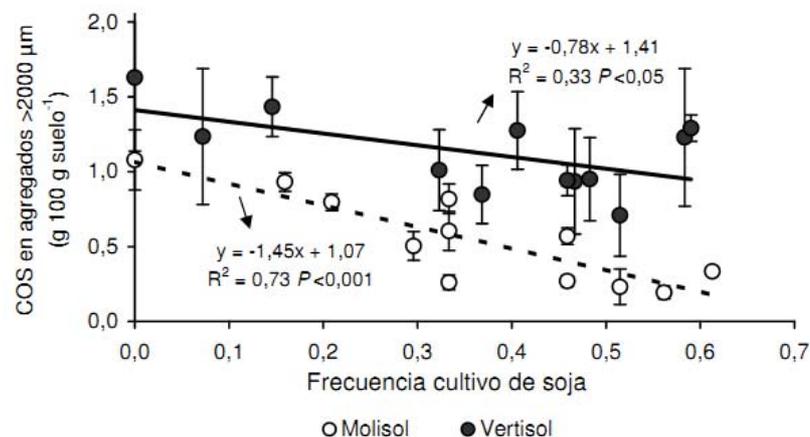
**Figura 3.6.** Proporción del COS total almacenado en clases de tamaños de agregados en función de la frecuencia del cultivo de soja a 0-5cm de profundidad, (a): en agregados  $>250 \mu\text{m}$ , y (b): en agregados  $<250 \mu\text{m}$ . Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

El almacenaje de COS en los agregados  $>250 \mu\text{m}$  se relacionó con el almacenaje en los grandes macroagregados ( $>2000 \mu\text{m}$ ) en ambos suelos a 0-5 cm (Molisol,  $P<0,0001$ ; Vertisol,  $P<0,001$ ) (Figura 3.7). Una relación similar fue encontrada a 5-15 cm (ambos suelos,  $P<0,0005$ ) (datos no presentados).



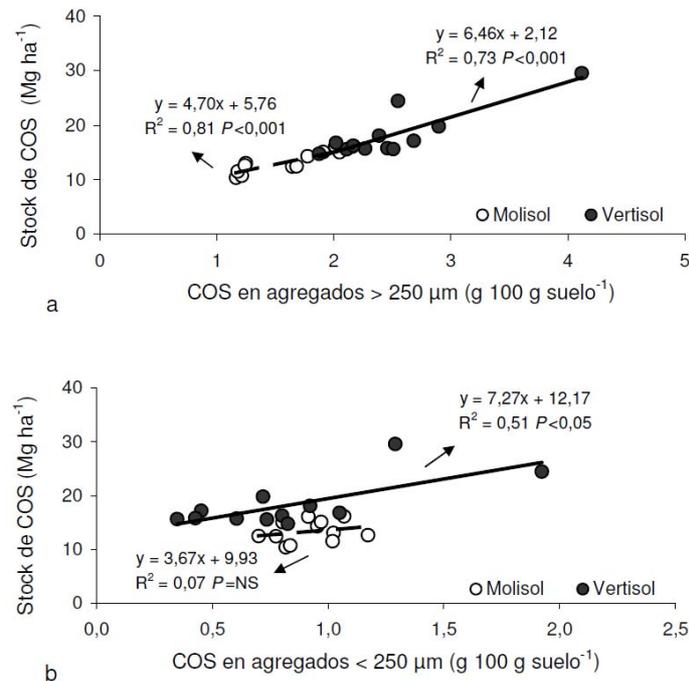
**Figura 3.7.** Relación entre el COS asociado con los grandes macroagregados (>2000 µm) y el COS asociado con los agregados >250 µm. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

El incremento de la frecuencia del cultivo de soja provocó la reducción del almacenaje de COS solamente en los agregados >250 µm en ambos suelos a 0-5 cm ( $P < 0,01$ ), en mayor medida en los grandes macroagregados (>2000 µm) del Molisol ( $P < 0,001$ ) que en el Vertisol ( $P < 0,05$ ) (Figura 3.8). A 5-15 cm, el incremento de la frecuencia del cultivo de soja no afectó el almacenaje de COS en los agregados >250 µm y en los grandes macroagregados (>2000 µm) en ninguno de los suelos evaluados (datos no presentados).



**Figura 3.8.** Almacenaje de COS en grandes macroagregados en función de la frecuencia del cultivo de soja en 0-5 cm de profundidad. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

El stock de COS ( $C_{\text{equiv}0-5\text{cm}}$ ) se relacionó con el almacenaje de COS en los macroagregados (>250 µm) ( $P < 0,001$ ) en ambos suelos (Figura 3.9a) y con el almacenaje de COS en microagregados solamente en el Vertisol ( $P < 0,05$ ) (Figura 3.9b).



**Figura 3.9.** Stock de carbono orgánico del suelo (COS) ( $C_{equiv\ 0-5}$ ) en función del almacenaje de COS; (a): en agregados  $>250\ \mu\text{m}$  y (b): en agregados  $<250\ \mu\text{m}$ . Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Línea llena indica la recta de regresión del Vertisol. Línea discontinua indica la recta de regresión del Molisol. Las flechas sobre la figura indican la ecuación asociada a cada recta de regresión.

### 3.4. Discusión

Si bien se detectaron claras diferencias en el stock de COS en masa de suelo equivalente a 0-30 cm del sistema de referencia ( $C_{equiv\ 0-30\text{cm}}$ ) entre la situación inalterada y las agrícolas, el impacto de la frecuencia del cultivo de soja sobre el stock de COS se limitó fundamentalmente a la superficie del Molisol (Figura 3.1 y 3.2a). En concordancia con estos resultados, se ha demostrado ampliamente que los cambios en el stock de COS ocurren principalmente en la superficie del suelo, donde se produce el mayor impacto de las prácticas agrícolas y de las precipitaciones (Franzluebbers, 2010), y que los cambios comienzan a ser despreciables cuando se considera una mayor profundidad en el perfil del suelo (Bowman et al., 1999; Franzluebbers, 2010).

Evidencias previas soportan estos resultados, e indican que la inclusión frecuente de soja afecta negativamente el stock (Nicoleso et al., 2008) y la concentración de COS (Studdert y Echeverría, 2000; Wright y Hons, 2004, 2005; Dou et al., 2007), sugiriendo además que la utilización de la siembra directa puede ser efectiva para mantener el stock de COS en niveles aceptables sólo si se utilizan secuencias de cultivos con una mayor proporción de gramíneas en su composición.

El incremento en la frecuencia del cultivo de soja tuvo un impacto sobre la estratificación de la concentración ( $P < 0,01$ ) y el stock de COS en el Molisol, pero no se detectaron cambios en esta variable para el suelo Vertisol (Figura 3.4a). Además, situaciones con baja frecuencia de soja se asociaron con incrementos en la proporción de macroagregados ( $>250\ \mu\text{m}$ ) en el Molisol, pero no en el Vertisol (Tabla 3.2, Figura 3.5). En concordancia con los resultados encontrados para el Molisol, se han reportado previamente reducciones en los grandes macroagregados a 0-5 cm de profundidad de secuencias que presentaron monocultivo de soja en comparación con secuencias que

incluyeron el doble cultivo trigo/soja y trigo/soja-sorgo en un experimento que combinó rotaciones con sistemas de labranzas (Wright y Hons, 2004).

A pesar de que ambos suelos evaluados presentaron iguales clases texturales para las profundidades analizadas, el Vertisol tuvo un contenido de arcilla levemente superior que el Molisol desde la superficie (Tabla 2.1), aunque con importantes diferencias en su mineralogía, lo cual puede conferirle una mayor estabilidad a los agregados. La autoestructuración producto de los ciclos de expansión y contracción de las arcillas de tipo esmectitas, una propiedad inherente de los Vertisoles, puede minimizar la estratificación esperada bajo siembra directa (Fabrizzi et al., 2009) y facilitar el restablecimiento de la estructura del suelo (Pillai y McGarry, 1999). Otra posible causa de la baja estratificación detectada en el Vertisol en comparación con el Molisol, es el ingreso de C en profundidad en el perfil por fisuras y grietas que aparecen durante los ciclos de humedecimiento-secado (Wilson, 2008). Estas características del Vertisol pueden explicar la mayor resistencia aparente a los cambios debidos a la frecuencia del cultivo de soja en las secuencias de cultivos (Figura 3.4a, b y Tabla 3.2).

La agregación es un proceso clave para mejorar el almacenaje de COS, debido a que permite protegerlo dentro de los agregados y a que reduce el acceso de los microorganismos descomponedores (Beare et al., 1994a, b). La composición de las secuencias de cultivos puede afectar la agregación a través de la cantidad, la calidad y la frecuencia de retorno de residuos de cultivos al suelo (Wright y Hons, 2005).

En éste capítulo se resaltó el impacto negativo de la frecuencia del cultivo de soja en el almacenaje de COS en los macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ) en ambos suelos a 0-5 cm ( $P<0,01$ ), mayormente en los grandes macroagregados ( $>2000 \mu\text{m}$ ) del Molisol ( $P<0,001$ ) en comparación con el Vertisol ( $P<0,05$ ) (Figura 3.8). En el Molisol, esta reducción en el almacenaje de COS en los grandes macroagregados con el incremento en la frecuencia de soja (Figura 3.8) fue conducida principalmente por la reducción en la cantidad de grandes macroagregados (Figura 3.5), debido a que no se registraron cambios en la concentración de COS para dicha clase de tamaño de agregados (datos no presentados).

Se registró una reducción significativa en el almacenaje de COS en los macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ) en el Vertisol, a pesar del escaso impacto de la frecuencia de soja sobre la agregación, lo que sugiere que una elevada frecuencia de soja en este suelo puede conducir a una reducción en el almacenaje de COS en el largo plazo. La reducción en el almacenaje de COS en los macroagregados de ambos suelos debido al incremento en la frecuencia de soja, resulta en un aporte novedoso de esta tesis, sobre todo en lo que respecta al Vertisol en el cual, a pesar del escaso impacto de la FCS sobre la agregación, se detectaron reducciones en el almacenaje de COS en los macroagregados.

Debido a que preservar la calidad del suelo es un requisito fundamental para alcanzar sistemas eco-eficientes que permitan satisfacer las crecientes necesidades humanas (Lal, 2010), es necesario reducir el impacto ambiental y desarrollar estrategias que permitan alcanzar la sustentabilidad de los sistemas. La composición de las secuencias de cultivos es por lo tanto una temática clave para mejorar el almacenaje de COS y contribuir a mitigar los elevados niveles de  $\text{CO}_2$  atmosférico.

### 3.5. Conclusiones

Los resultados demuestran que en el Molisol, la elevada frecuencia del cultivo de soja en las secuencias de cultivos puede tener un importante impacto sobre la distribución de agregados de suelo y, en consecuencia, sobre el almacenaje de COS. Además, se refuerza el concepto de que el COS juega un importante rol en la agregación de ambos suelos, aún en el Vertisol en donde el impacto sobre la agregación fue menos evidente.

A pesar de en el Vertisol el incremento en la frecuencia del cultivo de soja no afectó la agregación del suelo, se detectaron diferencias evidentes entre la situación inalterada y las agrícolas. Aunque se detectó un menor impacto de la frecuencia del cultivo de soja sobre la agregación y el stock de COS en el Vertisol, se registró una reducción significativa en el almacenaje de COS en los agregados  $>250 \mu\text{m}$ . Los resultados sugieren que en suelos como el Vertisol, en que la dinámica de la agregación es controlada principalmente por agentes inorgánicos, la elevada frecuencia de soja en las actuales secuencias de cultivos puede conducir a una reducción en el almacenaje de COS en el largo plazo.

### 3.6. Relación con las hipótesis planteadas

Los resultados alcanzados en el presente capítulo refuerzan los reportado previamente acerca del impacto negativo de la inclusión frecuente de el cultivo de soja sobre el suelo, y no proporcionan evidencias suficientes para rechazar la hipótesis 3 de esta tesis que establece que *“el aumento en la frecuencia de soja reduce la estabilidad de los agregados y, en consecuencia, el almacenaje de COS en macroagregados en mayor proporción en el Molisol que en el Vertisol”*.

### 3.7. Relación con los otros capítulos

En este capítulo se estudió cómo es afectado el almacenaje de COS en agregados por el uso frecuente del cultivo de soja y se resalta el comportamiento diferencial de los suelos evaluados.

En el próximo capítulo se plantea un ensayo de campo en donde se seleccionaron secuencias con diferentes  $\text{IIS}_m$  para evaluar el efecto de corto plazo de la cantidad, la calidad y la frecuencia de adición de residuos sobre la dinámica temporal de la agregación y el almacenaje de COS total y particulado en macroagregados.

## **Capítulo 4**

# **Efectos de la secuencia de cultivos y el tipo de suelo sobre la dinámica temporal de la agregación y los contenidos de carbono orgánico del suelo**

#### 4.1. Introducción

La formación de agregados de suelo es un proceso clave que tiene un importante rol en el mantenimiento de la calidad del suelo y la productividad de los cultivos, debido a que afecta diversos procesos físicos y biogeoquímicos como la protección del carbono orgánico del suelo (COS), el crecimiento de raíces, la erosión, la dinámica y la retención del agua y la dinámica de la comunidad microbiana, entre otros (Amezketta, 1999, Six et al., 2004). Sin embargo, la agregación del suelo es una propiedad dinámica la cual puede presentar fluctuaciones temporales causadas principalmente por la influencia del manejo de los cultivos, el tipo de suelo y el clima (Alvaro-Fuentes et al., 2008). Debido al estrecho vínculo que posee la dinámica del COS con la agregación, las variaciones temporales en la estabilidad de los agregados condicionan el almacenaje de dicho elemento en el suelo.

Las secuencias de cultivos pueden afectar la dinámica de la agregación de diferente manera, al presentar distintos tiempo de ocupación con cobertura viva, y diferir en la cantidad y la calidad de los residuos que aportan al suelo (Alvaro-Fuentes et al., 2008). Un mayor período de ocupación del suelo con cobertura vegetal viva, típico de los sistemas intensificados (Caviglia y Andrade, 2010), favorece la adición frecuente de agentes de agregación orgánicos temporarios y transitorios (Tisdall y Oades, 1982) los cuales están principalmente asociados con la formación de macroagregados (>250  $\mu\text{m}$ ) e incrementa el contenido de compartimentos lábiles del COS como el carbono orgánico particulado (COP) (Chan, 1997), estrechamente vinculados con la dinámica de la macroagregación (Cambardella y Elliot, 1992; Gale et al., 2000).

Al analizar lotes en producción en el capítulo 2 de esta tesis, se detectaron relaciones positivas entre el tiempo de ocupación con cobertura vegetal viva y la agregación y el COS, evaluado a través de índices de intensificación que resultaron simples e intuitivos (i.e. IIS u IIS<sub>m</sub>). Coincidentemente, se ha reportado que las secuencias de cultivos que reducen los períodos de barbecho, incrementan la agregación y el almacenaje de COS en comparación con secuencias basadas en un único cultivo anual (Wood et al., 1990, 1991; Peterson, et al., 1998; Sherrod et al., 2003; Alvaro-Fuentes et al., 2008).

El tipo de suelo puede ser otra de las variables que influye sobre la dinámica temporal de la agregación (Angers, 1992). En efecto, los principales agentes de agregación pueden ser diferentes de acuerdo al tipo de suelo considerado. En este sentido, el COS (Tisdall y Oades, 1982), el tipo y cantidad de arcillas (Fabrizzi et al., 2009; Novelli et al., 2011, 2013) y la acción de los óxidos de hierro y de aluminio (Bronick y Lal, 2005a; Fabrizzi et al., 2009) pueden ser los principales agentes de agregación en Molisoles, Vertisoles y Oxisoles, respectivamente.

Por otra parte, la influencia sobre el suelo de diversos factores climáticos como las precipitaciones, principalmente su potencial erosivo (i.e. el producto de la intensidad de las precipitaciones por su energía erosiva) (Wischmeier y Smith, 1978; Renard et al., 1997) y los ciclos de humedecimiento y secado pueden incrementar las variaciones temporales en la agregación (Cosentino et al., 2006; Bravo-Garza et al., 2010), sobre todo en secuencias de cultivos con prolongados períodos de barbecho donde la exposición del suelo al impacto de la gota de lluvia es mayor. Asimismo, la humedad del suelo al momento del muestreo puede condicionar los resultados de estabilidad de agregados, ya que se han reportado reducciones en esta propiedad con el aumento en el contenido de humedad gravimétrica al momento del muestreo (Perfect 1990a, 1990b; Angers, 1992; Chan et al., 1994).

Si bien la dinámica temporal de la agregación ha sido reportada previamente, las evaluaciones se han focalizado en su relación con el sistema de labranza utilizado (Álvaro-Fuentes et al., 2007, 2008), el tipo de cultivo (Perfect et al., 1990a), o el contenido de humedad de suelo al momento del muestreo (Perfect et al., 1990b, Angers, 1992). Sin embargo, la evaluación de corto plazo de las variaciones temporales de la agregación y el COS bajo secuencias de cultivos con diferente nivel de intensificación y en suelos con agentes de agregación contrastantes, no ha sido analizada previamente. Asimismo, no se ha documentado el efecto de la erosividad de las precipitaciones sobre la agregación en secuencias de cultivos con diferentes niveles de intensificación.

Dada la importancia del proceso de agregación como mecanismo de captura de COS (Six et al., 2004), el conocimiento de los factores que afectan su dinámica temporal en suelos con diferentes mecanismos de agregación, contribuirá a la generación de prácticas de manejo tendientes a incrementar los contenidos de COS y al entendimiento de los factores involucrados en las variaciones temporales de algunas propiedades de los suelos ante cambios en el nivel de intensificación de las secuencias de cultivos.

Los objetivos de este capítulo fueron: i) evaluar la dinámica temporal de la agregación y del COS en macroagregados de suelos contrastantes en su mineralogía que difieren en el nivel de intensificación de las secuencias de cultivos, ii) analizar el impacto a corto plazo de los aportes de residuos y el nivel de intensificación de las secuencias sobre las variables de agregación y el almacenaje de COS y COP en macroagregados de suelo luego de dos años de experimento, iii) establecer relaciones entre los cambios en la agregación con la erosividad de las precipitaciones y la humedad del suelo al momento del muestreo utilizando datos meteorológicos del período experimental.

## **4.2. Materiales y Métodos**

### *4.2.1. Sitio de estudio y sistemas de cultivos*

Durante el período mayo de 2008 a junio de 2010, se llevaron a cabo dos experimentos idénticos en dos sitios con tipo de suelo contrastante en su mineralogía (un Molisol y un Vertisol) situados en la Estación Experimental Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (31°50,9'S; 60°32,3'W) en la provincia de Entre Ríos.

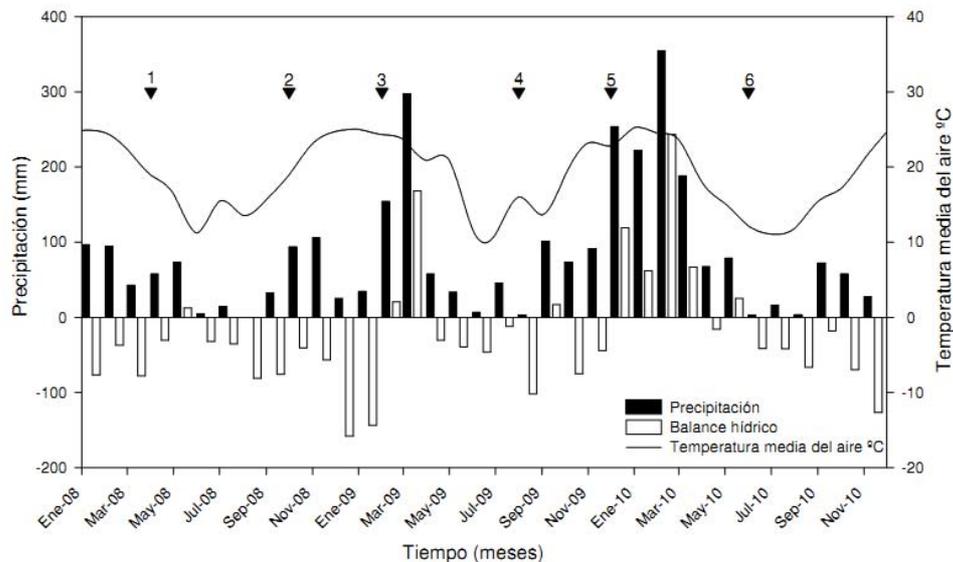
El Molisol fue clasificado como un Argiudol ácuico, Serie Tezanos Pinto (Plan Mapa de Suelos, 1998), perteneciente a la familia fina, mixta, térmica (Soil Survey Staff, 2010), mientras que el Vertisol fue clasificado como un Hapluderte típico, Serie Febre (Plan Mapa de Suelos, 1998), perteneciente a la familia fina esmectítica, térmica (Soil Survey Staff, 2010). La descripción de los suelos del sitio experimental se presenta en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Características de los suelos del sitio experimental (Plan Mapa de Suelos, 1998).

Características	Molisol		Vertisol	
Subgrupo	Argiudol ácuico <sup>a</sup>		Hapluderte típico <sup>a</sup>	
Horizonte	Ap	B <sub>21t</sub>	Ap	B <sub>21t</sub>
Profundidad (cm)	3-15	21-33	5-18	37-55
% Arena	4,5	3,9	5,6	4,9
% Limo	67,9	54,6	54,2	40,2
% Arcilla	27,6	41,5	40,2	54,9
Clase textural	Franco arcillo limoso	Arcillo limoso	Arcillo limoso	Arcilloso

<sup>a</sup> Clasificación USDA (Soil Survey Staff, 2010).

En cada tipo de suelo, se realizó un experimento utilizando un diseño en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones. Los sitios experimentales estuvieron separados por 2000 m, presentaron maíz (*Zea mays* L.) como cultivo antecesor, siembra directa por al menos 10-15 años previos al inicio del experimento y un manejo agronómico similar. Los evoluciones de las variables meteorológicas ocurridas durante el período experimental (temperatura media, precipitación y balance hídrico aparente) se presentan en la Figura 4.1, destacándose los diferentes momentos de muestreo de suelos.



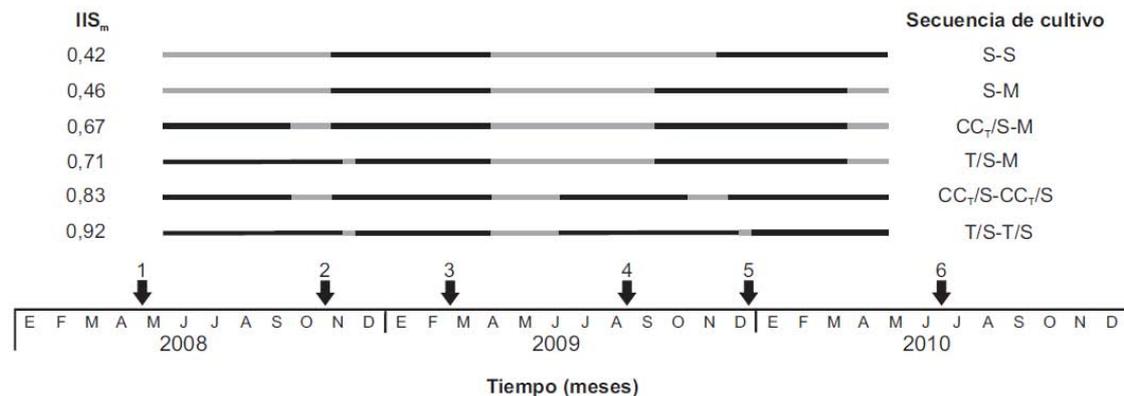
**Figura 4.1.** Temperatura media del aire mensual, precipitación total mensual y balance hídrico aparente (precipitación-evapotranspiración) registradas en el sitio experimental durante los períodos 2008-2010. Los triángulos sobre la figura indican las diferentes fechas de muestreo.

Los tratamientos consistieron en diferentes secuencias de cultivos dispuestas en parcelas de 10 x 30 m. Durante el primer año de experimento las parcelas presentaron tres secuencias de cultivos: monocultivo de soja (S) (*Glycine max* [L.] Merr.), cultivo de cobertura de trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja 2<sup>da.</sup>, (CC<sub>T</sub>/S) y trigo/soja 2<sup>da.</sup> (T/S). Al segundo año, la mitad de la parcela (5 x 30 m) se sembró con maíz (M) para poder obtener al cabo de dos años de experimento 6 secuencias de cultivos (S-S, S-M, CC<sub>T</sub>/S-M, CC<sub>T</sub>/S-CC<sub>T</sub>/S, T/S-M y T/S-T/S) con diferentes tiempos de ocupación con cobertura vegetal (i.e. IIS<sub>m</sub>) (Figura 4.2).

Para el cálculo de este índice, y de manera similar a lo comentado en el capítulo 2 de esta tesis, se utilizó el número de meses con cobertura vegetal viva en relación al

número total de meses que duró el ensayo (24 meses). Para ello se utilizó un tiempo de ocupación de 5 meses para la soja y el cultivo de cobertura de trigo, mientras que de 6 meses de ocupación al utilizar trigo para grano y maíz.

De manera adicional y tal como se describió en el capítulo 2 de esta tesis, se calculó un índice de intensificación que tuvo en cuenta la cantidad de cultivos realizados por año (IIS), presentando las secuencias S-S y S-M un índice de 1, las secuencias  $CC_T/S-M$  y T/S-M un índice de 1,5, y las secuencias  $CC_T/S-CC_T/S$  y T/S-T/S un índice de 2.



**Figura 4.2.** Diferentes secuencias de cultivos evaluadas durante el período experimental (2008-2010). S-S: soja-soja; S-M: soja-maíz;  $CC_T/S-M$ : cultivo de cobertura de trigo/soja-maíz; T/S-M: trigo/soja-maíz;  $CC_T/S-CC_T/S$ : cultivo de cobertura de trigo/soja- cultivo de cobertura de trigo/soja; T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja. IIS<sub>m</sub>: índice de intensificación de las secuencia para cada secuencia de cultivos. Líneas negras representan el período con cultivos. Líneas grises, representan el período de barbecho. Las flechas sobre la figura indican las diferentes fechas de muestreo.

#### 4.2.2. Manejo del ensayo y muestreo de biomasa

El experimento se llevó a cabo sin restricciones nutricionales. El control de malezas e insectos durante el desarrollo del cultivo se realizó mediante el uso de herbicidas e insecticidas específicos.

El cultivo de trigo, ya sea para grano o cobertura, se sembró en los meses de mayo del año 2008 y junio del 2009 con una densidad de 320 semillas  $m^{-2}$  en hileras espaciadas a 21 cm, utilizando la variedad BioINTA 3004. Por otra parte, el cultivo de soja se sembró a mediados de noviembre en el caso de realizarse como único cultivo al año, y en diciembre cuando fue sembrado como cultivo de segunda fecha de siembra. En ambos años de ensayo se utilizó una densidad de 48 semillas  $m^{-2}$  en hileras espaciadas a 0,53 m, utilizando la variedad N6411. La siembra del maíz se realizó en octubre de 2009, con una densidad de 7,7 semillas  $m^{-2}$  en hileras espaciadas a 0,53 m y utilizando el híbrido DK 747 RR.

Para poder estimar el aporte de biomasa aérea de las diferentes secuencias de cultivos al final del experimento, se realizaron muestreos de materia seca aérea durante el período de estudio. Dentro de los primeros 10 días del mes de octubre en ambas campañas se realizó un muestreo de los cultivos de cobertura de trigo (0,33  $m^2$ ) para evaluar el aporte de biomasa aérea. Inmediatamente, los cultivos de cobertura se secaron mediante la aplicación de herbicidas (mezcla de glifosato, 2,4 D y dicamba).

Durante el desarrollo del cultivo de soja y para los dos años evaluados, se realizó un muestreo de biomasa aérea (0,73  $m^2$ ) coincidente con el estadio fenológico R5,5

(Fehr y Caviness, 1977), momento en que se produce la máxima expansión foliar del cultivo (Herman, 1985). Este muestreo se llevó a cabo para poder estimar el aporte de hojas al suelo ya que al momento de la cosecha no es posible realizar esta estimación por la abscisión foliar completa que se registra en este cultivo. En el estadio R8 (Fehr y Caviness, 1977), se realizó un nuevo muestreo de biomasa aérea del cultivo ( $0,73 \text{ m}^2$ ).

En el caso del maíz, se realizó un muestreo de biomasa aérea coincidente con el estadio fenológico R6 (Ritchie y Hanway, 1982) recolectando 5 plantas consecutivas dentro de cada parcela. En todos los casos, se descontó la biomasa de granos para obtener la biomasa aérea aportada por los residuos de cosecha.

#### 4.2.3. Muestreo y análisis de suelos

Para evaluar la dinámica temporal de la agregación y del COS, se recolectaron muestras de suelo en 6 fechas diferentes (abril 2008; octubre 2008; febrero 2009; agosto 2009; diciembre 2009 y junio de 2010) (Figuras 4.1 y 4.2).

En cada fecha de muestreo, se colectaron dos replicas de muestras de suelo no disturbadas a 0-5 y 5-15 cm de profundidad utilizando pala de punta y luego se compusieron en una sola muestra. Adicionalmente, en cada parcela y fecha de muestreo se recolectaron al menos diez submuestras de suelo (2 cm diámetro) a las mismas profundidades descritas anteriormente, se secaron al aire y tamizaron por 2 mm. Una alícuota de dicha muestra se molió finamente en mortero y tamizó por 0,5 mm para su posterior análisis de COS. Se determinó la densidad aparente (Dap) utilizando el método del cilindro (Porta Casanellas et al., 1999) en cada parcela experimental a 0-5 y 5-15 cm de profundidad y en dos diferentes momentos del experimento: inicio (abril 2008) y fin (junio 2010). Se utilizaron cilindros de  $68,7 \text{ cm}^3$  (3 cm alto, 5,4 cm diámetro).

El tratamiento de las muestras para evaluar los agregados estables al agua fue idéntico al descrito en los capítulos 2 y 3 de esta tesis. Las muestras de suelo no disturbadas fueron desterronadas manualmente siguiendo las líneas de fracturas naturales, se tamizaron por 10 mm, se removieron los restos de raíces y tallos presentes, se secaron al aire y se almacenaron a temperatura ambiente para su posterior análisis.

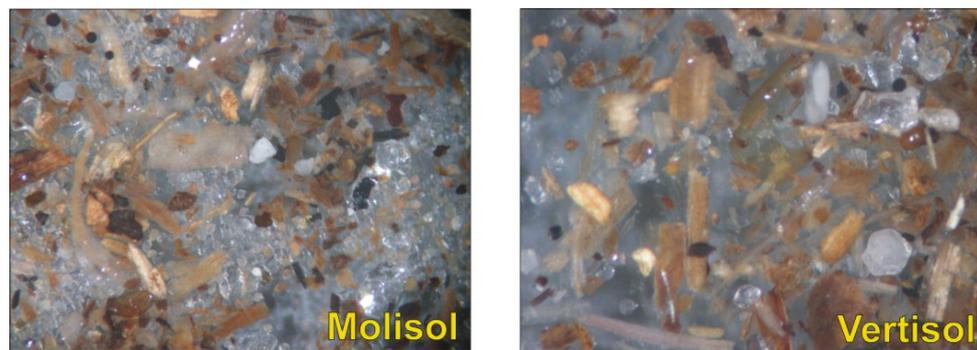
Los agregados estables al agua se separaron por tamizado en húmedo utilizando la metodología descrita por Wright y Hons (2004) con modificaciones (Capítulo 2 y 3). Se obtuvieron cuatro tamaños de agregados: grandes macroagregados ( $>2000 \mu\text{m}$ ), pequeños macroagregados (250-2000  $\mu\text{m}$ ), microagregados (53-250  $\mu\text{m}$ ) y la fracción asociada con minerales ( $<53 \mu\text{m}$ ). Esta última fracción se obtuvo de la diferencia entre el suelo inicial (100 g) y la suma de las tres fracciones de tamaños de agregados ( $>2000 \mu\text{m} + 250-2000 \mu\text{m} + 53-250 \mu\text{m}$ ).

Para los fines de este capítulo, la dinámica temporal de la agregación fue caracterizada a través de la evaluación del diámetro medio ponderado de los agregados de suelo por tamizado en húmedo ( $\text{DMP}_{\text{TH}}$ ). Tal como se comentó en el capítulo 2, el  $\text{DMP}_{\text{TH}}$  se calculó como la suma de la fracción de masa de suelo remanente sobre cada tamiz, multiplicada por la apertura media de dos tamices adyacentes.

Luego de la determinación de los agregados estables, se juntaron los grandes macroagregados ( $>2000 \mu\text{m}$ ) y los pequeños macroagregados (250-2000  $\mu\text{m}$ ) de los muestreos 1, 2, 5 y 6, y se obtuvo una muestra compuesta de macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ). Una alícuota de dicha muestra compuesta se molió finamente en mortero, se

tamizó por 0,5 mm y se utilizó para la determinación de COS asociado a los macroagregados. La determinación de la concentración de COS en las muestras totales y en las muestras compuestas de macroagregados se realizó por combustión seca, utilizando un autoanalizador LECO modelo TRU SPEC (Leco Corp., St. Joseph, MI, USA).

Las muestras compuestas de macroagregados (>250  $\mu\text{m}$ ), se utilizaron para analizar el contenido de COP de acuerdo con la metodología propuesta por Cambardella y Elliot (1992) con modificaciones. En un recipiente se colocaron 15 g de suelo seco provenientes de los macroagregados, se les agregaron 30 mL de agua destilada, 2 bolillas de vidrio y luego se agitó durante 3 h. A esta dispersión se la tamizó en húmedo utilizando un tamiz de 53  $\mu\text{m}$ . El tiempo de agitado fue determinado por un ensayo previo, lográndose la dispersión completa de las muestras en ambos suelos (Figura 4.3).



**Figura 4.3.** Fotografía de la fracción retenida sobre el tamiz de 53  $\mu\text{m}$  para la determinación del carbono orgánico particulado (COP), mostrando la dispersión alcanzada con 3 h de agitado en ambos suelos evaluados.

Una alícuota del material retenido sobre el tamiz de 53  $\mu\text{m}$  se molió finamente en un mortero y se determinó por combustión seca el contenido de COP asociado a los macroagregados, utilizando el autoanalizador LECO.

En las muestras de suelo del Vertisol, se detectó la presencia de carbonato de calcio, el cual tuvo que ser removido para corregir el peso de los agregados y la concentración de COS. Las concreciones de carbonato de calcio visibles en cada muestra de suelo y en los agregados >250  $\mu\text{m}$  fueron removidos por tamizado y el remanente fue determinado por el método del calcímetro descrito por Loeppert y Suárez (1996).

Para analizar los cambios temporales en el COS se utilizó su concentración en vez de su stock, ya que no se observaron diferencias en la Dap entre las secuencias de cultivos para ninguno de los suelos analizados, detectándose sólo diferencias entre las profundidades evaluadas ( $P < 0,05$ ). La Dap promedio fue de 1,2  $\text{Mg m}^{-3}$  y 1,41  $\text{Mg m}^{-3}$  en 0-5 y 5-15 cm del Molisol respectivamente, mientras que fue de 1,08  $\text{Mg m}^{-3}$  y 1,17  $\text{Mg m}^{-3}$  en 0-5 y 5-15 cm del Vertisol respectivamente.

De manera similar a lo mencionado en el capítulo 3 de esta tesis, el almacenaje de COS en la fracción de macroagregados (>250  $\mu\text{m}$ ) fue obtenida como el producto de la concentración de COS en los macroagregados (%) y la masa de la fracción de macroagregados (g). Por otra parte, para calcular el COP almacenado en los macroagregados, se tuvo en cuenta la concentración de COP en la fracción >53  $\mu\text{m}$  y la

masa de suelo inicial retenida sobre el tamiz de 53  $\mu\text{m}$  luego del tamizado, expresando los resultados como g de COP 100 g suelo<sup>-1</sup> proveniente de los macroagregados (>250  $\mu\text{m}$ ). Adicionalmente, se calculó la proporción del COS almacenado en los macroagregados que se encuentra como COP. Para ello se relacionaron los valores de COP (g 100 g suelo<sup>-1</sup>) y de COS en macroagregados (g 100 g suelo<sup>-1</sup>).

La evaluación de la dinámica temporal del  $\text{DMP}_{\text{TH}}$  y el COS total en todos los muestreos, y el COS y COP almacenado en los macroagregados de los muestreos 1, 2, 5 y 6, se realizó en función del momento del muestreo y de los coeficientes de variación (CV) entre las diferentes secuencias de cultivos a largo del período experimental.

Las relaciones entre el aporte de biomasa y el nivel de intensificación con los parámetros de agregación determinados y con el almacenaje de COS y COP en macroagregados se realizaron con los resultados del muestreo final del experimento (junio 2010).

#### *4.2.4. Relación entre algunos factores meteorológicos y la dinámica temporal de la agregación del suelo*

Para evaluar el impacto de algunos factores meteorológicos sobre la agregación, se relacionaron los  $\text{DMP}_{\text{TH}}$  y las diferentes proporciones de agregados que se obtuvieron del tamizado en húmedo (>2000  $\mu\text{m}$ , 250-2000  $\mu\text{m}$ , 53-250  $\mu\text{m}$  y <53  $\mu\text{m}$ ), con la humedad de suelo al momento del muestreo y con el factor de erosividad de las precipitaciones, la cual describe la habilidad de las precipitaciones para erosionar el suelo y surge del producto de la energía de una tormenta (E) por su intensidad máxima en 30 min ( $I_{30}$ ) (Wischmeier y Smith, 1978). Si bien la sumatoria “anual” de los productos de los  $E \cdot I_{30}$  de cada evento de precipitación pluvial mayor a 12,7 mm ha sido utilizado para calcular el factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, los factores de erosividad por precipitación pluvial ( $E \cdot I_{30}$ ) pueden sumarse para cualquier período buscando proporcionar una medida numérica de la erosividad por precipitación pluvial durante esos períodos.

El contenido de humedad volumétrica al momento del muestreo de suelos para todas las fechas de muestreo y para una profundidad de 0-15 cm, se estimó utilizando el método del doble  $K_c$ , propuesto por Allen et al. (2006) (i.e. FAO-56). Este método permite estimar la evapotranspiración del cultivo y la evaporación del suelo utilizando datos meteorológicos diarios, la cual se obtiene del producto de un coeficiente del cultivo ( $K_{cb}$ ) y un coeficiente de evaporación del suelo ( $K_e$ ), y ha sido utilizado con éxito para estimar la humedad de suelo durante la estación de crecimiento de los cultivos (Monzon et al., 2006).

Para relacionar el factor de erosividad de las precipitaciones con las variables de agregación sólo se utilizaron las muestras de 0-5 cm de profundidad, debido a que es la capa de suelo principalmente afectada por el impacto de la gota de lluvia. Para el cálculo del factor de erosividad de las precipitaciones, se utilizaron datos provenientes del observatorio meteorológico de la Estación Experimental Paraná del INTA para el período del experimento. Mediante las lecturas de fajas pluviográficas de eventos de precipitaciones diarias mayores a 12,7 mm, se determinó el factor de erosividad de la precipitación diario. Posteriormente, se acumularon los valores de los factores de precipitación para el período comprendido entre dos muestreos sucesivos.

Para los fines de este capítulo se relacionaron los  $\text{DMP}_{\text{TH}}$  y las diferentes proporciones de agregados que se obtuvieron del tamizado en húmedo con la sumatoria

de los factores de erosividad diarios del período anterior al muestro de suelos y con el contenido de humedad volumétrica estimado al momento del muestreo de suelos.

#### 4.2.5. Análisis estadísticos

Para comparar las diferentes secuencias de cultivos se utilizó un análisis de varianza para cada tipo de suelo. Las diferencias entre las medias se analizaron a través de un test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05). Para evaluar la variación temporal del  $DMP_{TH}$  en cada tipo de suelo, la concentración de COS total, y el COS y COP almacenado en los macroagregados se emplearon los coeficientes de variación (CV) resultantes de los promedios y desvíos estándar de todos los muestreos para una misma secuencia de cultivo y bloque. Previo a los análisis estadísticos, se realizaron las pruebas de homogeneidad de variancias y de normalidad a los datos obtenidos de cada tipo de suelo.

Las relaciones entre la erosividad de las precipitaciones y la humedad del suelo al momento del muestreo con las variables de agregación determinadas, se analizaron por medio de correlaciones y regresiones.

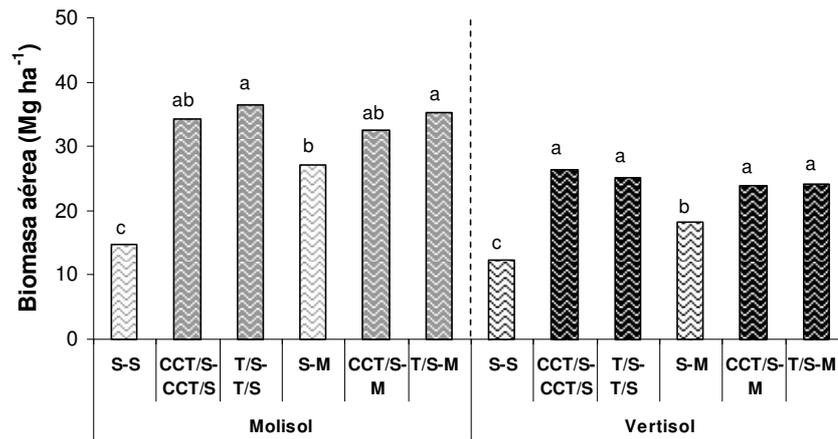
Todos los análisis se realizaron con el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2011).

### 4.3. Resultados

#### 4.3.1. Aporte de biomasa aérea de las secuencias de cultivos

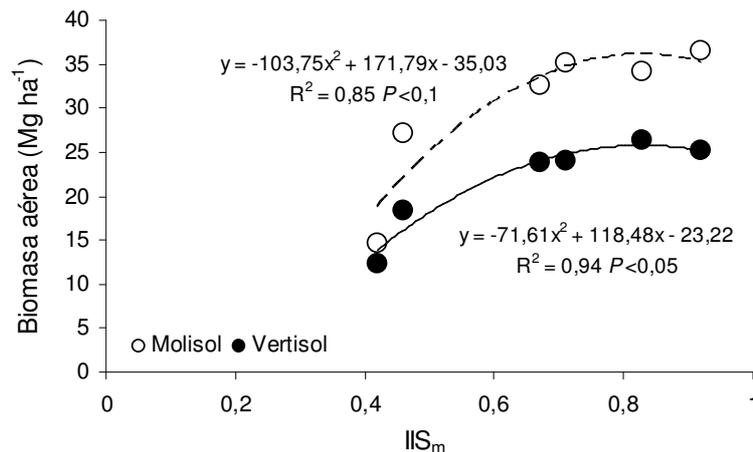
La materia seca aérea acumulada durante los 2 años de experimento fue diferente entre los suelos y secuencias de cultivos evaluadas. Promediando las diferentes secuencias de cultivos el aporte de materia seca fue de 30 Mg ha<sup>-1</sup> en el Molisol, y de 22 Mg ha<sup>-1</sup> en el Vertisol.

En ambos tipos de suelo, la inclusión del maíz en el segundo año de ensayo en las secuencias T/S-M y CC<sub>T</sub>/S-M incrementó de manera significativa los aportes de biomasa aérea en comparación con las secuencias menos intensificadas (S-S y S-M). Sin embargo, las secuencias de cultivos que en el segundo año incluyeron trigo, ya sea para grano o cobertura (CC<sub>T</sub>/S-CC<sub>T</sub>/S y T/S-T/S) presentaron aportes de residuos tan elevados como las que incluyeron al maíz (T/S-M y CC<sub>T</sub>/S-M) (Figura 4.4).



**Figura 4.4.** Aporte de biomasa aérea acumulada durante el período experimental (2008-2010) en seis secuencias de cultivos y dos suelos. S-S: soja-soja; CC<sub>T</sub>/S-CC<sub>T</sub>/S: cultivo de cobertura de trigo/soja-cultivo de cobertura de trigo/soja; T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja; S-M: soja-maíz; CC<sub>T</sub>/S-M: cultivo de cobertura de trigo/soja-maíz; T/S-M: trigo/soja-maíz. Las barras claras dentro de cada suelo indican las secuencias con menores índices de intensificación en cada tipo de suelo. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre secuencias de cultivos para cada tipo de suelo, de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05).

La regresión entre el índice de intensificación de las secuencias (IIS<sub>m</sub>) y el aporte de biomasa aérea para cada tipo de suelo permitió detectar una estrecha asociación entre las variables analizadas (Figura 4.5). Con el nivel de intensificación más bajo (0,42), los aportes de biomasa aérea entre los suelos evaluados fueron muy similares (Molisol: 14,7 Mg ha<sup>-1</sup>; Vertisol: 12,2 Mg ha<sup>-1</sup>). Sin embargo, al incrementarse nivel de intensificación los aportes de biomasa fueron superiores en el Molisol en comparación con el Vertisol. A igual IIS<sub>m</sub>, con niveles superiores a 0,42 la diferencia en aportes de biomasa entre los suelos fue cercana a los 10 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 4.5).

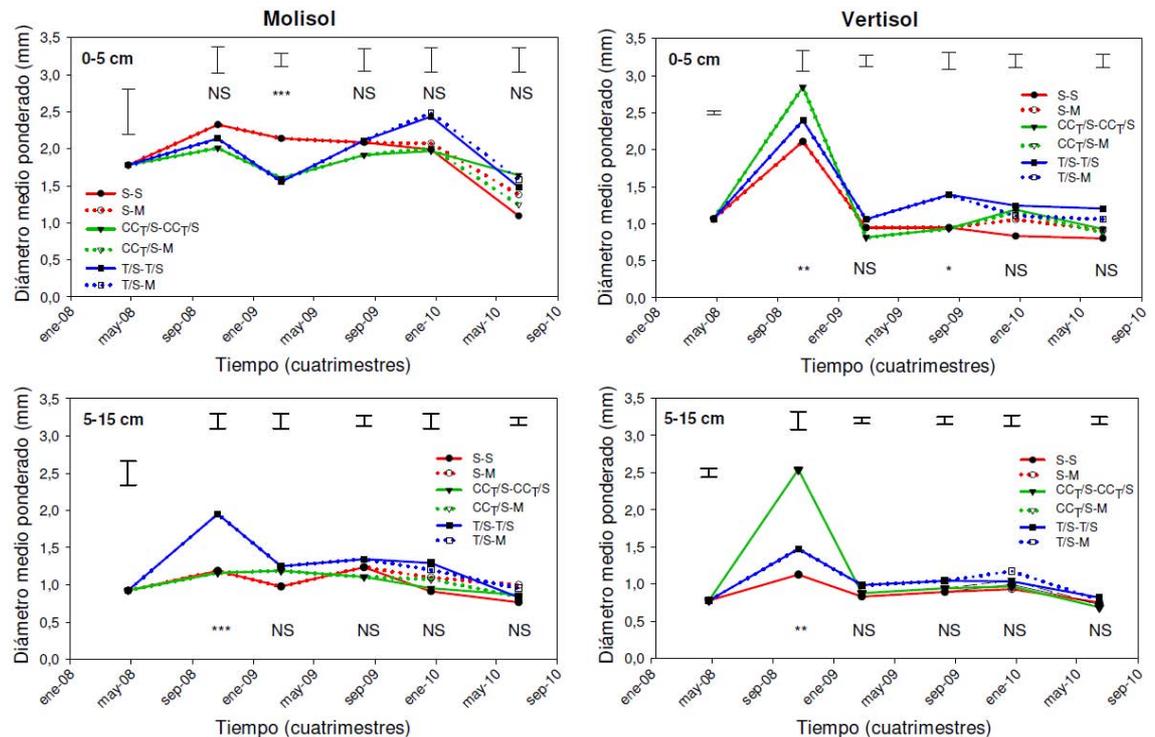


**Figura 4.5.** Relación entre el aporte de biomasa aérea acumulada durante el período experimental (2008-2010) y el índice de intensificación de las secuencias (IIS<sub>m</sub>). Círculos vacíos indican el Molisol. Círculos llenos indican el Vertisol. Línea continua: Vertisol. Línea discontinua: Molisol.

#### 4.3.2. Dinámica temporal del diámetro medio ponderado de los agregados por tamizado en húmedo

En general, al analizar para cada suelo el promedio de las secuencias de cultivos y profundidades analizadas, se detectaron dos picos en el diámetro medio ponderado por tamizado en húmedo ( $DMP_{TH}$ ), los cuales se concentraron en las estaciones de primavera del año 2008 e inicios de verano del año 2009, mientras que los valores más bajos de  $DMP_{TH}$  se registraron en las estaciones de otoño de 2009 e invierno de 2010 (Figura 4.6).

Al analizar los datos dentro de cada profundidad surgieron algunos comportamientos diferenciales entre los tratamientos evaluados. En la segunda fecha de muestreo (octubre 2008), el  $DMP_{TH}$  de la secuencia S-S a 0-5 cm del Molisol mostró un pico de agregación, el cual se mantuvo elevado en la tercera fecha de muestreo diferenciándose significativamente de las secuencias más intensificadas (Figura 4.6). Sin embargo, en las fechas de muestreo subsiguientes, el  $DMP_{TH}$  para la secuencia S-S disminuyó progresivamente hasta alcanzar el menor valor en comparación con el resto de las secuencias de cultivos en la última fecha de muestreo (junio 2010) (Figura 4.6).



**Figura 4.6.** Dinámica temporal del diámetro medio ponderado en seis secuencias de cultivos, dos suelos y dos profundidades durante el período de estudio (de abril de 2008 a junio de 2010). S-S: soja-soja (línea roja continua); S-M: soja-maíz (línea roja discontinua); CC<sub>T</sub>/S-CC<sub>T</sub>/S: cultivo cobertura de trigo/soja-cultivo cobertura de trigo/soja (línea verde continua); CC<sub>T</sub>/S-M: cultivo cobertura de trigo/soja-maíz (línea verde discontinua); T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja (línea azul continua); T/S-M: trigo/soja-maíz (línea azul discontinua). La comparación de las medias entre las secuencias de cultivos para una misma fecha de muestreo se realizó mediante un test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05) y la significancia se indicó como NS; \*, \*\*, \*\*\* (no significativo,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada fecha de muestreo.

A pesar de que en el Molisol a 0-5 cm de profundidad no se detectaron diferencias significativas entre secuencias de cultivos en las diferentes fechas de muestreo (excepto febrero de 2009), los mayores  $DMP_{TH}$  al final del ensayo se registraron en las secuencias que incluyeron al trigo, ya sea para grano o cobertura (a excepción de  $CC_T/S-M$ ) (Figura 4.6).

A 5-15 cm de profundidad del Molisol, el  $DMP_{TH}$  para la secuencia T/S registró un pico de agregación en la segunda fecha de muestreo diferenciándose significativamente del resto de las secuencias de cultivos evaluadas. Sin embargo, el mencionado pico de agregación fue temporario y disminuyó en la siguiente fecha de muestreo (febrero 2009), demostrando un comportamiento estable y similar al resto de las secuencias de cultivos en las fechas de muestreos subsiguientes (Figura 4.6).

En ambas profundidades del Vertisol se registró una tendencia similar a la observada en el Molisol a 5-15 cm de profundidad. Los mayores  $DMP_{TH}$  se detectaron en la segunda fecha de muestreo y en las secuencias con cultivo de cobertura de trigo (Figura 4.6). En 0-5 cm del Vertisol la secuencia T/S se diferenció significativamente del resto de las secuencias de cultivos evaluadas en el cuarto muestreo (agosto 2009) pero no en los muestreos subsiguientes (Figura 4.6). De manera similar a lo observado para el Molisol al final del ensayo, en el Vertisol y a 0-5 cm los menores  $DMP_{TH}$  se registraron en la secuencia S-S, aunque sin diferencias significativas con el resto de las secuencias evaluadas.

Cuando se consideraron todas las secuencias de cultivos y fechas de muestreo para cada suelo y profundidad evaluada, el  $DMP_{TH}$  fue en promedio 1,9 mm y 1,1 mm en el Molisol a 0-5 cm y 5-15 cm respectivamente, mientras que en el Vertisol fue en promedio 1,3 mm y 1 mm a 0-5 cm y 5-15 cm respectivamente.

Cuando se evaluaron los coeficientes de variación (CV) del  $DMP_{TH}$  de las distintas secuencias de cultivos analizadas a lo largo del experimento, se detectó un comportamiento contrastante entre los suelos y profundidades analizadas. Para 0-5 cm del Molisol, no se detectaron diferencias estadísticas significativas en el CV para las secuencias de cultivos evaluadas, aunque los mayores valores de CV se registraron en la secuencia S-S (26%), mientras que los menores CV se registraron en las secuencias que incluyeron al trigo como cultivo de cobertura (16%) (Tabla A.4). Sin embargo, a 5-15 cm de profundidad los mayores CV para el  $DMP_{TH}$  se registraron en las secuencias T/S-M y T/S-T/S (33% y 32%, respectivamente), difiriendo significativamente del resto de las secuencias de cultivos, que promediaron 16% (Tabla A.4).

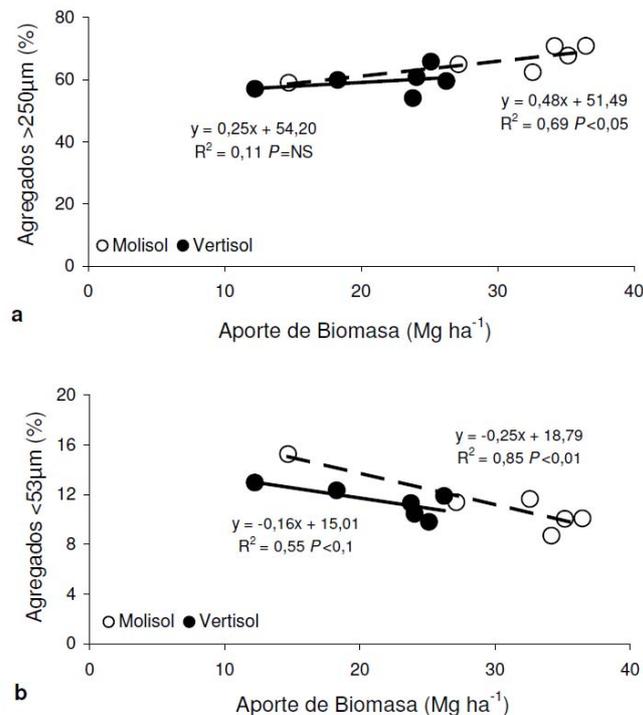
Por otra parte, en ambas profundidades evaluadas del Vertisol, los mayores CV para el  $DMP_{TH}$  se registraron en las secuencias que incluyeron al trigo como cultivo de cobertura (62 % en 0-5 cm y 49 % en 5-15 cm), lo cual se evidencia en el notable incremento en el  $DMP_{TH}$  detectado en el muestreo 2 (Figura 4.6, Tabla A.4). Si bien no hubo una relación clara entre las secuencias de cultivos y los coeficientes de variación en este suelo, los menores CV se registraron en 5-15 cm y en las secuencias S-S y S-M, las cuales presentaron un bajo índice de intensificación (CV promedio: 15 %) (Tabla A.4).

### 4.3.3. Relación entre el aporte de biomasa aérea, el nivel de intensificación y la agregación

En el Molisol a 0-5 cm de profundidad se detectó una asociación positiva ( $P<0,05$ ) entre el aporte de biomasa aérea y el porcentaje de macroagregados ( $>250\ \mu\text{m}$ ) al final del experimento (Figura 4.7a), y una relación negativa estrecha ( $P<0,01$ ) entre el aporte de biomasa aérea y el porcentaje de agregados  $<53\ \mu\text{m}$  (Figura 4.7b). Asimismo, el porcentaje de grandes macroagregados ( $>2000\ \mu\text{m}$ ) y el diámetro medio ponderado de los agregados por tamizado en húmedo ( $\text{DMP}_{\text{TH}}$ ) se asociaron de manera positiva con el aporte de biomasa aérea, aunque débilmente ( $P<0,1$ ).

Por otra parte, en el Vertisol a 0-5 cm de profundidad el impacto del aporte de biomasa aérea sobre la agregación fue menos evidente que en el Molisol (Figura 4.7 a y b), sólo detectándose una escasa asociación negativa ( $P<0,1$ ) entre el porcentaje de agregados  $<53\ \mu\text{m}$  y el incremento en los aportes de residuos aéreos (Figura 4.7 b).

En 5-15 cm de profundidad de ambos suelos, las distintas variables de agregación evaluadas no se relacionaron con el aporte de biomasa aérea (datos no presentados).

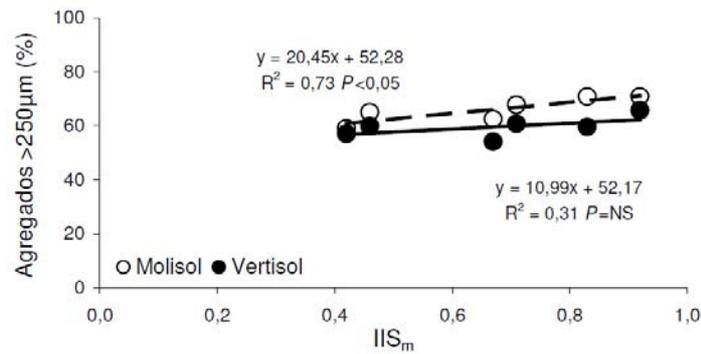


**Figura 4.7.** Relación entre a) el porcentaje de macroagregados de 0-5 cm de profundidad al final del experimento, y b) el porcentaje de fracción  $<53\ \mu\text{m}$  de 0-5 cm de profundidad al final del experimento y el aporte de biomasa aérea en materia seca durante el período experimental. Círculos vacíos indican suelo Molisol. Círculos llenos indican suelo Vertisol. Línea continua: Vertisol. Línea discontinua: Molisol.

La intensificación de las secuencias de cultivos ( $\text{IIS}_m$ ) se asoció de manera positiva con el porcentaje de macroagregados ( $>250\ \mu\text{m}$ ), aunque sólo en el Molisol a 0-5 cm de profundidad. (Figura 4.8). Por otra parte, en este suelo y a esa profundidad, un mayor nivel de intensificación ( $\text{IIS}_m$ ) se asoció con menores porcentajes de

microagregados (53-250  $\mu\text{m}$ ) y de la fracción <53  $\mu\text{m}$ , aunque dicha asociación fue débil ( $P < 0,1$ ).

En el Vertisol, al igual que para el caso del aporte de biomasa, el impacto de la intensificación sobre la agregación fue menos evidente que en el Molisol, detectándose asociaciones menos estrechas. En efecto, se registró una asociación positiva entre la intensificación y el  $\text{DMP}_{\text{TH}}$  y los grandes macroagregados (>2000  $\mu\text{m}$ ) y negativa con la fracción <53  $\mu\text{m}$ , aunque la asociación entre dichas variables fue más débil ( $P < 0,1$ ) que en el Molisol.



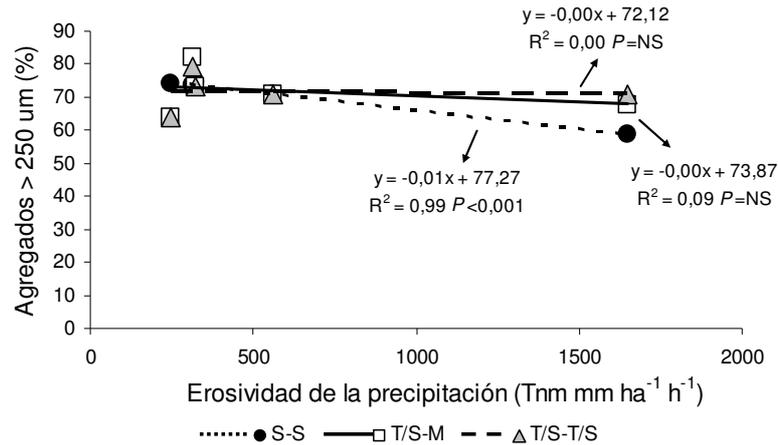
**Figura 4.8.** Relación entre el índice de intensificación de las secuencias ( $\text{IIS}_m$ ) y el porcentaje de macroagregados de 0-5 cm de profundidad al final del experimento. Círculos vacíos indican suelo Molisol. Círculos llenos indican suelo Vertisol. Línea continua: Vertisol. Línea discontinua: Molisol.

#### 4.3.4. Relación entre la erosividad de las precipitaciones, la humedad de suelo al momento del muestreo y la agregación

Cuando se evaluó el impacto de la erosividad de las precipitaciones entre dos períodos de muestreo sucesivos y las distintas variables de agregación analizadas, sólo se detectaron asociaciones en el Molisol a 0-5 cm de profundidad.

En este suelo, se observó una asociación negativa entre el  $\text{DMP}_{\text{TH}}$  ( $P < 0,05$ ), los agregados >2000  $\mu\text{m}$  ( $P < 0,05$ ) y los macroagregados (>250  $\mu\text{m}$ ) ( $P < 0,001$ ), y positiva ( $P < 0,01$ ) entre los agregados de 53-250  $\mu\text{m}$  con el factor de erosividad de las precipitaciones para las secuencias S-S y S-M, las cuales presentaron los menores índices de intensificación (0,42 y 0,46, respectivamente). La fracción <53  $\mu\text{m}$  se asoció negativamente ( $P < 0,01$ ) con la erosividad de las precipitaciones sólo en la secuencia S-S.

En la figura 4.9 se presenta a manera ilustrativa el efecto de la erosividad de las precipitaciones sobre los macroagregados de secuencias con bajo (S-S), intermedio (T/S-M) y alto (T/S-T/S) índice de intensificación de las secuencias ( $\text{IIS}_m$ ).

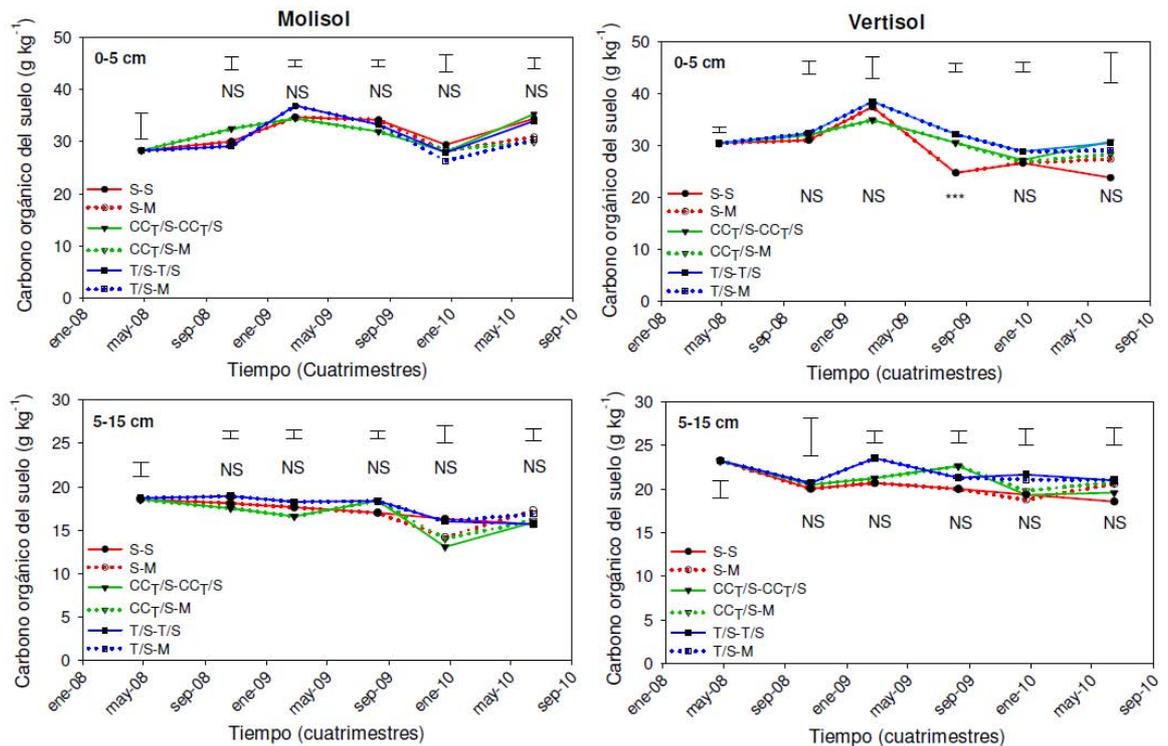


**Figura 4.9.** Relación entre el factor de erosividad de las precipitaciones y el porcentaje de macroagregados para tres secuencias de cultivos de un Molisol a 0-5 cm de profundidad. Círculos indican la secuencia soja-soja (S-S, línea punteada). Cuadrados indican la secuencia trigo/soja-maíz (T/S-M, línea continua). Triángulos indican la secuencias trigo/soja-trigo/soja (T/S-T/S, línea con guiones).

En este experimento, el contenido de humedad de suelo al momento del muestreo, estimado a través del método del doble Kc (Allen et al., 2006), no tuvo un efecto notorio sobre la agregación del suelo, ya que no se detectó una relación significativa entre el contenido hídrico y las variables de agregación en los diferentes suelos y profundidades analizadas. Sólo se detectó una asociación negativa ( $P < 0,05$ ) entre el contenido de humedad y la fracción asociada a minerales ( $< 53 \mu\text{m}$ ) en ambos suelos (datos no presentados).

#### 4.3.5. Dinámica temporal de la concentración de COS

La concentración de COS presentó una escasa variación temporal a lo largo de los períodos de muestreo, aunque fue mayor a 0-5 cm de profundidad de ambos suelos, en comparación con 5-15 cm que fue muy estable en el tiempo. Sólo se detectaron diferencias estadísticas significativas en el muestreo de agosto de 2009 y para 0-5 cm de profundidad del Vertisol. En dicho muestreo la secuencia menos intensificada (S-S) presentó la menor concentración de COS ( $P < 0,001$ ) (Figura 4.10).



**Figura 4.10.** Dinámica temporal de la concentración de carbono orgánico del suelo en seis secuencias de cultivos, dos suelos y dos profundidades durante el periodo de estudio (de Abril de 2008 a Junio de 2010). S-S: soja-soja (línea roja continua); S-M: soja-maíz (línea roja discontinua);  $CC_T/S-CC_T/S$ : cultivo cobertura de trigo/soja-cultivo cobertura de trigo/soja (línea verde continua);  $CC_T/S-M$ : cultivo cobertura de trigo/soja-maíz (línea verde discontinua); T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja (línea azul continua); T/S-M: trigo/soja-maíz (línea azul discontinua). La comparación de las medias entre las secuencias de cultivos para una misma fecha de muestreo se realizó mediante un test de Tukey ( $P < 0,05$ ) y la significancia se indicó como NS; \*, \*\*, \*\*\* (no significativo,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada fecha de muestreo.

En 0-5 cm del Molisol la concentración de COS presentó un rango de 26,3-36,9  $g\ kg^{-1}$ , y en 5-15 cm el rango observado fue de 13,1-18,9  $g\ kg^{-1}$ . En el Vertisol a 0-5 cm la concentración de COS presentó un rango de valores de 23,8-38,5  $g\ kg^{-1}$ , y en 5-15 cm el rango observado fue de 18,6-23,6  $g\ kg^{-1}$ . Sin embargo, promediando las concentraciones de COS en todo el ensayo para cada profundidad analizada, no se registraron diferencias estadísticas significativas en la concentración de COS entre las diferentes secuencias de cultivos.

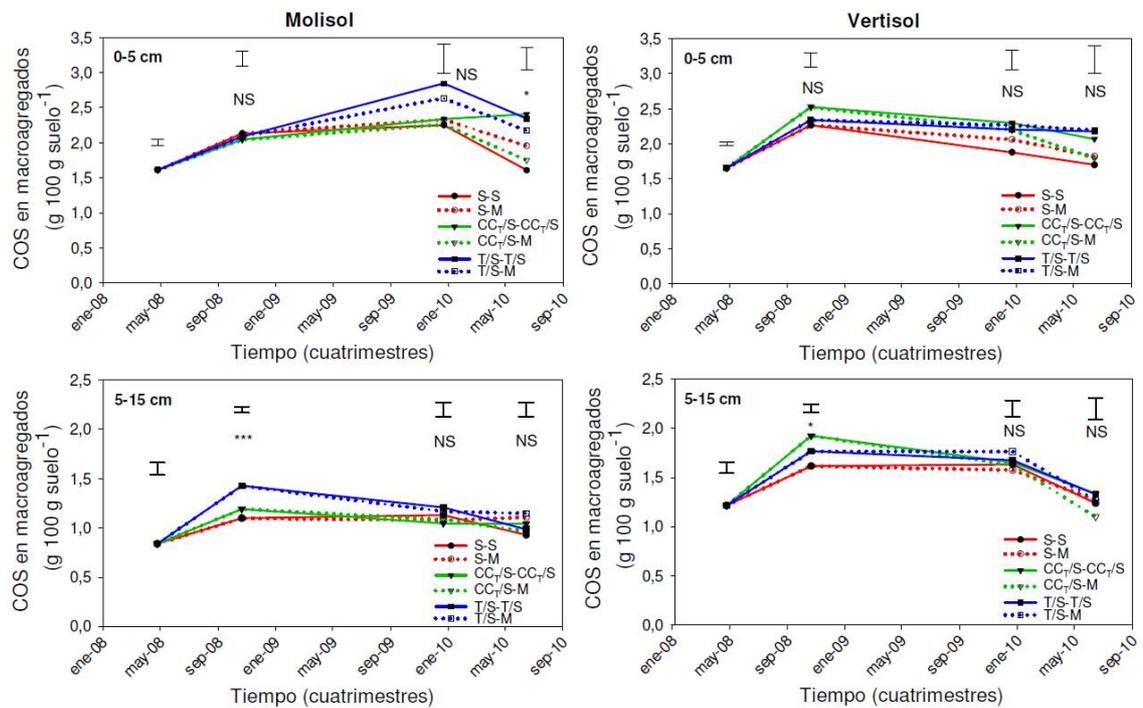
La evaluación de los CV promedio de los muestreos para las secuencias de cultivos analizadas en los diferentes suelos y profundidades no arrojó diferencias estadísticas significativas (Tabla A.4). En promedio de los CV fue del 11,5%. Éste CV contrasta con los registrados con las variables de agregación, las cuales presentaron una importante variación temporal, principalmente en el suelo Vertisol en comparación con el Molisol (Tabla A.4).

#### 4.3.6. Dinámica temporal del COS y COP almacenado en macroagregados

Al igual que para el caso del COS total, el COS almacenado en los macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ) fue mayor a 0-5 cm en comparación con 5-15 cm.

Cuando se analizó el impacto de las secuencias de cultivos para cada fecha de muestreo, suelo y profundidad sobre el COS almacenado en los macroagregados, sólo se detectaron diferencias estadísticas significativas entre las secuencias de cultivos a 0-5 cm de profundidad en el muestreo final (junio 2010) del suelo Molisol (Figura 4.11). En este suelo, muestreo y profundidad, las secuencias con mayor  $\text{IIS}_m$  (i.e. T/S-T/S y  $\text{CC}_T/\text{S}-\text{CC}_T/\text{S}$ ) presentaron las mayores concentraciones de COS ( $2,34$  y  $2,41 \text{ g } 100 \text{ g suelo}^{-1}$ , respectivamente), diferenciándose significativamente de la secuencia S-S que presentó el menor  $\text{IIS}_m$  ( $1,61 \text{ g COS } 100 \text{ g suelo}^{-1}$ ), pero no de la secuencia S-M ( $1,95 \text{ g COS } 100 \text{ g suelo}^{-1}$ ).

La evaluación de los CV promedio de los muestreos no arrojó diferencias entre profundidades ni entre secuencias de cultivos, aunque los menores valores de CV se detectaron en las secuencias S-S y S-M (Tabla A.4).



**Figura 4.11.** Dinámica temporal del carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ) en seis secuencias de cultivos, dos suelos y dos profundidades durante el período de estudio (de Abril de 2008 a Junio de 2010). S-S: soja-soja (línea roja continua); S-M: soja-maíz (línea roja discontinua);  $\text{CC}_T/\text{S}-\text{CC}_T/\text{S}$ : cultivo cobertura de trigo/soja-cultivo cobertura de trigo/soja (línea verde continua);  $\text{CC}_T/\text{S}-\text{M}$ : cultivo cobertura de trigo/soja-maíz (línea verde discontinua); T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja (línea azul continua); T/S-M: trigo/soja-maíz (línea azul discontinua). La comparación de las medias entre las secuencias de cultivos para una misma fecha de muestreo se realizó mediante un test de Tukey ( $\alpha: 0,05$ ) y la significancia se indicó como NS; \*, \*\*, \*\*\* (no significativo,  $P<0,05$ ,  $P<0,01$ ,  $P<0,001$ , respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada fecha de muestreo.

A pesar de detectarse una elevada variabilidad temporal en la agregación, la variación temporal en el almacenaje de COS en los macroagregados fue menor. La

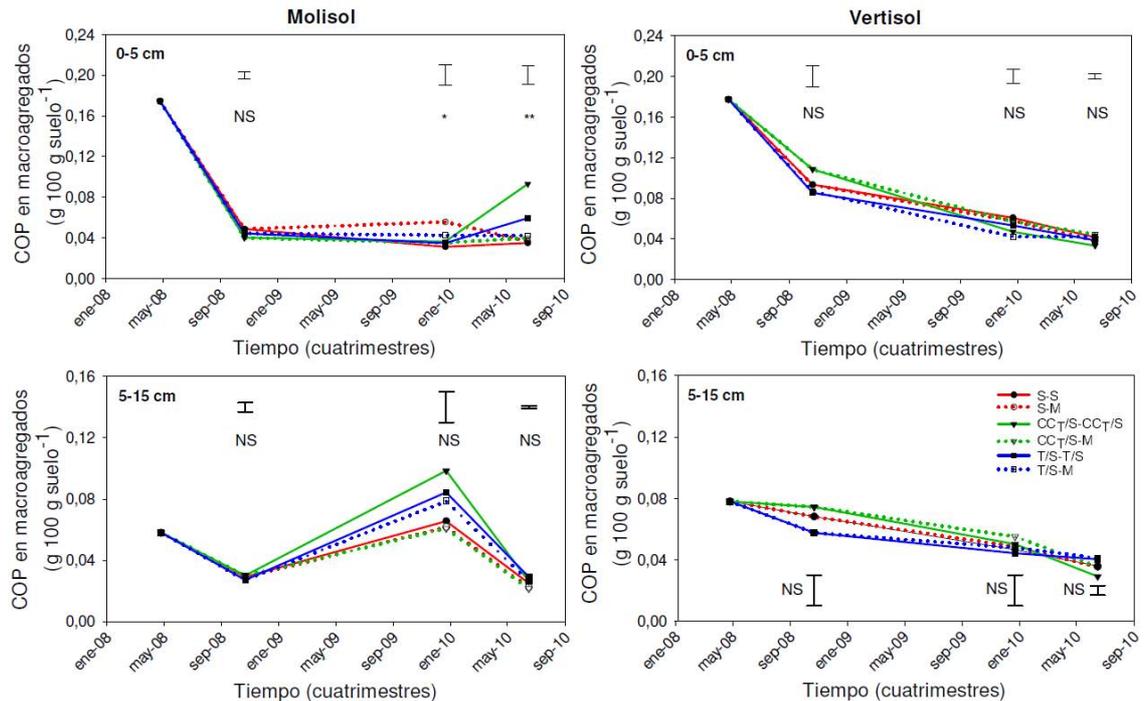
evaluación del COS se realizó en los macroagregados  $>250 \mu\text{m}$ , obtenidos de una muestra compuesta de agregados  $>2000 \mu\text{m}$  (los que variaron de manera importante) y agregados de  $250\text{-}2000 \mu\text{m}$  (menos variable en el tiempo) (datos no presentados). Sin embargo, la proporción de agregados  $>2000 \mu\text{m}$  en la muestra compuesta para el análisis de COS de ambos suelos y profundidades fue menor que la proporción de agregados entre  $250\text{-}2000 \mu\text{m}$  (Molisol 0-5 cm: 47% vs. 22 %, respectivamente; Molisol 5-15 cm: 8% vs. 50%, respectivamente; Vertisol 0-5 cm: 10% vs. 54%, respectivamente; Vertisol 5-15 cm: 5% vs. 60%, respectivamente). Esto puede ser la causa de la menor variación temporal en el COS almacenado en los macroagregados en comparación con la variación detectada en las variables de agregación analizadas.

El COP almacenado en los macroagregados, presentó mayores variaciones temporales en comparación con el COS total y el almacenado en macroagregados (Figura 4.12). En 0-5 cm del Molisol se detectó una reducción en el COP almacenado en los macroagregados hacia el muestreo de octubre de 2008, la cual no varió de manera importante en el muestreo siguiente (diciembre 2009), en donde la secuencia S-M se diferenció ( $P<0,05$ ) del resto de las secuencias evaluadas (Figura 4.12). Sin embargo, en el muestreo final (junio 2010), la secuencia  $\text{CC}_T/\text{S}-\text{CC}_T/\text{S}$  presentó un mayor COP en macroagregados diferenciándose ( $P<0,01$ ) del resto de las secuencias evaluadas, aunque no de la secuencia T/S-T/S (Figura 4.12).

Por otra parte, en 5-15 cm del Molisol, los valores de COP almacenados en los macroagregados presentaron un pico en el muestreo de diciembre de 2009, con mayores valores en las secuencias con alto nivel de intensificación, aunque sin diferencias significativas entre las secuencias de cultivos.

En el Vertisol, tanto a 0-5 cm como a 5-15 cm, se detectó una disminución en el COP almacenado en los macroagregados con el tiempo, aunque no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos de cultivos evaluados.

En el conjunto de los datos de COP en macroagregados, la evaluación de la variabilidad temporal a través de los CV promedio de los muestreos, arrojó diferencias entre las profundidades evaluadas ( $P<0,001$ ; 0-5 cm: 77 %, 5-15 cm: 46 %) , aunque no entre las diferentes secuencias de cultivos, a excepción del Molisol 0-5 cm en donde se registró el mayor CV en la secuencia  $\text{CCT}/\text{S}-\text{M}$ , mientras que la menor en la secuencia  $\text{CCT}/\text{S}-\text{CCT}/\text{S}$  (Tabla A.4).



**Figura 4.12.** Dinámica temporal de la carbono orgánico particulado almacenado en macroagregados (>250  $\mu\text{m}$ ) en seis secuencias de cultivos, dos suelos y dos profundidades durante el período de estudio (de Abril de 2008 a Junio de 2010). S-S: soja-soja (línea roja continua); S-M: soja-maíz (línea roja discontinua); CC<sub>T</sub>/S-CC<sub>T</sub>/S: cultivo cobertura de trigo/soja-cultivo cobertura de trigo/soja (línea verde continua); CC<sub>T</sub>/S-M: cultivo cobertura de trigo/soja-maíz (línea verde discontinua); T/S-T/S: trigo/soja-trigo/soja (línea azul continua); T/S-M: trigo/soja-maíz (línea azul discontinua). La comparación de las medias entre las secuencias de cultivos para una misma fecha de muestreo se realizó mediante un test de Tukey ( $P < 0,05$ ) y la significancia se indicó como NS; \*, \*\*, \*\*\* (no significativo,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada fecha de muestreo.

Para ambos suelos y profundidades evaluadas, del total de COS almacenado en los macroagregados, aproximadamente el 4,4 % se detectó en forma de COP, en promedio de los diferentes muestreos y secuencias de cultivos evaluadas. Si bien esta proporción resulta baja, hay que considerar que se obtuvo de las muestras compuestas (>2000  $\mu\text{m}$  + 250-2000  $\mu\text{m}$ ) obtenidas luego del tamizado en húmedo, en donde el lavado durante el tamizado puede haber arrastrado una gran proporción del COP hacia la fracción 53-250  $\mu\text{m}$ .

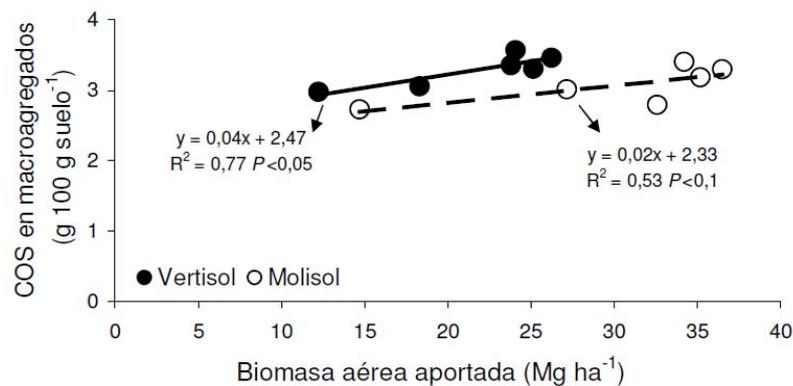
#### 4.3.7. Relación entre el aporte de biomasa, el nivel de intensificación, el COS total y el COS y COP almacenado en macroagregados

Al analizar las relaciones entre el aporte de biomasa aérea y el nivel de intensificación de las secuencias de cultivos con el COS total obtenido en el muestreo final del experimento, no se detectaron asociaciones significativas entre dichas variables para los suelos y profundidades analizadas, a excepción del Vertisol a 0-5 cm. En este suelo y profundidad, el nivel de intensificación ya sea evaluado como cultivos por año (IIS) o meses con cobertura viva en la secuencia de cultivos (IIS<sub>m</sub>) al igual que el aporte de biomasa aérea, se asoció de manera estrecha con el COS total del suelo (IIS<sub>m</sub> vs.

COS:  $R^2=0,82-P<0,05$ ; IIS vs. COS:  $R^2=0,88-P<0,05$ ; Aporte biomasa vs. COS:  $R^2=0,97-P<0,01$ ) (datos no mostrados).

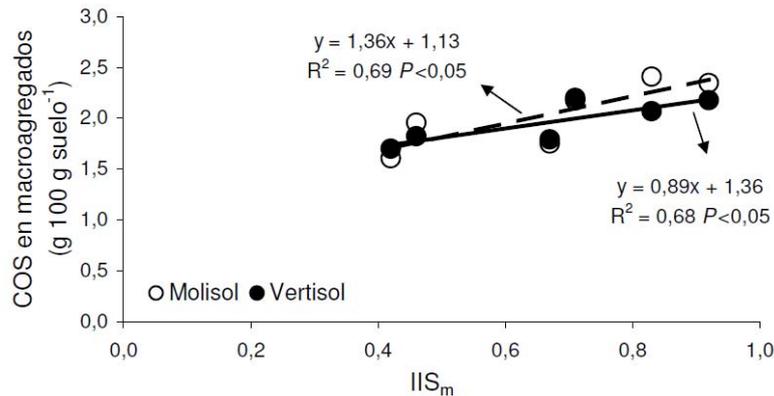
Cuando se relacionó el aporte de biomasa aérea y el nivel de intensificación con el COS y COP almacenado en los macroagregados del muestreo final, sólo se registraron relaciones significativas a 0-5 cm de profundidad de ambos suelos. El aporte de biomasa en el Molisol se asoció escasamente con el COS almacenado en los macroagregados ( $P<0,1$ ) (Figura 4.13). Sin embargo, en este suelo la intensificación de las secuencias de cultivos, ya sea evaluada como meses con cobertura viva (IIS<sub>m</sub>) o cultivos por año (IIS), se asoció estrechamente ( $P<0,05$ ) con el COS almacenado en los macroagregados.

En el Vertisol a 0-5 cm de profundidad, el aporte de biomasa aérea se ( $P<0,05$ ) con el COS almacenado en los macroagregados (Figura 4.13).



**Figura 4.13.** Relación entre la biomasa aportada durante el período experimental y el carbono orgánico del suelo (COS) asociado a macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ) al final del experimento en 0-5 cm de profundidad. Círculos vacíos indican suelo Molisol. Círculos llenos indican suelo Vertisol. La línea continua indica el Vertisol. La línea discontinua indica el Molisol. Las flechas indican la ecuación de ajuste de la regresión para cada suelo.

En ambos tipo de suelos evaluados y a 0-5 cm de profundidad, el COS almacenado en los macroagregados se relacionó estrecha y positivamente ( $P<0,05$ ) con el IIS<sub>m</sub> (Figura 4.14). En este sentido, un mayor tiempo de ocupación con cobertura vegetal viva demostró ser eficiente para incrementar la macroagregación del suelo (principalmente en el Molisol) y en consecuencia el COS almacenado en los macroagregados de suelo.



**Figura 4.14.** Relación entre el índice de intensificación de las secuencias ( $IIS_m$ ) y los gramos de carbono orgánico del suelo (COS) asociado a macroagregados de 0-5 cm de profundidad al final del experimento para el conjunto de datos de los dos suelos evaluados. La línea continua indica el Vertisol. La línea discontinua indica el Molisol. Las flechas indican la ecuación de ajuste de la regresión para cada suelo.

#### 4.4. Discusión

En este capítulo se detectó una importante variación en la agregación durante el período experimental (Figura 4.6). El  $DMP_{TH}$  de los agregados de ambos suelos y profundidades presentó una elevada variación temporal, con mayores valores concentrados durante los períodos primavera de 2008-verano de 2009, mientras que los menores en otoño de 2009-invierno de 2010. En coincidencia, diferentes investigadores han reportado que la agregación del suelo es una propiedad dinámica, la cual puede presentar variaciones temporales causadas principalmente por la influencia del manejo de los cultivos, el tipo de suelo y el clima (Perfect et al. 1990a; Angers, 1998; Cosentino et al., 2006; Alvaro-Fuentes et al., 2008).

En este experimento, las variaciones temporales en la agregación registradas dentro de una misma secuencia de cultivo a lo largo del experimento fueron mayores a las diferencias entre las distintas secuencias de cultivos evaluadas, principalmente en el Vertisol (Figura 4.6). Este resultado concuerda con lo reportado por algunos investigadores (Perfect et al. 1990a, b; Ellsworth et al., 1991; Chan et al., 1994), quienes sugieren que a menudo las variaciones temporales en la agregación dentro de un mismo tratamiento son mayores que las diferencias entre suelos o secuencias de cultivos. Angers (1998) atribuye las variaciones en la agregación a las condiciones meteorológicas cuando aquéllas ocurren en cortos períodos, mientras que sugiere que en el largo plazo, la variación en la agregación es controlada por el manejo del C (ubicación en el perfil, calidad y cantidad de residuos).

Durante el período inicial del experimento y hasta mediados de febrero de 2009 (muestras 1 a 3) (Figura 4.1), se registraron balances hídricos muy negativos, mientras que dentro de los períodos de muestreo 4 y 5 los balances hídricos fueron positivos y negativos, respectivamente. Por otra parte, durante el período enero a mayo de 2010 se registraron importantes e intensas precipitaciones, las cuales dejaron un balance hídrico muy positivo (Figura 4.1). La elevada intensidad de las precipitaciones registradas durante el período enero-mayo 2010 puede ser la causa de la reducción en la agregación registrada al final del experimento (6<sup>to</sup> muestreo), sobre todo en las secuencias con menor  $IIS_m$  (i.e. S-S y S-M). Esto se evidenció al relacionar la erosividad de las precipitaciones y las variables de agregación (Figura 4.9) donde se detectaron relaciones

negativas significativas para las secuencias que presentaron prolongados períodos de barbecho (S-S y S-M) en comparación con las secuencias de mayor IIS<sub>m</sub>.

Estos resultados indicarían que además del tiempo de ocupación con cobertura viva, la permanencia de la cobertura sobre el suelo asociada a la calidad de los residuos aportados al suelo podría tener un impacto importante para proteger el suelo del impacto de la gota de lluvia durante los períodos intercultivos, tal como se sugiere en los capítulos 2 y 3 de esta tesis. Si bien se ha mencionado al impacto de la gota de lluvia como un factor de desagregación (Le Bissonais, 1996), la evaluación del impacto de la erosividad de las precipitaciones sobre la agregación, en suelos contrastantes en sus principales agentes de agregación y con secuencias de cultivos que difieren en el nivel de intensificación no ha sido evaluado surgiendo como un aporte importante de esta tesis y que mantiene consistencia con lo observado en los capítulos previos.

En este experimento no se detectó una relación clara entre el contenido de humedad volumétrica al momento del muestreo y las variables de agregación. Solamente se registró una pobre relación negativa entre la humedad volumétrica al momento del muestreo y el porcentaje de fracción asociada a minerales ( $<53 \mu\text{m}$ ) en la secuencias con cultivo de cobertura, pero no en el resto de las secuencias de cultivos evaluadas. Se han reportado resultados contradictorios entre el contenido de agua al momento del muestreo y la agregación. Algunos autores detectaron correlaciones positivas entre dichas variables (i.e. Angers et al., 1993), mientras que otros observaron reducciones en la agregación con el incremento en el contenido hídrico (Perfect et al., 1990a, b; Chan et al., 1994), o en algunos casos no se detectaron relaciones (Yang y Wander, 1998, Angers, 1992). El escaso efecto de la humedad del suelo al momento de los distintos muestreos detectado en esta tesis, puede deberse a que las muestras de suelo se secaron al aire y permanecieron almacenadas por un prolongado período antes del tamizado en húmedo, lo cual puede haber minimizado el impacto de la humedad al momento del muestreo sobre la agregación, de acuerdo a lo sugerido por Perfect et al. (1990a, b).

En esta tesis, las secuencias con un mayor nivel de intensificación incrementaron los aportes de residuos aéreos, principalmente en el Molisol en comparación con el Vertisol (Figura 4.4 y 4.5). Por otro lado, y en los dos suelos evaluados, las secuencias que presentaron maíz luego de la secuencia T/S o CC<sub>T</sub>/S aportaron una elevada cantidad de biomasa aérea aunque no se diferenciaron significativamente de las secuencias con los máximos niveles de intensificación (T/S-T/S; CC<sub>T</sub>/S-CC<sub>T</sub>/S) (Figura 4.4). Esto concuerda con lo reportado por Caviglia et al. (2011), quienes sugieren que la inclusión del doble cultivo trigo/soja produjo un 143 % más de aportes de residuos de cosecha en comparación con el monocultivo de soja, siendo la contribución del trigo al total de residuos aportados cercana al 75 %.

Los mayores aportes de residuos al intensificar las secuencias de cultivos tienen una implicancia fundamental en los actuales sistemas agrícolas, los cuales se encuentran simplificados y con elevada frecuencia de barbechos, ya que permitieron proteger al suelo del impacto erosivo de la gota de lluvia (Figura 4.9) y favorecieron la mejora de la agregación del suelo (Figuras 4.7 y 4.8). La intensificación de las secuencias de cultivos y en consecuencia, los mayores aportes de residuos se asociaron con mejoras en la macroagregación, en mayor medida en el Molisol en comparación con el Vertisol (Figura 4.7 y 4.8). Este comportamiento diferencial entre los suelos evaluados es concordante con los resultados encontrados en los capítulos 2 y 3 al evaluar las variables de agregación en lotes de producción. Dicho comportamiento puede ser

atribuido a la mayor dependencia de agentes orgánicos de agregación en el Molisol (Tisdall y Oades, 1982, Novelli et al., 2011) en comparación con el Vertisol en que la acción de las arcillas esmectitas a través de los ciclos de expansión y contracción es preponderante y la capacidad de autoestructuración puede minimizar en gran medida el efecto de los tratamientos (Fabrizzi et al., 2009; Novelli et al., 2011).

A pesar de la elevada variación en la agregación durante el período experimental, las concentraciones de COS total y el COS almacenado en macroagregados presentaron menores variaciones temporales, aunque las mismas fueron más evidentes en 0-5 cm de profundidad en comparación con 5-15 cm. Esto es esperable dado el corto período de evaluación y a que el COS total presenta una elevada proporción de compartimentos de ciclado lento (Galantini, 2008). Por otra parte, el COP almacenado en los macroagregados mostró una elevada variabilidad a lo largo del período experimental (Figura 4.12, Tabla A.4). Se ha documentado que el COP es una fracción de elevada labilidad y sensibilidad para detectar cambios de corto plazo debido a las prácticas agrícolas (Cambardella y Elliot, 1992), aunque en esta tesis el COP almacenado en los macroagregados no fue una variable suficientemente sensible para detectar cambios entre las secuencias de cultivos.

En este capítulo se registraron rangos similares de concentración de COS total entre los suelos evaluados, aunque el comportamiento de los suelos fue diferente cuando se relacionaron los aportes o el nivel de intensificación con la agregación del suelo (Figuras 4.7 y 4.8). Este resultado confirma la prevalencia de un agente de agregación diferente al COS en el Vertisol, lo que coincide con lo reportado en el capítulo 2 y resulta en un aporte novedoso de esta tesis.

Sin embargo, a pesar del menor impacto del COS sobre la agregación en el Vertisol en comparación con el Molisol, se encontró una asociación significativa entre el COS almacenado en los macroagregados de ambos suelos y el nivel de intensificación (Figura 4.14). Esto sugiere que a pesar de producirse importantes variaciones temporales en la agregación, moduladas en su gran mayoría por las variables meteorológicas y mineralógicas de los suelos, mantener el suelo ocupado por prolongados períodos favoreció el aporte de biomasa, la agregación y las ganancias de COS en macroagregados al final del experimento.

#### **4.5. Conclusiones**

En ambos suelos evaluados, las secuencias de cultivos intensificadas incrementaron los aportes de biomasa aérea, asociándose con mejoras en la macroagregación y en el COS almacenado en los macroagregados principalmente en el Molisol en comparación con el Vertisol. En este sentido, en ambos tipos de suelo la secuencia de cultivo que presentó monocultivo de soja (S-S) tuvo, al final del experimento, la menor cantidad de macroagregados y, en consecuencia, la mayor cantidad de fracción asociada a minerales (<53  $\mu\text{m}$ ).

La agregación del suelo presentó una elevada variación temporal detectada por medio del CV, la cual fue más importante en el Vertisol en comparación con el Molisol. Sin embargo, el efecto de las secuencias de cultivos sobre la dinámica temporal de la agregación y el COP almacenado en los macroagregados fue menor que la variación registrada entre las diferentes fechas de muestreo, lo que sugiere que en el corto plazo la dinámica temporal de la agregación depende de otros factores diferentes a la secuencia de cultivo utilizada.

En el Molisol, y en las secuencias con un menor nivel de intensificación (S-S y S-M), la energía erosiva de las precipitaciones se asoció de manera negativa con el  $DMP_{TH}$ , y con los agregados  $>250 \mu m$  y de manera positiva con los agregados  $<250 \mu m$ , resaltando en este tipo de suelo el potencial impacto de las precipitaciones sobre la agregación cuando el suelo permanece en barbecho por elevados períodos de tiempo.

#### **4.6. Relación con las hipótesis planteadas**

El nivel de intensificación se asoció de manera positiva con la proporción de macroagregados y el COS asociado a dicho tamaño en comparación con la secuencia menos intensificada (S-S). Estos resultados no proporcionan evidencias suficiente para rechazar la hipótesis 4 de esta tesis que establece que *“en el corto plazo, el incremento en el índice de intensificación por la incorporación de cultivos dobles invernales (para grano o cobertura) aumenta la proporción de agregados  $>250 \mu m$  y el COP en esa fracción de agregados en comparación con el cultivo individual de soja”*.

En la hipótesis 5 se planteo que *“los cambios en la proporción de agregados y el COS asociado a ellos en el Molisol, son más afectados por el índice de intensificación que por la composición de la secuencia de cultivos”*. Sin embargo, si bien en el Molisol el tiempo de ocupación con cobertura viva tuvo un impacto importante sobre la agregación y el almacenaje de COS asociado a ellos, el diseño experimental utilizado no fue permitió aislar el impacto de cada cultivo interviniente en la secuencia de cultivos, por lo que no fue posible poner a prueba completamente esta hipótesis, aunque hubo indicios para suponer un efecto importante del tiempo de ocupación con cobertura viva en las secuencias que difirieron en su composición de cultivos (i.e- T/S-T/S – T/S-M).

#### **4.7. Relación con los otros capítulos**

En este capítulo se estudio la dinámica de la agregación y del COS total y asociado a macroagregados, y como el tipo de suelo, el manejo o las variables climáticas controlan las variaciones temporales.

En el capítulo siguiente se estudiará el impacto de la adición frecuente de residuos de diferente calidad sobre la agregación y el contenido de carbohidratos extractables en agua caliente, a través de dos ensayos de incubaciones de un suelo Molisol y un Vertisol.

## **Capítulo 5**

### **Efecto de la frecuencia de adición y calidad de residuos sobre la dinámica de la respiración microbiana y la estabilidad de agregados de suelos contrastantes**

## 5.1. Introducción

La expansión de la agricultura hacia áreas de menor aptitud agrícola, sumado a la elevada frecuencia de barbecho y a la falta de rotaciones de cultivos definidas, son una escenario muy común en los actuales sistemas agrícolas de Sudamérica, situación que esta afectando de manera negativa algunas propiedades del suelo que definen su calidad y productividad (Novelli et al., 2011). Ante esta situación, muchos esfuerzos en investigación se han dirigido hacia la búsqueda de diferentes indicadores que posibiliten el monitoreo de aquellas propiedades del suelo que son principalmente afectadas por los cambios en el uso de la tierra y que además resulten sensibles para detectar los impactos negativos de los cambios en el uso de la tierra de manera temprana (Doran y Parkin, 1994; Larson y Pierce, 1994; Aparicio y Costa, 2007; Wilson, 2008; Campitelli et al., 2010).

La estabilidad de los agregados es uno de los indicadores de calidad del suelo de mayor sensibilidad al uso de la tierra (Arshad y Coen, 1992) y un factor clave que regula muchos procesos, como la erodabilidad del suelo, la fertilidad, y la protección del COS (Beare et al., 1994b). Sin embargo, y tal como fue demostrado en los capítulos anteriores, la estabilidad de los agregados puede ser influenciada por diferentes factores, como la textura, la mineralogía de las arcillas, el contenido de cationes, la acción de óxidos de hierro y de aluminio, el contenido de COS, entre otros (Oades, 1993; Abiven et al., 2009).

Se ha reportado que la incorporación de residuos orgánicos incrementa la estabilidad de los agregados debido a la estimulación de la actividad microbiana, lo que fomenta la producción de exudados microbianos (principalmente polisacáridos) que favorecen la cohesión de las partículas de suelo (Chenu y Guérif, 1991). Además, la producción de sustancias hidrofóbicas por los microorganismos disminuye la tasa de humedecimiento del suelo (Cosentino, 2006; Cosentino et al., 2006) y, en consecuencia, el estallido de los agregados producto de la compresión del aire atrapado cuando suceden humedecimientos repentinos (Le Bissonais, 1996). Asimismo, la acción física de las hifas de hongos se incrementa cuando se adicionan residuos orgánicos al suelo (Degens et al., 1996).

Dado que la cantidad, la calidad y la frecuencia con la cual los residuos vegetales son adicionados al suelo son variables con el tiempo y con el uso de la tierra considerado, la estabilidad de la agregación y, en consecuencia, la capacidad de protección del COS, puede ser afectada. En este sentido, un mayor período de ocupación con cobertura vegetal viva, el cual se consigue al intensificar las secuencias de cultivos, permitiría lograr una mayor cantidad y frecuencia de aportes de residuos vegetales al suelo (Figura 4.5). Por otra parte, una mayor frecuencia de aportes de residuos vegetales al suelo podría favorecer la estabilización de la agregación del suelo al mantener la actividad microbiana más continua en el tiempo (Figura 1.3).

La actividad microbiana del suelo ha sido fácilmente detectada en ensayos de incubaciones de suelo a través del monitoreo de la respiración edáfica y del estudio de diferentes propiedades que muestran sensibilidad al aporte de residuos (e.g. contenido de carbohidratos, biomasa microbiana, ergosterol, etc.) (Denef y Six, 2005; De Gryze et al., 2005; Liu et al., 2005; Cosentino et al., 2006). Los experimentos de incubaciones de suelo han sido ampliamente utilizados para evaluar el impacto de diferentes cantidades (De Gryze et al., 2005; Cosentino et al., 2006) y calidades (Martens et al., 2000b) de adición de residuos, o la acción de ciclos de humedecimiento y secado (Denef et al., 2001; Cosentino et al., 2006; Bravo-Garza et al., 2010) sobre la agregación del suelo ya

que permiten entender desde un punto de vista mecanístico los factores que gobiernan la estabilidad de los agregados. Por otra parte, dichos experimentos han posibilitado detectar comportamientos diferenciales entre suelos con diferente textura y mineralogía sobre la formación de agregados en el corto plazo (De Gryze et al., 2005; Deneff y Six, 2005, 2006; Bravo-Garza et al., 2010). En este sentido, Deneff y Six (2005) demostraron un menor impacto de la adición de carbono derivado de residuos vegetales (tanto aéreos como subterráneos) en un suelo con caolinita (arcilla 1:1) en comparación a uno con illita (arcilla 2:1), sugiriendo que en el corto plazo la formación de agregados en suelos con arcillas 1:1 es menos dependiente de procesos biológicos.

Mientras que la mayoría de las investigaciones se ha focalizado en la evaluación de la cantidad (De Gryze et al., 2005; Cosentino et al., 2006) o la calidad de aportes de residuos al suelo (Martens 2000b; Bossuyt et al., 2001), el estudio del impacto de la frecuencia de adición sobre la dinámica de la actividad microbiana y su influencia sobre la agregación no ha sido estudiado en suelos con altos contenidos de arcillas esmectitas como los Vertisoles, y menos aún su comparación con suelos que poseen mayor dependencia de agentes orgánicos de agregación como los Molisoles (Oades y Waters, 1991). Este tópico tiene una trascendencia importante en los actuales sistemas agrícolas, los cuales presentan elevados períodos de barbecho y, en consecuencia, esporádicos aportes de residuos al suelo. El conocimiento del impacto de la adición de residuos de diferente calidad y frecuencia de adición sobre la dinámica de la actividad microbiana y su influencia en la estabilidad de los agregados en suelos con agentes de agregación contrastantes permitirá conocer, desde un punto de vista mecanístico, los factores que influyen la estabilización de los agregados de suelo ante cambios en el tiempo de ocupación con cobertura vegetal viva.

El objetivo del presente capítulo es evaluar el efecto de la frecuencia de adición y de la calidad de residuos vegetales sobre la respiración microbiana, la estabilidad de agregados y el contenido de C de los carbohidratos extractables en agua caliente de suelos que difieren en sus principales agentes de agregación.

## **5.2. Materiales y Métodos**

### *5.2.1. Toma de muestras de suelo y diseño de los experimentos*

Se realizaron dos experimentos de incubaciones en laboratorio los cuales difirieron principalmente en el tipo de suelo, la calidad y la frecuencia de adición de residuos utilizados, en su duración y en los momentos en que se realizaron los muestreos destructivos.

Durante los meses de mayo y agosto de 2010, se recolectaron muestras de suelo a 0-15 cm de profundidad de un Argiudol ácuico y un Hapluderte típico de la provincia de Entre Ríos, Argentina, con degradación estructural visible debida a la extensa historia agrícola, y con soja (*Glycine max* [L.] Merr.) como cultivo antecesor. Dichas muestras se obtuvieron de un mismo sitio de muestreo de acuerdo al tipo de suelo. En la Tabla 5.1, se presentan las características texturales de cada tipo de suelo.

**Tabla 5.1.** Descripción de las características texturales (Plan Mapa de Suelos, 1998) de los suelos.

Características	Molisol		Vertisol	
Subgrupo	Argiudol ácuico <sup>a</sup>		Hapluderte típico	
Horizonte	Ap	B <sub>21t</sub>	Ap	B <sub>21t</sub>
Profundidad (cm)	3-15	21-33	5-18	37-55
% Arena	4,5	3,9	5,6	4,9
% Limo	67,9	54,6	54,2	40,2
% Arcilla	27,6	41,5	40,2	54,9
Clase textural	Franco arcillo limoso	Arcillo limoso	Arcillo limoso	Arcilloso

<sup>a</sup> Clasificación USDA (Soil Survey Staff, 2010).

El análisis de las muestras de suelo obtenidas en el mes de mayo arrojó un valor de 25,8 g C kg<sup>-1</sup> de suelo y 2,32 g N kg<sup>-1</sup> de suelo en el Molisol, y de 28,9 g C kg<sup>-1</sup> de suelo y 2,23 g N kg<sup>-1</sup> de suelo en el Vertisol. Por otra parte, las muestras obtenidas en el mes de agosto presentaron un valor de 29,1 g C kg<sup>-1</sup> de suelo y 2,69 g N kg<sup>-1</sup> de suelo en el Molisol y 26,2 g C kg<sup>-1</sup> de suelo y 2,02 g N kg<sup>-1</sup> de suelo en el Vertisol.

En el laboratorio, las muestras se desterraron manualmente por las líneas de fracturas naturales, se tamizaron por 5 mm, se colocaron en bandejas plásticas las cuales se cerraron herméticamente mediante papel de film, y se almacenaron en cámara de frío a 10 °C por un lapso cercano a un mes.

Diez días antes del comienzo del ensayo, las muestras se retiraron de la cámara de frío y permanecieron a temperatura ambiente para su estabilización. A su vez se determinaron los porcentajes de humedad y los valores de capacidad de campo de ambos suelos de acuerdo a la metodología propuesta por Richards (1948), para corregir posteriormente los contenidos de humedad de las muestras a dicho umbral mediante la pulverización con agua destilada.

#### 5.2.1.1. Experimento 1

El primer experimento de incubaciones se realizó por un período de 120 días, utilizando un diseño en bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones. Debido a que no se contaba con una estufa de incubación con circulación forzada de aire y para tener en cuenta las posibles diferencias de temperatura entre los diferentes estantes de incubación se realizó un DBCA, utilizando como criterio de bloqueo la ubicación de los frascos en los estantes de incubación. Se utilizaron las muestras de suelo obtenidas en el mes de mayo de 2010. Los tratamientos surgieron de la combinación factorial de tipo de suelo: Molisol y Vertisol; tipo de residuo a incorporar maíz (*Zea mays* L.) y soja; y frecuencia de adición de residuos vegetales: en una sola vez (F1), en dos veces (F2) y en 3 veces (F3).

Se utilizaron residuos vegetales de maíz al estadio de R6 (456 g C kg<sup>-1</sup>; 6,3 g N kg<sup>-1</sup>; C/N: 72,4) y de soja al estadio de R5,5 (455 g C kg<sup>-1</sup>; 25,4 g N kg<sup>-1</sup>; C/N: 17,9) provenientes del ensayo de campo (Capítulo 4), los cuales fueron molidos a 1 mm. Para incubar el suelo se utilizaron frascos plásticos de 1 L de capacidad a los cuales se les incorporaron los agregados de suelos menores de 5 mm (equivalente a 160 g de suelo seco) obtenidos del muestreo detallado en la sección anterior.

Un equivalente a 6 Mg ha<sup>-1</sup> de residuos vegetales se incorporaron sobre los agregados dentro de los recipientes de incubación. La adición se realizó a diferentes

frecuencias: por única vez (inicio), en 2 dosis de 3 Mg ha<sup>-1</sup> (inicio y 62 días), y en 3 dosis de 2 Mg ha<sup>-1</sup> (inicio, 41 y 84 días). Un frasco, debidamente replicado, se utilizó como testigo para cada tipo de suelo y no se le adicionaron residuos vegetales.

Para el cálculo de la dosis de residuos vegetales a adicionar y con el objeto de vincularla con la masa del suelo, se tuvo en cuenta un aporte de 6 Mg ha<sup>-1</sup> en una masa de suelo de 1800 Mg ha<sup>-1</sup> (0,15 m \* 1,2 Mg m<sup>-3</sup> \* 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>). Dicha dosis correspondió a 0,53 g de residuos por frasco de incubación (1,5 g C kg<sup>-1</sup> suelo).

Los residuos vegetales se mezclaron lentamente por medio de 10 giros completos de los recipientes para favorecer su contacto con los agregados de suelo. Este procedimiento se realizó a todos los recipientes, independientemente de que recibieran o no residuos, y en todas las frecuencias evaluadas.

Durante el período de incubación se registró la temperatura horaria utilizando sensores de temperatura conectados a un datalogger. La incubación se realizó en un ambiente térmico estable y con escasas fluctuaciones (19,9 °C ± 1,4 °C).

Para el mantenimiento de la humedad durante el experimento, dentro de cada frasco de incubación se incorporó un recipiente con agua destilada. Además se controló regularmente el contenido de agua de las muestras de suelo a través de pesadas sucesivas de los frascos de incubación corrigiéndolo mediante el asperjado de agua destilada cuando fue necesario.

#### 5.2.1.2. Experimento 2

Un segundo experimento de incubaciones se llevó a cabo durante un período de 62 días utilizando, al igual que en el caso anterior, un DBCA con tres repeticiones. Para este experimento se utilizaron las muestras de suelo recolectadas en el mes de agosto de 2010. En este experimento los tratamientos surgieron de la combinación factorial del tipo de suelo: Molisol y Vertisol, y calidad del residuo adicionado: trigo (*Triticum aestivum* L.) y trébol de olor blanco (*Melilotus albus* Medik.).

Se utilizaron residuos de trigo (422 g C kg<sup>-1</sup>; 19,6 g N kg<sup>-1</sup>; C/N: 21,5) y trébol de olor blanco (438 g C kg<sup>-1</sup>; 35,8 g N kg<sup>-1</sup>; C/N: 12,2) molidos a 1 mm provenientes de parcelas con cultivo de cobertura del ensayo de campo, descrito en el Capítulo 4 de esta tesis, cuya fecha de quemado fue fines de septiembre de 2009. En el momento del quemado los cultivos de cobertura se encontraban en pleno crecimiento vegetativo (trébol de olor blanco) y en espigazón (trigo) respectivamente, lo cual se refleja en la baja relación C/N de ambos residuos.

Al igual que en el experimento anterior, la cantidad de residuos aplicado fue el equivalente a 6 Mg ha<sup>-1</sup> (0,53 g residuos por recipiente), lo que correspondió a una dosis de 1,39 g C kg<sup>-1</sup> suelo cuando el residuo fue el trigo, y 1,45 g C kg<sup>-1</sup> suelo cuando el residuo fue trébol de olor blanco.

El desarrollo del experimento, como así también la temperatura durante el período de la incubación fue similar a lo descrito en el experimento 1.

#### 5.2.2. Cuantificación de la respiración microbiana

Para la determinación de la actividad respiratoria microbiana, se utilizó una modificación de la técnica propuesta por Isermeyer (1952). Dentro de los recipientes de incubación que se retiraron al final del cada experimento (día 120–experimento 1 y día

62—experimento 2), se colocaron soportes conteniendo un vaso plástico, en cuyo interior se adicionaron 20 mL de NaOH 1N, el cual permitió capturar el CO<sub>2</sub> liberado por la flora microbiana edáfica. Para evitar que se produzca una saturación del NaOH con CO<sub>2</sub>, el cálculo inicial de la cantidad de NaOH a colocar dentro de cada frasco se realizó mediante un análisis previo de incubación con una dosis superior a la utilizada en el ensayo y se cuantificó la cantidad máxima respirada por día teniendo la precaución de que la saturación del NaOH con CO<sub>2</sub> no excediera el 50 % (Cosentino, *comunicación personal*). Posteriormente, por retrotitulación con ácido sulfúrico 1N, y mediante el agregado de Cl<sub>2</sub>Ba al 20 % y fenolftaleína como indicador, se obtuvieron las cantidades de C provenientes del CO<sub>2</sub> (C-CO<sub>2</sub>) respirado en cada muestra.

Adicionalmente, en cada experimento se colocaron a incubar 3 recipientes conteniendo agua destilada e hidróxido de sodio, pero sin suelo (blanco) para captar el CO<sub>2</sub> del ambiente de cada recipiente y poder descontarlo posteriormente de las mediciones realizadas.

Con el objetivo de seguir de cerca la evolución de respiración microbiana, las titulaciones se realizaron a intervalos regulares, incrementando la frecuencia de mediciones en los días posteriores a las adiciones de residuos. En este sentido, las titulaciones se realizaron los días 0, 1, 3, 7, 14, 21, 31, 41, 42, 44, 48, 56, 62, 63, 65, 69, 76, 84, 85, 87, 90, 97, 104 y 120 de incubación en el experimento 1, y los días 0, 3, 7, 10, 17, 24, 30, 37, 51, 62 en el experimento 2.

Para determinar la respiración basal de las muestras de suelo, el día previo al inicio de ambos experimentos, se incubaron los recipientes con los testigos absolutos de cada tipo de suelo (muestras sin adición de residuos) y se determinó la respiración por titulación el día siguiente (día 0—inicio experimentos). Para evitar la generación de un ambiente de anoxia en los recipientes de incubación, éstos permanecieron abiertos por un lapso aproximado de una hora durante el transcurso de cada titulación.

Con los datos de respiración diaria y acumulada obtenidos en las distintas fechas de medición se evaluó la dinámica de la respiración del suelo. Adicionalmente, y con los datos promedio de respiración diaria para un período de 13-15 días posterior a la adición de residuos en el experimento 1, y 10 días en el experimento 2, se analizaron y compararon las tasas respiratorias medias de los tratamientos.

### 5.2.3. Determinación de la estabilidad de los agregados

Los días 0, 41, 84 y 120 en el experimento 1 (coincidentes con el inicio del experimento, la adición de residuos en la F3 y con el fin del experimento, respectivamente), y los días 0, 3, 10, 30 y 62 en el segundo experimento, se realizaron muestreos destructivos de las muestras en incubación para evaluar la estabilidad de los agregados por medio de la metodología propuesta por Le Bissonais (1996).

Debido a que dicha metodología utiliza agregados entre 3 y 5 mm, y en los recipientes de incubación se introdujeron agregados <5 mm, las muestras debieron ser retamizadas cuidadosamente al momento de los diferentes muestreos destructivos. El procedimiento metodológico llevado a cabo para la evaluación de la estabilidad de los agregados es idéntico al descrito en el capítulo 2 de esta tesis, obteniéndose como resultado de la estabilidad de los agregados el diámetro medio ponderado de los pretratamientos de humedecimiento repentino (DMP<sub>hr</sub>), disgregación mecánica (DMP<sub>dm</sub>), y humedecimiento lento (DMP<sub>hl</sub>). Además, fue calculado el promedio de los tres pretratamientos (DMP<sub>LB</sub>).

#### *5.2.4. Determinación del contenido de C de los carbohidratos extractables en agua caliente*

Para la determinación del contenido de C de los carbohidratos extractables en agua caliente (C-CEAC), se utilizó la técnica propuesta por Ghani et al. (2003) con modificaciones. Para ello se utilizaron las muestras de suelo provenientes del experimento 1 (días 0, 41, 84 y 120) y experimento 2 (días 0, 3, 10, 30 y 62). Tres gramos de suelo seco al aire y tamizado por 2 mm se introdujeron en tubos tipo “Falcón” con 30 mL de agua destilada, se agitó por 30 min a 180 RPM y se incubó a 80 °C por 16 h. Posteriormente los tubos conteniendo las muestras se centrifugaron durante 20 minutos a 3500 RPM y a continuación se filtró el sobrenadante.

Un mililitro del extracto obtenido se mezcló con 1 mL de Fenol al 5 % y 5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado en un tubo de ensayo y se midió la absorbancia a 485 nm utilizando un espectrofotómetro Jenway modelo 6310 (Jenway. Felsted, Essex. England). En función de una curva patrón obtenida previamente con sacarosa, se determinó el contenido de C-CEAC.

#### *5.2.5. Análisis estadísticos*

Para analizar las diferencias entre las medias de los distintos tratamientos se realizaron análisis de varianza (ANAVA). Cuando se detectaron diferencias significativas las medias se separaron a través de un test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05). Previo al análisis de los datos, se realizaron las pruebas de homogeneidad de la varianza y normalidad.

En el experimento 1, la variación temporal de los DMP's afectados por la frecuencia de adición de residuos, se analizó empleando los coeficientes de variación (CV) de los tratamientos de adición de residuos. De similar manera a lo descrito en el capítulo 4, el CV se obtuvo del promedio y los desvíos estándar de los DMP's de todos los muestreos destructivos para un mismo tratamiento de adición de residuo, suelo y bloque.

Para evaluar la asociación entre la estabilidad de los agregados y el C-CEAC, se realizaron correlaciones utilizando el procedimiento de Pearson. Todos los análisis se realizaron utilizando el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2011).

Adicionalmente, en el experimento 1, se relacionaron las tasas de cambio en la respiración con las tasas de cambio en el DMP<sub>hl</sub> durante el período de la incubación. Para ello, se consideraron los cambios diarios en respiración y agregación que ocurrieron entre los diferentes períodos anteriores a los muestreos destructivos (0-41 días, 41-84 días, 84-120 días).

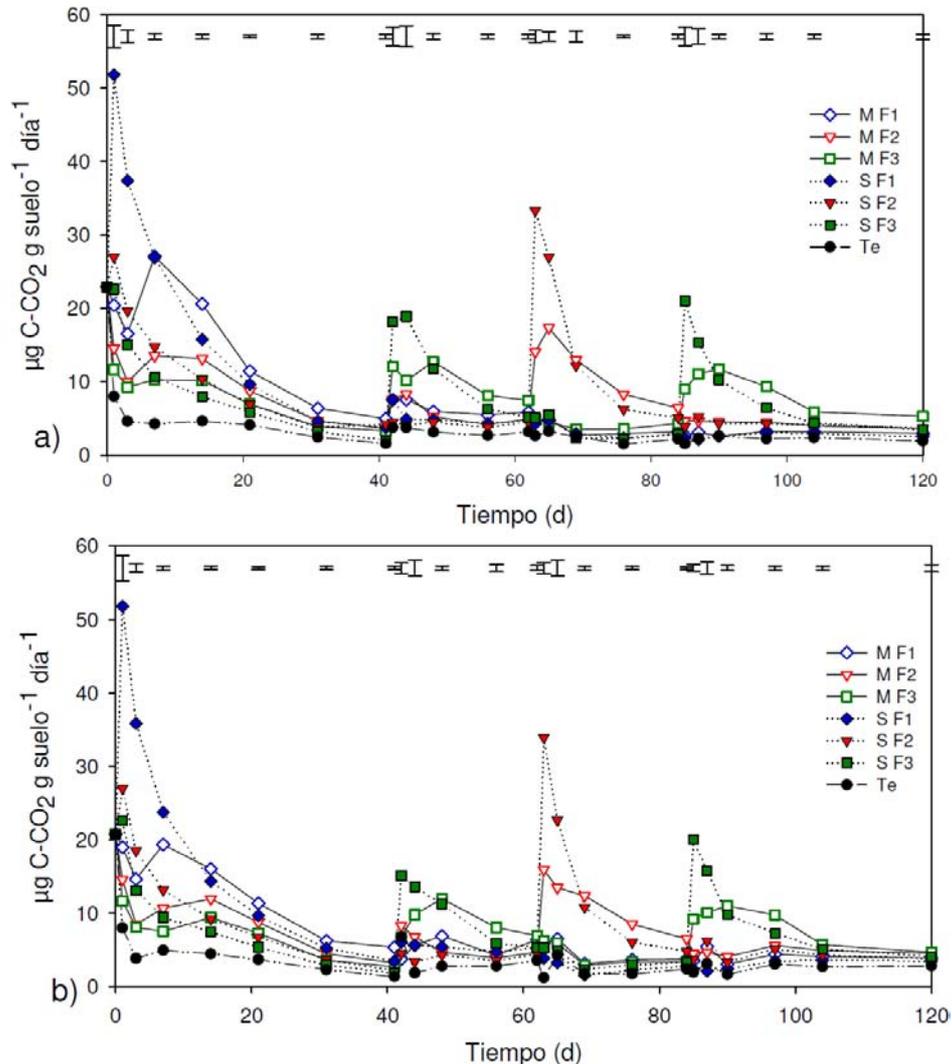
### **5.3. Resultados**

#### *5.3.1. Evolución de la respiración del suelo durante la incubación*

##### *5.3.1.1. Experimento 1*

En el experimento 1, la evolución de la respiración diaria en ambos suelos fue similar en función del tipo de residuo adicionado (Figura 5.1), registrándose un pico de respiración instantánea muy marcado en los tratamientos que recibieron residuos de soja el cual descendió rápidamente a los pocos días de la adición de residuos. En cambio, los

tratamientos que recibieron residuos de maíz en ambos suelos reaccionaron más lentamente, y llegaron a un pico de respiración menor que en el caso de la soja, aunque se mantuvo elevada por un mayor período de tiempo (Figura 5.1).



**Figura 5.1.** Evolución de la actividad respiratoria del suelo ante distintas calidades y frecuencias de residuos vegetales aportados y testigos sin residuos en: a) un Molisol, b) un Vertisol. M: Maíz; S: Soja; Te: Testigo; F1: 6 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio; F2: 3 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio y 3 Mg ha<sup>-1</sup> al día 62; F3: 2 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio, 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 41 y 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 84. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación.

En los diferentes tratamientos, el incremento en la actividad respiratoria del suelo luego de la adición de residuos fue proporcional a la cantidad de residuos vegetales adicionados. La mayor frecuencia de adición de residuos permitió mantener una mayor actividad respiratoria por más tiempo en comparación con el tratamiento que recibió una única adición de residuos el cual registró escasas fluctuaciones luego de los 40 días de iniciado el ensayo (Figura 5.1).

El máximo valor de respiración instantánea ( $53 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g suelo}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) se detectó en el Vertisol, en el tratamiento que recibió la máxima dosis de residuos de soja (F1) y al día siguiente de iniciado el experimento 1 (Figura 5.1b). Por otro lado, la adición de la dosis máxima de residuos de maíz (F1), produjo un pico de respiración más retrasado que en el caso de utilizar residuos de soja (día 7 de iniciado el

experimento 1). El pico máximo de respiración al utilizar residuos de maíz ( $27 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g suelo}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) se detectó en el Molisol (Figura 5.1a).

Por otra parte, las menores tasas de respiración en ambos suelos se detectaron en los tratamientos testigo (Figura 5.1a y b), registrándose sólo leves incrementos los días que ocurrieron las adiciones de residuos en el resto de los tratamientos (días 0, 41, 62 y 84). Como se comentó en la sección de Materiales y Métodos, luego de la adición de residuos todos los recipientes de incubación (inclusive los testigos) se agitaron cuidadosamente realizando 10 giros completos para facilitar el contacto de los mismos con los agregados, lo cual pudo favorecer el leve incremento registrado en la respiración.

La adición de residuos en una sola vez permitió lograr altas tasa medias iniciales de respiración (entre  $17,0$  y  $24,6 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) (Tabla A.5), aunque las mismas se mantuvieron en bajos valores luego de la mitad del período de incubación (entre  $2,8$  a  $4,2 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) (Tabla A.5). Por otra parte, la aplicación de residuos en la F2, permitió lograr tasas medias entre  $11,2$  y  $14,1 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$  para el período 0-14 días, y  $10,9$  a  $12,8 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$  para el período 62-76 días. Sin embargo, durante los períodos 41-56 y 84-97 días las tasas respiratorias se mantuvieron bajas (entre  $4,0$  y  $5,3 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$  y entre  $4,4$  a  $5,0 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) (Tabla A.5).

Un resultado interesante surgió al evaluar la F3. En los distintos tipos de suelo y calidad de residuos utilizados, las tasas respiratorias medias se mantuvieron elevadas por un mayor período de tiempo en comparación con la F1 y F2 (Tabla A.5). A excepción del período 62-76 en que las tasas respiratorias medias se mantuvieron bajas (entre  $3,0$  y  $3,8 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ), en el resto de los períodos analizados las tasas respiratorias medias presentaron valores elevados y similares (entre  $9,6$  y  $10,8 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ). Este resultado, si bien es obtenido en condiciones controladas, permitiría confirmar lo especulado en la Figura 1.3 de esta tesis, que indica que una adición más frecuente de residuos vegetales, logrado al intensificar las secuencias de cultivos, permite mantener la actividad microbiana del suelo elevada por un mayor período en comparación con las adiciones esporádicas de residuos vegetales.

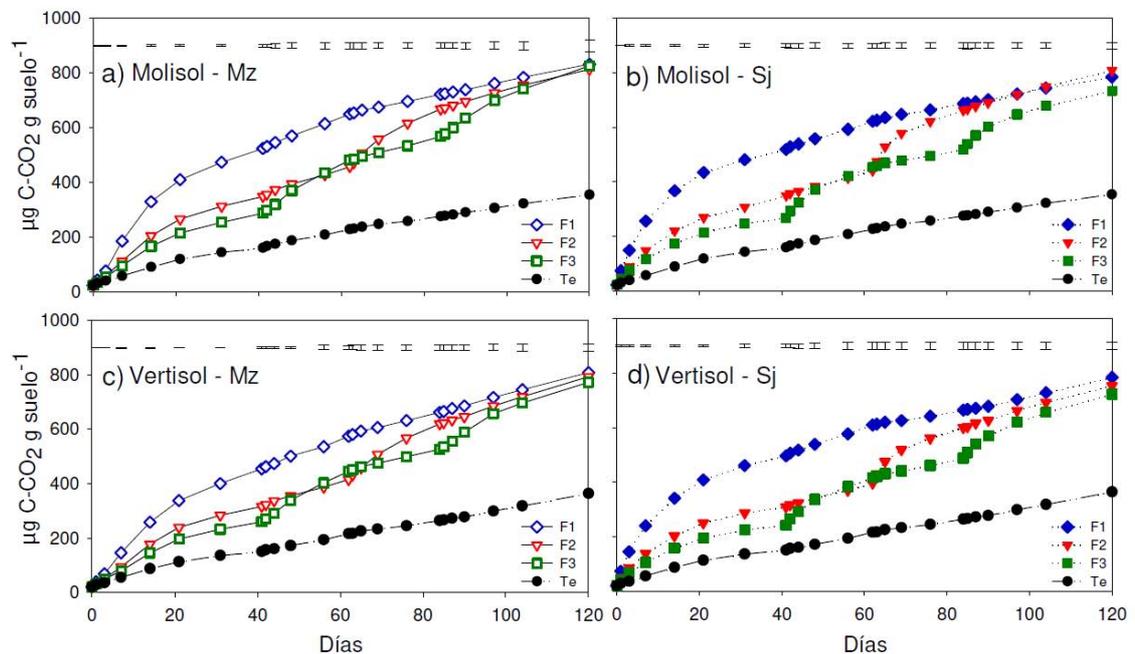
Cuando los datos de respiración diaria se acumularon, se detectó una tendencia similar entre ambos suelos y calidades de residuos adicionados (Figura 5.2). Durante el período inicial del experimento la F1 arrojó una mayor respiración acumulada en comparación con las F2 y F3, diferencia que se fue minimizando con el transcurrir los períodos de incubación (Figura 5.2). En ambos suelos y tratamientos correspondientes, se registraron picos de respiración adicionales luego de cada momento en los que se agregaron residuos vegetales (días 41, 62 y 84 de incubación) (Figura 5.1a, b; Figura 5.2).

Al analizar el conjunto de los datos para la fecha final del experimento (día 120), se detectaron diferencias estadísticas significativas en la respiración acumulada entre suelos ( $P < 0,05$ ), calidades de residuos ( $P < 0,001$ ) y frecuencias de adición ( $P < 0,01$ ), aunque no se detectó interacción entre dichas variables analizadas. En este sentido, hubo en promedio de todos los tratamientos (incluyendo al testigo) mayor respiración acumulada en el Molisol ( $736 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ) en comparación con el Vertisol ( $714 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ), al utilizar residuos de maíz ( $807 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ) en comparación con la utilización de residuos de soja ( $764 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ) y con una única aplicación de residuos (F1) ( $802 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ), en comparación con dos (F2) o tres (F3) adiciones de residuos ( $792$  y  $764 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ , respectivamente).

La evaluación de la respiración acumulada en cada tipo de suelo y calidad de residuo utilizado, registró escasas diferencias entre las frecuencias de adición de residuos al final del experimento (Figura 5.2). En los tratamientos que recibieron maíz en el Molisol, no se detectaron diferencias por la frecuencia de adición de residuos (F1:  $832 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ; F2:  $826 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ; F3:  $814 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ) (Figura 5.2a). De manera similar al Molisol, en el Vertisol, la frecuencia de adición de residuos de maíz no afectó la respiración acumulada (Figura 5.2c), aunque los valores fueron levemente inferiores a mayor frecuencia de adición (F1:  $808 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ; F2:  $793 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ; F3:  $772 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ).

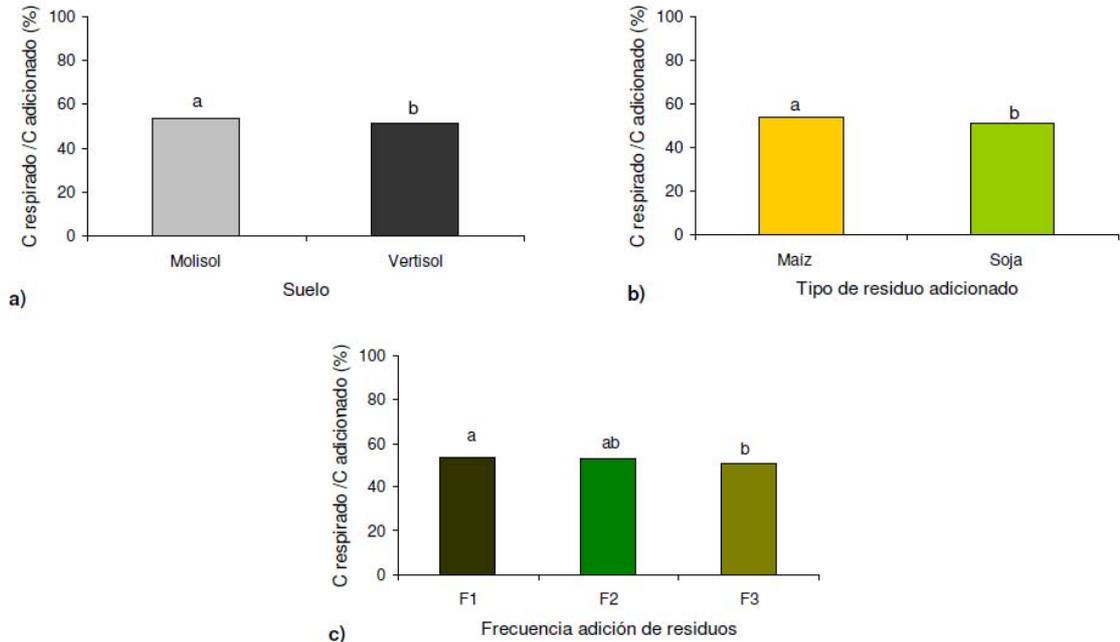
La frecuencia de adición de residuos de soja, afectó la respiración acumulada ( $P < 0,05$ ) del suelo al final del experimento en el Molisol (Figura 5.2b). En este suelo, la adición de residuos de soja en dos veces (F2), presentó el mayor valor de respiración acumulada ( $809 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ), diferenciándose significativamente de la F3 ( $734 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ), aunque no de la F1 ( $785 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ). En el Vertisol, la frecuencia de adición de residuos de soja, no afectó la respiración acumulada al final del experimento (Figura 5.2d), aunque, de manera similar a lo registrado con la adición de residuos de maíz en ambos suelos, los valores fueron menores a mayor frecuencia de adición (F1:  $784 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ; F2:  $754 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ; F3:  $722 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ).

Los valores de respiración acumulada en las situaciones testigo fueron notablemente inferiores a los tratamientos con adición de residuos, sin detectarse diferencias estadísticas significativas entre los tipos de suelo evaluados (Vertisol:  $364 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ; Molisol:  $354 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ).



**Figura 5.2.** Respiración acumulada del suelo ante distintas frecuencias de adición de residuos de maíz (Mz, a y c) y soja (Sj, b y d) y testigos sin residuos en un Molisol (a y b) y un Vertisol (c y d). F1:  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  al inicio; F2:  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$  al inicio y  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$  al día 62; F3:  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  al inicio,  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  al día 41 y  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  al día 84; Te: Testigo. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación.

Al evaluar la relación entre el C respirado y el adicionado con los residuos se detectaron diferencias significativas entre los suelos evaluados ( $P < 0,01$ ), calidad de residuos ( $P < 0,001$ ) y frecuencia de adición ( $P < 0,01$ ), sin detectarse interacción entre las variables evaluadas. Se registró una mayor proporción de C de los residuos respirado en el Molisol en comparación con el Vertisol, en los tratamientos que recibieron residuos de maíz en comparación con los que recibieron residuos de soja, y con la F1 de adición de residuos, en comparación con la F3 (Figura 5.3).



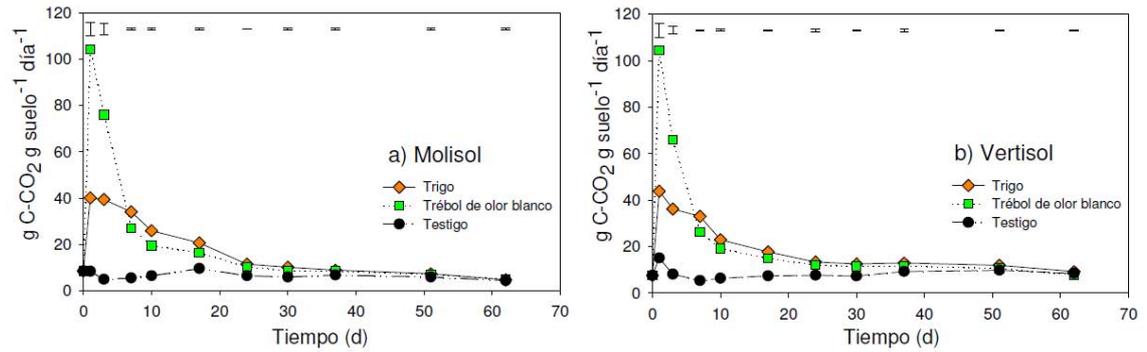
**Figura 5.3.** Proporción del C de los residuos vegetales que fueron respirados durante el período de incubación, a) en cada tipo de suelo (Molisol y Vertisol), b) entre calidades de residuos (maíz y soja), c) entre frecuencias de adición (F1: 6 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio; F2: 3 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio y 3 Mg ha<sup>-1</sup> al día 62; F3: 2 Mg ha<sup>-1</sup> al inicio, 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 41 y 2 Mg ha<sup>-1</sup> al día 84). Las letras sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05).

### 5.3.1.2. Experimento 2

En el segundo experimento de incubaciones, se registró un comportamiento similar al detectado en el experimento 1 en cuanto a la respiración del suelo, luego de la adición de residuos de trigo y trébol de olor blanco. Sin embargo, en este experimento surgieron algunas diferencias en cuanto a la magnitud de los valores encontrados.

La adición de un equivalente de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de residuos de trébol de olor blanco produjo un pico muy marcado en la respiración al día siguiente de iniciado el experimento (104  $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo d}^{-1}$ ), sin diferencias entre los suelos evaluados (Figura 5.4). Sin embargo el pico de respiración fue de muy corto plazo, alcanzando, al día 10, una quinta parte del valor hallado al día siguiente de iniciado el experimento (i.e. 20  $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo d}^{-1}$ ).

Por otro lado, la adición de un equivalente de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de residuos de trigo produjo un pico de respiración equivalente a 40  $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo d}^{-1}$  el cual sin embargo, y de manera similar a lo observado con la adición de residuos de maíz en el experimento 1, mantuvo la tasa respiratoria elevada por un período de tiempo mayor en comparación con el residuo de trébol de olor blanco (Figura 5.4).



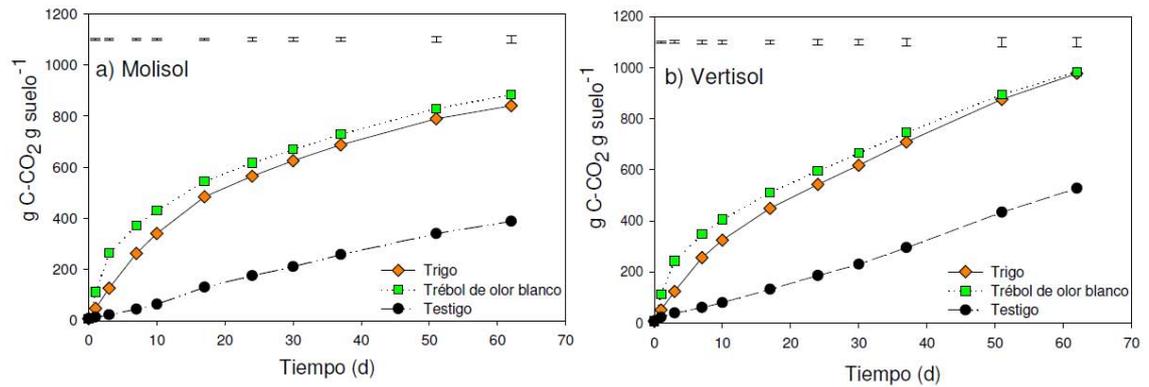
**Figura 5.4.** Evolución de la actividad respiratoria del suelo ante distintas calidades y frecuencias de aportes de residuos vegetales de trigo y trébol de olor blanco y un testigo sin residuos en, a) un Molisol, b) un Vertisol. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación.

Si bien la respiración diaria permitió detectar claramente las diferencias entre las distintas calidades de los residuos aplicados, dichas diferencias desaparecieron en ambos suelos luego de 24 días de iniciado el experimento (Figura 5.4).

Al evaluar las tasas medias de respiración durante los primeros 10 días del experimento no se detectaron diferencias entre los suelos evaluados. Sin embargo las tasas medias de respiración fueron elevadas cuando el residuo utilizado fue trébol de olor blanco ( $41,1 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo d}^{-1}$ ), intermedia cuando el residuo fue trigo ( $32,5 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo d}^{-1}$ ) y bajas en el testigo ( $6,4 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo d}^{-1}$ ). Estos valores resultan sensiblemente superiores a los detectados en el experimento 1 para un similar período posterior a la adición de residuos (Tabla 4 Anexo).

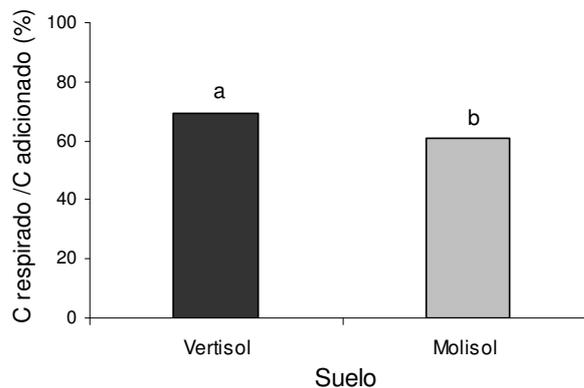
En análisis de la respiración acumulada permitió visualizar que en ambos suelos y durante todo el período de incubación, se registraron los mayores valores en los tratamientos que incluyeron trébol de olor blanco, diferenciándose estadísticamente ( $P < 0,05$ ) de los tratamientos que incluyeron trigo hasta el día 37 de incubación (Figura 5.5), momento a partir del cual no se registraron diferencias entre los tratamientos que incluyeron al trigo y al trébol de olor blanco. Por otro lado, no se registraron diferencias estadísticas significativas en la respiración acumulada entre los suelos analizados hasta el día 37, momento en el cual se se registró una diferencia significativa ( $P < 0,05$ ) en la respiración acumulada a favor del Vertisol hasta la finalización del experimento. Considerando todos los tratamientos dentro de cada suelo (los que presentaron adición de residuos y el testigo), la respiración acumulada en el Vertisol alcanzó el final del ensayo un valor de  $830 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ , siendo un 15% mayor al detectado en el Molisol ( $705 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$ ) (Figura 5.5).

Por otro lado, el tratamiento testigo en ambos suelos se mantuvo en valores bajos en comparación con los tratamientos que recibieron adición de residuos (Figura 5.4). Los tratamientos testigo mantuvieron tasas de respiración similares entre suelos hasta el día 30 de incubación sin diferenciarse significativamente ( $P > 0,05$ ), momento en el cual la tasa respiratoria de todos los tratamientos del Vertisol se incrementaron significativamente ( $P < 0,05$ ) (Figura 5.5). Al final del experimento, el tratamiento testigo del Vertisol registró una respiración un 36 % mayor que en el Molisol (Figura 5.5).



**Figura 5.5.** Respiración acumulada del suelo luego de la adición de residuos de trigo y trébol de olor blanco y un testigo sin residuos en: a) un Molisol, b) un Vertisol. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación.

Cuando se relacionó el C de los residuos vegetales adicionados con el C que fue respirado durante el período de incubación, se detectaron diferencias entre los suelos evaluados ( $P < 0,001$ ), aunque no por calidad de residuos ni interacción suelo\*calidad. En el Vertisol, el 69 % del C de los residuos vegetales adicionados fue respirado durante el período de incubación, mientras que en el Molisol el 61% (Figura 5.6), lo que contrasta con lo registrado en el experimento 1 en que el C respirado de los residuos fue sensiblemente superior en el Molisol en comparación con el Vertisol (Figura 5.3a).



**Figura 5.6.** Proporción del C de los restos vegetales de trébol de olor blanco y trigo que fueron respirados durante el período de incubaciones en cada tipo de suelo. Las letras sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha: 0,05$ ).

### 5.3.2. Evolución de la estabilidad de agregados durante la incubación

#### 5.3.2.1. Experimento 1

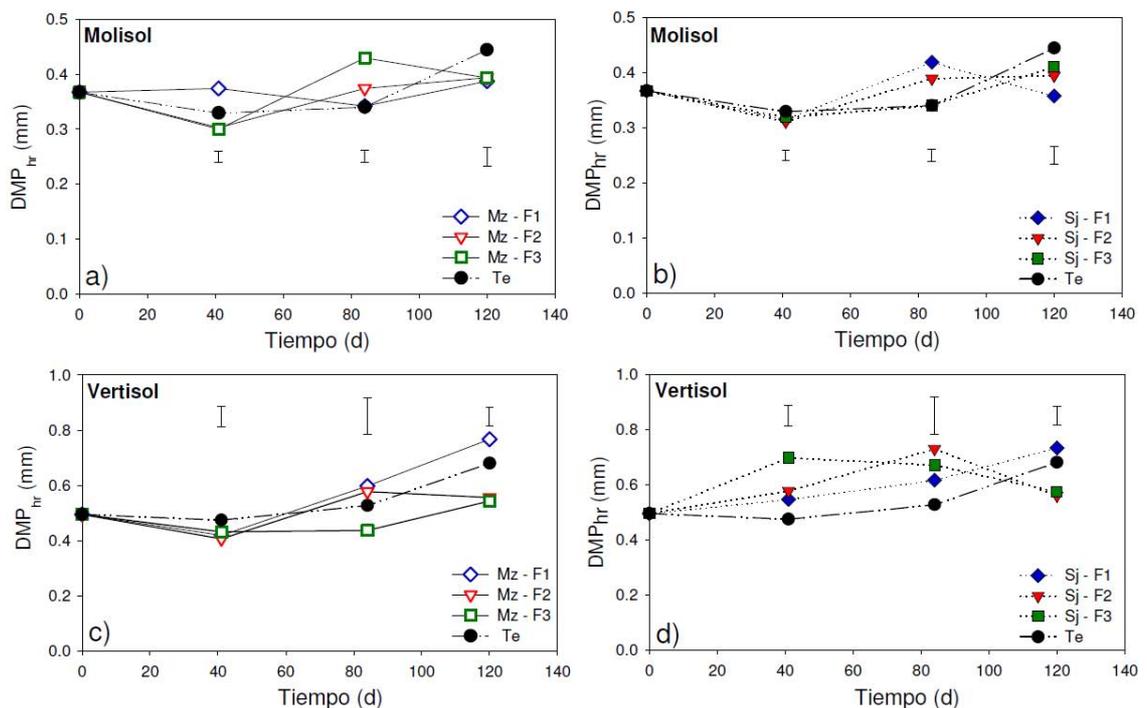
La evaluación de la estabilidad de agregados durante el período de incubación resaltó el comportamiento contrastante entre los suelos y tratamientos de incorporación de residuos evaluados. El ANAVA para el  $DMP_{hr}$  permitió detectar diferencias entre suelos evaluados, tiempos de evaluación y calidades de residuos utilizadas, aunque no entre frecuencias de adición.

Se registró una variación importante entre los tratamientos de incorporación de residuos y los suelos evaluados, con mayor valor de estabilidad de agregados promedio

detectado en el Vertisol en comparación con el Molisol y un incremento hacia el muestreo final en comparación con la evaluación inicial (Figura 5.7).

En el Molisol, el  $DMP_{hr}$  sólo permitió diferenciar el tratamiento testigo de los que recibieron adición de residuos en la evaluación del día 84 de incubación ( $P<0,05$ ). Por otro lado, en el Vertisol, sólo se detectaron diferencias entre los tratamientos que recibieron adición de residuos de soja del resto de los tratamientos en la evaluación del día 41 de incubación (Figura 5.7d).

La evaluación de los CV de los  $DMP_{hr}$  marcó diferencias entre los suelos evaluados, aunque no entre las frecuencias de adición ni calidad de residuos utilizados. En promedio, el Vertisol presentó un mayor CV (20%) en comparación con el Molisol (12%).

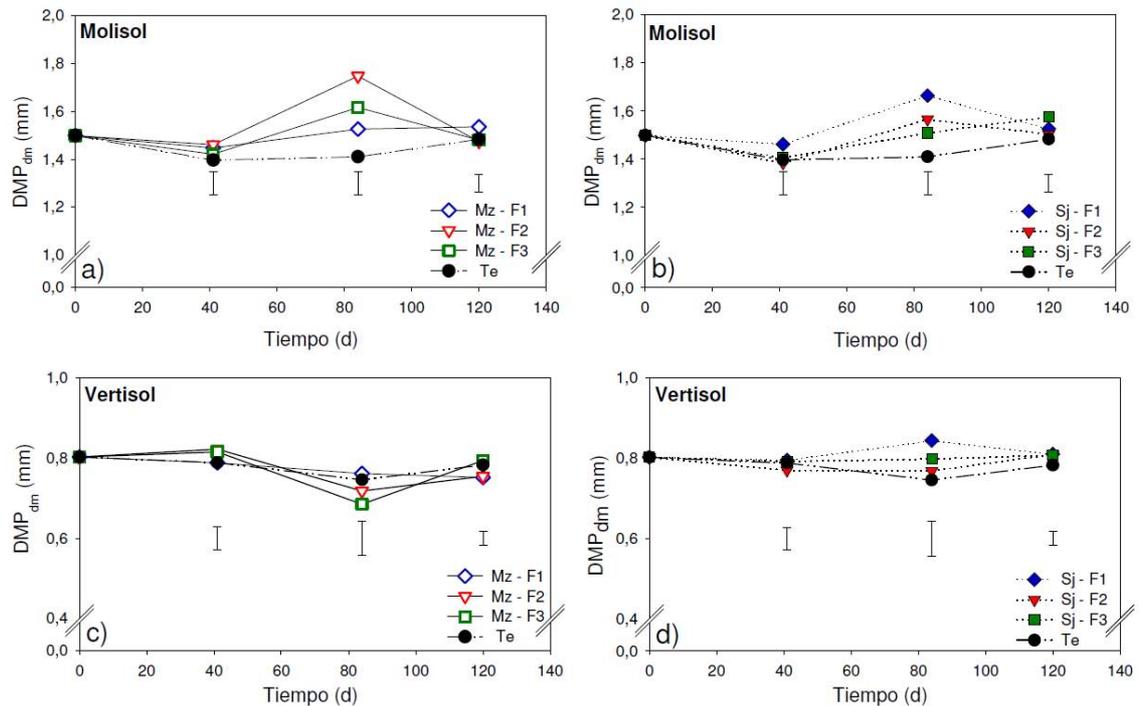


**Figura 5.7.** Evolución del diámetro medio ponderado de los agregados por el pretratamiento de humedecimiento repentino ( $DMP_{hr}$ ) durante el período de incubación luego de la adición de residuos de maíz (Mz: a, c) y soja (Sj: b, d) y de testigos sin residuos (Te) en un Vertisol (c, d) y un Molisol (a, b). Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación.

El  $DMP_{dm}$  presentó escasas variaciones a lo largo del período de incubación, las cuales fueron mayores en el Molisol en comparación con el Vertisol (Figura 5.8). En promedio, el  $DMP_{dm}$  fue un 48 % mayor en el Molisol en comparación con el Vertisol ( $P<0,0001$ ). No se registraron diferencias en el  $DMP_{dm}$  debidas a la frecuencia y calidad de adición de residuos al evaluar el conjunto de los datos. En general, los tratamientos que recibieron adición de residuos incrementaron la estabilidad de los agregados en comparación con el testigo ( $P<0,05$ ), aunque sólo se diferenciaron estadísticamente del testigo en la evaluación del día 84 de incubación del Molisol (Figura 5.8 a y b).

El análisis de los CV del  $DMP_{dm}$  no arrojó diferencias entre los tratamientos evaluados, dada las escasas variaciones en la agregación en los diferentes momentos de

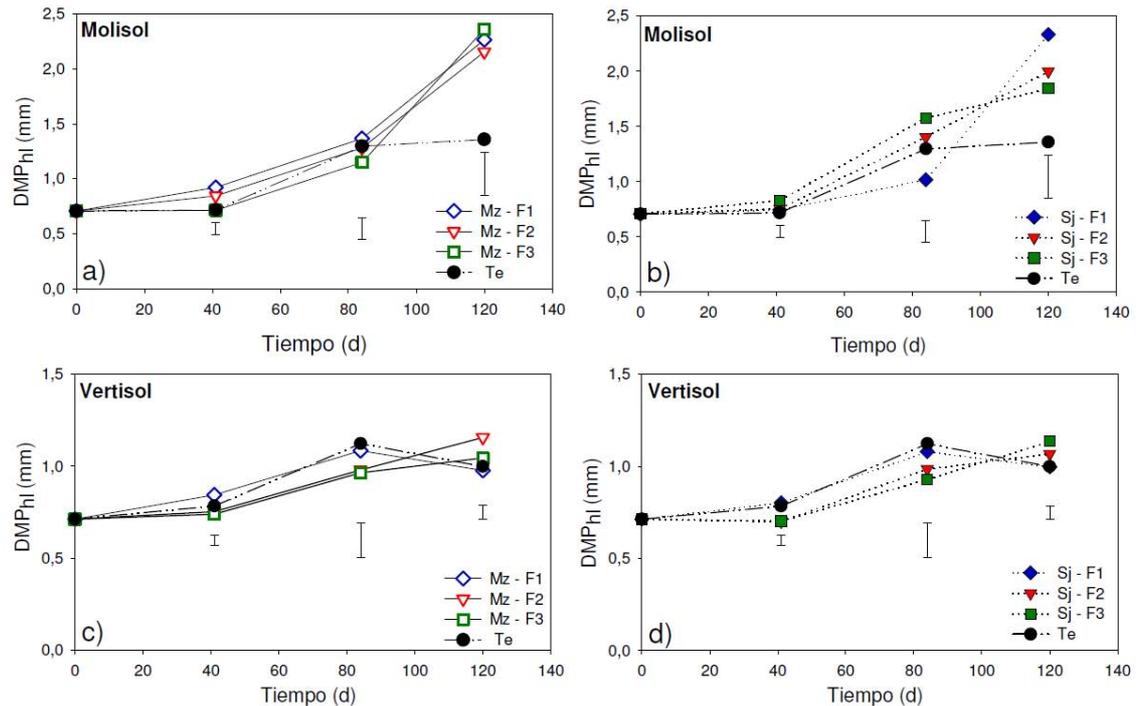
evaluación. En promedio, el CV del  $DMP_{dm}$  promedio de todo el período de incubación fue de 7%.



**Figura 5.8.** Evolución del diámetro medio ponderado de los agregados por el pretratamiento de disgregación mecánica ( $DMP_{dm}$ ) durante el período de incubación luego de la adición de residuos de maíz (Mz: a, c) y soja (Sj: b, d) y de testigos sin residuos (Te) en un Vertisol (c, d) y un Molisol (a, b). Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación.

El pretratamiento de humedecimiento lento fue sensible para detectar incrementos en la estabilidad de los agregados con el tiempo de incubación (Figura 5,9). Se registró un mayor  $DMP_{hl}$  en el Molisol en comparación con el Vertisol, aunque sin diferencias entre frecuencias de adición ni calidades de residuos. En el Molisol, el  $DMP_{hl}$  al final del experimento fue significativamente superior ( $P<0,05$ ) en los tratamientos que recibieron adición de residuos frente al testigo (Figura 5.9 a y b), mientras que no ocurrió lo mismo en el Vertisol (Figura 5.9 c y d). La evolución del  $DMP_{hl}$  no presentó un patrón claro a lo largo del período de incubación y el efecto de la adición de residuos fue escasamente evidente, a excepción del Molisol en el muestreo final, presentando en algunas ocasiones mayores valores de estabilidad estructural en el tratamiento testigo frente a los tratamientos que recibieron adición de residuos vegetales.

Dada las mayores variaciones detectadas en la agregación en el pretratamiento de humedecimiento lento en comparación con los demás pretratamientos a lo largo del período de incubación (humedecimiento repentino y disgregación mecánica), los CV registrados fueron mayores en comparación con el resto de los pretratamientos, aunque el ANOVA de los CV sólo permitió detectar diferencias entre tipos de suelo ( $P<0,05$ ), y no entre calidades ni frecuencias de adición. En promedio el CV del Molisol fue mayor (53%) en comparación con el Vertisol (22%).



**Figura 5.9.** Evolución del diámetro medio ponderado de los agregados por el pretratamiento de humedecimiento lento ( $DMP_{hl}$ ) durante el período de incubación luego de la adición de residuos de maíz (Mz: a, c) y soja (Sj: b, d) y de testigos sin residuos en un Vertisol (c, d) y un Molisol (a, b). Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación.

En todos los tratamientos evaluados, el porcentaje de agregados  $>2000 \mu m$  presentó un patrón similar al descrito para los DMP's de los diferentes pretratamientos. El rango de los valores de agregados  $>2000 \mu m$  para los diferentes pretratamientos fue distinto entre suelos evaluados.

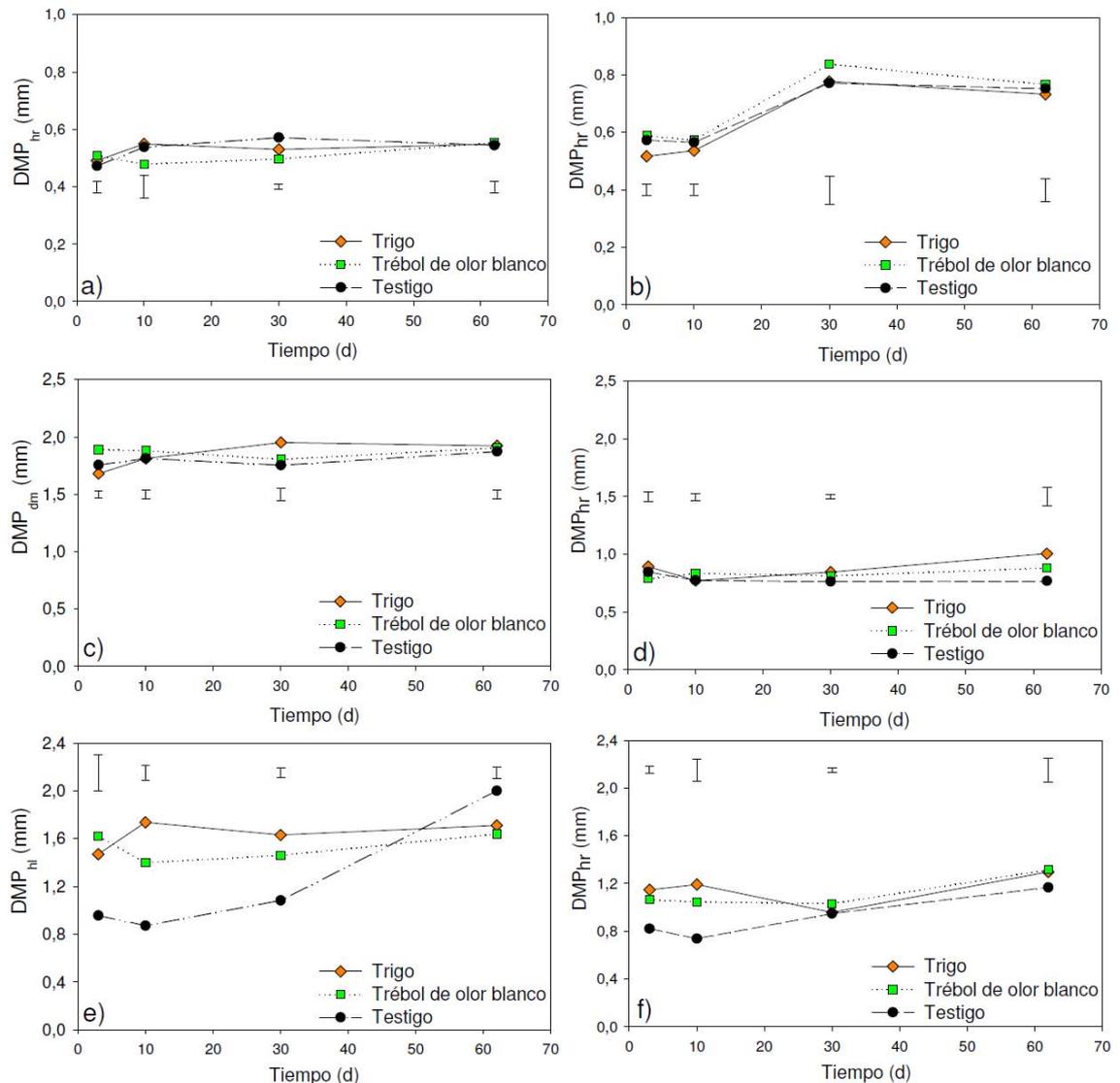
En el Molisol se registraron porcentajes de agregados  $>2000 \mu m$  por humedecimiento repentino entre 0,2-2,4 %, y entre 0,22 y 11 % en el Vertisol. En el pretratamiento de disgregación mecánica el rango de datos de agregados  $>2000 \mu m$  fue diferente entre los suelos ( $P<0,05$ ) (16-39 % en el Molisol; 0,4-3,3 % en el Vertisol). Por otra parte, el rango de datos de mayor amplitud se detectó con el pretratamiento de humedecimiento lento (2,5-73,0 % en el Molisol; 1,8-19,1 % en el Vertisol).

### 5.3.2.2. Experimento 2

Al igual que en el experimento 1, la evaluación de la estabilidad estructural arrojó valores diferentes entre los pretratamientos y suelos evaluados en el experimento 2.

El  $DMP_{hr}$  presentó valores estadísticamente diferentes entre suelos y momentos evaluados, aunque dichas diferencias fueron debidas principalmente a la mayor estabilidad detectada en el Vertisol y en los momentos 30 y 62 de evaluación (Figura 5.10 a y b). Sin embargo, este pretratamiento no permitió detectar diferencias entre calidad de residuos. En el Molisol,  $DMP_{hr}$  fue muy estable en el tiempo y presentó un rango de valores de 0,46-0,68 mm. Por otro lado, en el Vertisol el rango de valores obtenido fue de 0,48-0,93 mm.

El  $DMP_{dm}$  presentó escasas variaciones a lo largo del período de incubaciones en ambos suelos evaluados. El pretratamiento de disgregación mecánica, permitió detectar diferencias importantes entre los suelos evaluados ( $P<0,05$ ), siendo el  $DMP_{dm}$  en promedio un 55% mayor en el Molisol en comparación con el Vertisol (Figura 5.10 c y d). El rango de valores de  $DMP_{dm}$  en el Molisol estuvo comprendido entre 1,6-2,1 mm, y en el Vertisol entre 0,7-1,1 mm.



**Figura 5.10.** Evolución del diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados por tres pretratamientos de la método de estabilidad de agregados de Le Bissonnais (1996) durante el período de incubación luego de la adición de residuos de trigo y trébol de olor blanco y un testigo sin residuos en un Molisol (a, c y e) y un Vertisol (b, d y f).  $DMP_{hr}$ : DMP por el pretratamiento de humedecimiento repentino.  $DMP_{dm}$ : DMP por el pretratamiento de disgregación mecánica.  $DMP_{hl}$ : DMP por el pretratamiento de humedecimiento lento.. Las barras sobre la figura indican el error estándar de la media de las mediciones para cada fecha de evaluación.

La evaluación de la estabilidad de los agregados por el pretratamiento de humedecimiento lento fue la que permitió detectar claras diferencias entre los tratamientos evaluados (Figura 5.10e, f). En el Molisol, la adición de residuos de trigo y trébol de olor blanco incrementaron significativamente ( $P<0,05$ ) el  $DMP_{hl}$  en el día 3 de

evaluación en comparación con el testigo, aunque no se registraron diferencias entre calidades. Por otra parte, en la evaluación del día 10 el tratamiento que recibió residuos de trigo presentó un  $DMP_{hl}$  un 20% mayor que el tratamiento que recibió trébol de olor blanco y 50% mayor que el tratamiento testigo (Figura 5.10e). Por otro lado, al día 30 de evaluación los tratamientos que recibieron adición de residuos se diferenciaron del tratamiento testigo, aunque no se detectó diferencia entre las calidades utilizadas. En la evaluación final del ensayo (día 62) en el Molisol, el  $DMP_{hl}$  fue significativamente ( $P<0,05$ ) mayor en el tratamiento testigo (19%) en comparación con los que recibieron adición de residuos, los cuales no difirieron estadísticamente entre sí.

En el Vertisol, sólo se detectaron diferencias en el  $DMP_{hl}$  en la evaluación del día 3 de incubaciones, aunque dichas diferencias fueron entre el tratamiento testigo y los que recibieron adición de residuos.

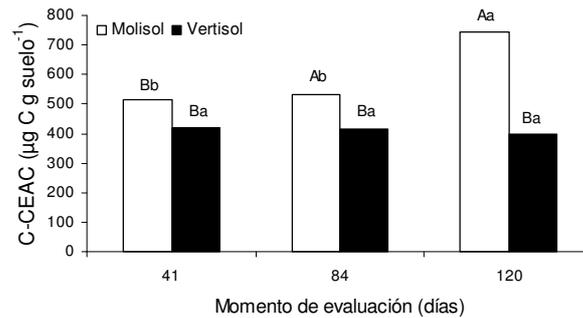
Al igual que en el experimento 1, los agregados  $>2000 \mu m$  en el segundo experimento presentaron una distribución similar a la registrada en el DMP por los distintos pretratamientos de estabilidad de agregados. En el Molisol el rango de los porcentajes de agregados  $>2000 \mu m$  por humedecimiento repentino detectado estuvo entre 1,9-6,4 %, mientras que estuvo entre 1,5-12 % en el Vertisol. En el pretratamiento de disgregación mecánica el rango de datos de agregados  $>2000 \mu m$  fue de 30-49 % en el Molisol y de 1,1-11,4 % en el Vertisol. Por otra parte, el rango de los agregados  $>2000 \mu m$  detectado con el pretratamiento de humedecimiento lento fue de 7,5-42,5 % en el Molisol y 4,1-22,6 % en el Vertisol.

### 5.3.3. Contenido de C de carbohidratos extractables en agua caliente (C-CEAC)

#### 5.3.3.1. Experimento 1

Al realizar un ANAVA general de los datos, se detectó diferencias entre suelos en el contenido de C-CEAC ( $P<0,001$ ), siendo un 45 % mayor en el Molisol ( $597 \mu g C g \text{ suelo}^{-1}$ ) con respecto al Vertisol ( $410 \mu g C g \text{ suelo}^{-1}$ ). Por otro lado, se registró un mayor contenido de C-CEAC al final del experimento ( $P<0,001$ ) y en los tratamientos que recibieron residuos de maíz ( $536 \mu g C g \text{ suelo}^{-1}$ ) en comparación con los que recibieron soja ( $478 \mu g C g \text{ suelo}^{-1}$ ), los cuales se diferenciaron estadísticamente ( $P<0,05$ ), aunque dichos tratamientos no se diferenciaron del testigo ( $485 \mu g C g \text{ suelo}^{-1}$ ). Asimismo, se detectó una interacción significativa ( $P<0,001$ ) entre el tipo de suelo y el momento de evaluación (Figura 5.11). En el conjunto de los datos, no se detectó diferencia por la frecuencia de adición de residuos.

Cuando el ANAVA se realizó por tipo de suelo, sólo se detectaron diferencias en el momento de evaluación ( $P<0,001$ ) y para el Molisol, con mayores contenidos de C-CEAC en la evaluación final del experimento en comparación a las evaluaciones de los momentos 41 y 84 (Figura 5.11). Por otra parte, cuando el ANAVA se realizó por momento de evaluación (días 41, 84 y 120), se detectaron en mayores contenidos de C-CEAC en el Molisol en comparación con el Vertisol en los momentos de evaluación 84 y 120 ( $P<0,001$ ), aunque no difirieron entre suelos en la evaluación del día 41 (Figura 5.11).



**Figura 5.11.** Contenido de C de los carbohidratos extractables en agua caliente (C-CEAC) en diferentes momentos de evaluación (día 41, 84 y 120) y para dos suelos (un Molisol y un Vertisol) de Entre Ríos, Argentina. Las letras sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a Test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05). Mayúsculas: entre suelos para un mismo momento de evaluación. Minúsculas: entre momentos de evaluación para un mismo tipo de suelo.

### 5.3.3.2. Experimento 2

Al analizar el contenido de C-CEAC se detectó un valor 67% mayor en el Molisol en comparación con el Vertisol ( $P < 0,0001$ ). Por otro lado se encontraron valores superiores de C-CEAC en los tratamientos testigo de ambos suelos ( $P < 0,01$ ) en comparación con los que recibieron adición de residuos, principalmente en el Vertisol (Tabla 5.2). Además, y a diferencia de lo detectado en el experimento 1, se registró una disminución significativa ( $P < 0,05$ ) en el contenido de C-CEAC de acuerdo al momento de evaluación. El mayor contenido de C-CEAC ( $648 \mu\text{g C g suelo}^{-1}$ ) se detectó en la evaluación del día 3 de incubaciones, valor que difirió estadísticamente del contenido de C-CEAC detectado al final del experimento ( $489 \mu\text{g C g suelo}^{-1}$ ), aunque ninguno de estos valores difirió de los hallados en los momentos de evaluación intermedios (día 10:  $573 \mu\text{g C g suelo}^{-1}$ ; día 30:  $535 \mu\text{g C g suelo}^{-1}$ ) (Tabla 5.2).

**Tabla 5.2.** Contenido de C de los carbohidratos extractables en agua caliente (CEAC) en diferentes momentos de evaluación para un Molisol y un Vertisol con diferentes calidades de residuos adicionados.

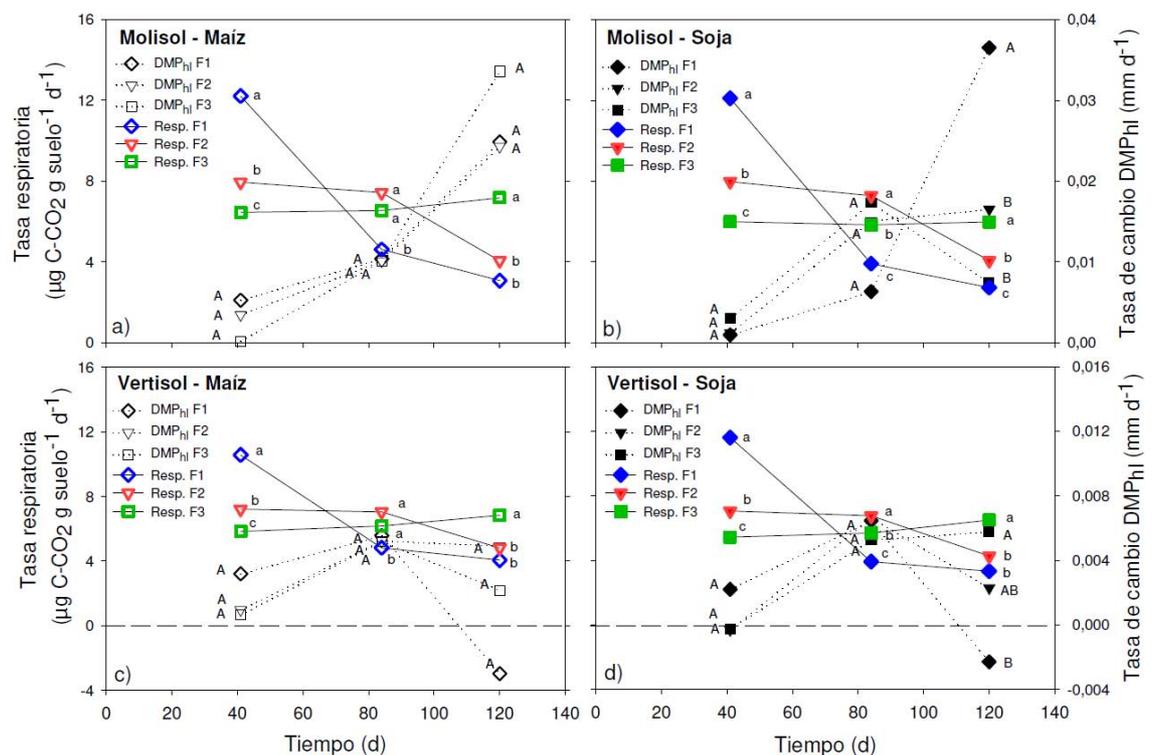
Cultivo	Momento de evaluación	C de CEAC ( $\mu\text{g C g}^{-1}$ suelo)	
		Molisol	Vertisol
Trigo	Día 3	771 Aa	374 Ba
	Día 10	770 Aa	306 Ba
	Día 30	587 Aa	350 Ba
	Día 62	584 Aa	384 Ba
Trébol de olor blanco	Día 3	908 Aa	350 Ba
	Día 10	624 Aa	291 Ba
	Día 30	638 Aa	375 Ba
	Día 62	577 Aa	345 Ba
Testigo	Día 3	813 Aa	671 Ba
	Día 10	828 Aa	621 Ba
	Día 30	727 Aa	532 Ba
	Día 62	598 Aa	448 Ba

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha < 0,05$ ). Mayúsculas: entre suelos para un mismo tipo de cultivo y momento de evaluación. Minúsculas: entre momentos de evaluación para un mismo suelo y cultivo.

### 5.3.4. Relación entre la tasa respiratoria y la tasa de cambio en la estabilidad de agregados ante diferentes frecuencias de adición de residuos

No se detectaron diferencias estadísticas significativas entre frecuencias de adición de residuos para ninguno de los suelos ni momentos de muestreo al analizar las tasas de cambio en el  $DMP_{hl}$  utilizando residuos de maíz (Figura 5.12 a y c). Sin embargo, hacia el final del período de incubaciones la tasa de cambio en el  $DMP_{hl}$  en el Vertisol fue significativamente mayor ( $P < 0,05$ ) en la F3 en comparación con la F1 (Figura 5.12 d). En el Molisol, la tasa de cambio en el  $DMP_{hl}$  fue mayor en la F1 en comparación con la F2 y F3.

A pesar de limitado impacto de la adición de residuos sobre las tasas de cambio del  $DMP_{hl}$ , los valores detectados en esta variable presentaron una tendencia similar a lo registrado en las tasas de respiración. En el período 0-41 días se detectó una elevada actividad microbiana en la F1 debido a la mayor cantidad de residuos aportados, los que resultaron en una elevada tasa de cambio en el  $DMP_{hl}$ . Por otro lado, en el último período de incubación, las tasas de respiración en los diferentes tratamientos fueron bajas en la F1 en comparación con la F3, lo que resultó en una menor tasa de cambio en el  $DMP_{hl}$ , a excepción del tratamiento que recibió residuos de soja en el Molisol (Figura 5.12 b).



**Figura 5.12.** Tasas respiratorias promedio y tasas de cambio en la estabilidad de los agregados por el pretratamiento de humedecimiento lento ( $DMP_{hl}$ ) ante distintas frecuencias de adición de residuos de maíz (a y c) y soja (b y d) en un Molisol (a y c) y un Vertisol (b y d) de Entre Ríos, Argentina. F1:  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  al inicio; F2:  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$  al inicio y  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$  al día 62; F3:  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  al inicio,  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  al día 41 y  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  al día 84. Letras diferentes dentro de un mismo período de incubación indican diferencias estadísticas significativas entre frecuencias de adición de residuos de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha: 0,05$ ). Minúsculas: entre tasas de respiración. Mayúsculas: entre tasas de cambio en el  $DMP_{hl}$ .

### 5.3.5. Relación entre el contenido de C-CEAC y la estabilidad de agregados

En los diferentes experimentos realizados se registró un comportamiento dispar al analizar la relación entre el contenido de C-CEAC con las variables de estabilidad de agregados (Tabla 5.3). En el experimento 1 y para el Molisol, el contenido de C-CEAC se asoció positivamente con los DMP's de los diferentes pretratamientos de estabilidad de agregados, a excepción del DMP<sub>dm</sub>, y con los agregados >2000 µm obtenidos del pretratamiento de humedecimiento lento (Tabla 5.3). En el experimento 2 para el caso del Molisol así como también en ambos experimentos para el caso del Vertisol, no se detectaron asociaciones estadísticas significativas entre el C-CEAC y la estabilidad de los agregados (Tabla 5.3).

**Tabla 5.3.** Coeficientes de correlación (r) entre el contenido de carbono de los carbohidratos extractables en agua caliente (C-CEAC) y la estabilidad de agregados para dos experimentos de incubación de un suelo Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Estabilidad de agregados	C-CEAC			
	Molisol		Vertisol	
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
DMP <sub>hr</sub>	0,55 *	-0,25 NS	-0,42 NS	0,47 NS
DMP <sub>dm</sub>	0,06 NS	-0,43 NS	-0,31 NS	0,56 NS
DMP <sub>hl</sub>	0,71 ***	0,05 NS	-0,01 NS	0,17 NS
DMP <sub>LB</sub>	0,70 ***	-0,19 NS	-0,31 NS	0,53 NS
Agr >2000 µm (hr)	0,17 NS	-0,25 NS	-0,17 NS	0,31 NS
Agr >2000 µm (dm)	0,19 NS	-0,41 NS	-0,32 NS	0,47 NS
Agr >2000 µm (hl)	0,71 ***	0,05 NS	0,09 NS	-0,11 NS

NS, \*, \*\*, \*\*\* indica no significativo,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente. DMP: diámetro medio ponderado; hr: pretratamiento humedecimiento repentino; dm: pretratamiento disgregación mecánica; hl: pretratamiento humedecimiento lento. LB: promedio de los tres pretratamientos. Agr > 2mm: agregados mayores a 2mm para los distintos pretratamientos de la metodología de Le Bissonnais (1996). Las correlaciones en cada experimento se realizaron teniendo en cuenta los tratamientos con adición de residuos vegetales y en cada fecha de muestreo destructivo. Experimento 1, n=18; Experimento 2, n=8.

## 5.4. Discusión

Los valores de respiración registrados en los distintos experimentos fueron proporcionales al tipo de residuo respirado, presentando una respuesta inmediata y de muy corto plazo al utilizar residuos de soja y trébol de olor blanco, mientras que fue menos marcada y de mayor duración al utilizar residuos de maíz y trigo (Figuras 5.1 y 5.4). Se ha demostrado ampliamente que diferentes residuos orgánicos presentan distintas tasas de descomposición (Martens, 2000b, Abiven et al., 2007) lo que ha sido atribuido a la relación C/N de los residuos (Stevenson, 1986) y a la cantidad y composición de ácidos fenólicos que presenten (Martens, 2000a).

En el experimento 1, la mayor frecuencia de adición de residuos permitió mantener una tasa respiratoria más constante en el tiempo en comparación con una única adición de residuos (Figura 5.12; Tabla A.5). Por otro lado, la mayor frecuencia de adición de residuos permitió mantener la tasa de agregación elevada por un mayor período de tiempo en ambos suelos en comparación con una única adición de residuos, principalmente por el pretratamiento de humedecimiento lento (Figura 5.12). Este resultado es novedoso y guarda consistencia con lo sugerido por varios investigadores que indican que el incremento de la actividad biológica del suelo con la adición de residuos favorece la agregación a través de la liberación de varios agentes orgánicos de unión de agregados (Tisdall y Oades, 1982), como las hifas de hongos (Beare et al.,

1997; Abiven et al., 2007) o polisacáridos y lípidos de origen microbiano (Liu et al., 2005; Cosentino, 2006; Abiven et al., 2007).

En ambos experimentos, los pretratamientos de humedecimiento repentino y disgregación mecánica no fueron suficientemente sensibles para detectar diferencias entre los tratamientos de adición de residuos de diferente calidad y frecuencia de adición (Figuras 5.7, 5.8 y 5.10). Sin embargo el pretratamiento de humedecimiento lento permitió detectar diferencias entre los tratamientos en ambos experimentos, principalmente en el Molisol. La mayor agresividad de los pretratamientos de humedecimiento repentino y disgregación mecánica en comparación con el de humedecimiento lento puede ser la causa de la menor sensibilidad para detectar diferencias entre los tratamientos de adición de residuos (Cosentino et al., 2006).

Si bien, en el capítulo 2 se mostró que en el Molisol el pretratamiento de disgregación mecánica fue el más adecuado para evaluar diferentes usos de la tierra, mientras que en el Vertisol lo fue el de humedecimiento lento, la adición de residuos en experimentos de incubaciones de muy corto plazo pudo haber favorecido la liberación de agentes transitorios (Tisdall y Oades, 1982), los cuales proporcionan una débil unión entre los agregados, presentando el pretratamiento menos agresivo mayores probabilidades de detectar diferencias entre tratamientos.

El escaso impacto de la adición de residuos sobre la estabilidad de los agregados pudo deberse a la cantidad de residuos vegetales que fueron adicionados. En ambos experimentos se utilizó un equivalente a  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de residuos ( $1,5 \text{ g C kg}^{-1}$  suelo para maíz y soja,  $1,39 \text{ g C kg}^{-1}$  suelo para trigo y  $1,45 \text{ g C kg}^{-1}$  de trébol de olor blanco), ya que se consideró que es un aporte de residuos razonable y comparable con las adiciones que comúnmente ocurren en condiciones de producción a campo. Un criterio similar fue utilizado por Deneff y Six (2005) en un ensayo de incubaciones de suelos. Sin embargo, la cantidad adicionada contrasta fuertemente con lo reportado por otros investigadores. De Gryze et al. (2005) utilizó un rango de adiciones de  $2,22$  a  $13,3 \text{ g C kg}^{-1}$  ( $13\text{-}78 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), mientras que Cosentino (2006) un rango de  $2,5$  a  $20 \text{ g C kg}^{-1}$  y Bravo-Garza et al. (2010) una adición de  $3 \text{ g C kg}^{-1}$  suelo. Las mayores adiciones de residuos citadas por algunos autores (e.g. Cosentino, 2006) permiten detectar cambios más evidentes en la agregación en comparación con las reportadas en esta tesis.

En esta tesis se detectó un mayor contenido de C-CEAC en el Molisol en comparación con el Vertisol en ambos experimentos. Sin embargo, no se detectaron diferencias entre los tratamientos evaluados al considerar el contenido de C-CEAC. Se ha reportado que dentro de los carbohidratos totales, los CEAC representan una pequeña proporción de elevada labilidad (Haynes, 1999), convirtiéndolo en una propiedad sensible para detectar cambios en el corto plazo debidos al uso de la tierra (Ghani et al., 2003). La escasa cantidad de residuos adicionados en los experimentos puede haber minimizado los efectos en los tratamientos.

A pesar de no registrarse diferencias entre los tratamientos en el contenido de C-CEAC, en el experimento 1 de esta tesis se detectó una asociación significativa entre el contenido de C-CEAC y la estabilidad de los agregados por el pretratamiento de humedecimiento lento en comparación con el resto de los pretratamientos evaluados (Tabla 5.3). Esto coincide con lo reportado por otros investigadores (Cosentino et al., 2006; Abiven et al., 2007). El bajo estrés aplicado a los agregados con el pretratamiento de humedecimiento lento en comparación con los demás pretratamientos favorece la detección de diferencias en estabilidad de agregados por medio de la evaluación del contenido de CEAC (Abiven et al., 2007). Numerosos estudios han reportado una

estrecha relación entre la estabilidad de los agregados y los carbohidratos del suelo (Martens, 2000b; Liu et al., 2005; Cosentino et al., 2006; Abiven et al., 2007), aunque en algunos casos dichas relaciones no fueron registradas (Degens et al 1996; Degens y Sparling, 1996; Haynes, 1999).

En este capítulo se destacó el beneficio de la adición frecuente de residuos, la cual permitió mantener la actividad biológica continua por un mayor período de tiempo y favoreció la estabilización de los agregados (Figura 5.12), aunque dicha respuesta dependió del método utilizado para evaluar la estabilidad de los agregados. Estos resultados coinciden con los observados en el experimento de campo (Capítulo 4), donde secuencias más intensificadas se asociaron con incrementos en la agregación en comparación con las secuencias con barbecho frecuente.

## 5.5. Conclusiones

En cada experimento, la tasa de respiración presentó una respuesta inmediata con la adición de residuos de baja relación C/N como la soja y el trébol de olor blanco, mientras que fue gradual y se mantuvo por un mayor período cuando los residuos fueron maíz o trigo.

La frecuencia de adición de residuos vegetales permitió mantener más altas durante más tiempo, las tasas de respiración microbiana y de agregación en comparación con una única adición de residuos vegetales lo que sugiere que el mantenimiento de la actividad microbiana con la adición frecuente de residuos vegetales favorece la mejora de la agregación.

Dentro de los diferentes pretratamientos de estabilidad de agregados evaluados, el pretratamiento de humedecimiento lento fue el más sensible para detectar diferencias entre los tratamientos evaluados en los dos experimentos y suelos analizados.

## 5.6. Relación con las hipótesis planteadas

En este capítulo se pudo demostrar que la frecuencia de adición de residuos vegetales permitió mantener una mayor actividad biológica por un período de tiempo más prolongado en comparación una única adición de residuos. Por otro lado, el aumento en la frecuencia de adición de residuos permitió mantener la tasa de cambio de la agregación más elevada en el tiempo en comparación con los tratamientos que recibieron una misma cantidad de residuos de manera menos frecuente (Figura 5.12). Estos resultados no proporcionan evidencias suficientes para rechazar la hipótesis 6 que establece que *“independiente del tipo de suelo, a igual cantidad de residuos de cosecha adicionados al suelo, la mayor frecuencia de adición determina un incremento en la estabilidad de agregados”*, aunque hay que destacar que los cambios más evidentes en la estabilidad de los agregados se detectaron en el Molisol.

La evaluación de las tasas de respiración y la tasa de cambio en la agregación para el período anterior al momento de cada muestreo destructivo, permitió registrar una tendencia similar entre la actividad microbiana y la agregación del suelo (Figura 5.12). Una mayor actividad microbiana instantánea resultó en una mayor tasa de cambio en el  $DMP_{hl}$ , presentando un efecto de muy corto plazo. Si bien al final del experimento la respiración acumulada fue similar entre los suelos, las tasas de agregación variaron a lo largo del período de incubación asociados a la mayor o menor actividad microbiana. Estos resultados no proporcionan evidencias suficientes para rechazar la hipótesis 7 que

establece que *“independientemente del tipo de suelo, los cambios en la tasa de respiración microbiana instantánea al momento de la adición de residuos están asociados en mayor medida con la estabilidad de agregados que con la respiración microbiana total”*.

## **Capítulo 6**

### **Conclusiones Generales**

En el presente capítulo final se realiza una síntesis integradora de las principales conclusiones de esta tesis, discutiéndose globalmente los resultados más relevantes de la misma, y comprobando en qué medida estos resultados permitieron reunir o no evidencias suficientes para rechazar las hipótesis que fueron planteadas para cumplir con los objetivos. Por último, se describe la utilidad de la información generada y las posibles líneas de investigación que surgieron en el marco de esta tesis.

### *6.1. Síntesis global de los resultados obtenidos*

El vertiginoso avance del cultivo de soja en muchas áreas de Sudamérica ocurrido en los últimos tiempos, principalmente como único cultivo anual, genera una serie de interrogantes sobre su potencial impacto en la calidad del suelo, debido a la variada gama de tipos de suelos presentes en las diferentes regiones actualmente cultivadas y su diferente aptitud para la agricultura.

La importancia del COS y la agregación como propiedades que permiten mantener la calidad de suelo, así como también su estrecho vínculo en muchos tipos de suelos ha sido ampliamente documentado (Tisdall y Oades, 1982; Oades, 1993; Six et al., 2004; Denef et al., 2004). Gran parte de la información existente, evalúa principalmente el impacto de diferentes prácticas agrícolas como los tipos de labranzas, la fertilización, o las rotaciones de cultivos, sobre la agregación y el COS del suelo (Mikha y Rice, 2004; Wright y Hons, 2004, 2005; Fabrizzi et al., 2009; López-Fando y Pardo, 2011).

Se han destacado las disminuciones en el contenido de COS y en la agregación cuando situaciones inalteradas ingresaron a la agricultura (Cambardella y Elliot, 1993; Wilson, 2008), y el beneficio de la inclusión de pasturas en las rotaciones de cultivos como una propuesta tecnológica que permite mantener o mejorar los niveles de COS y la agregación del suelo (Studdert et al., 1997).

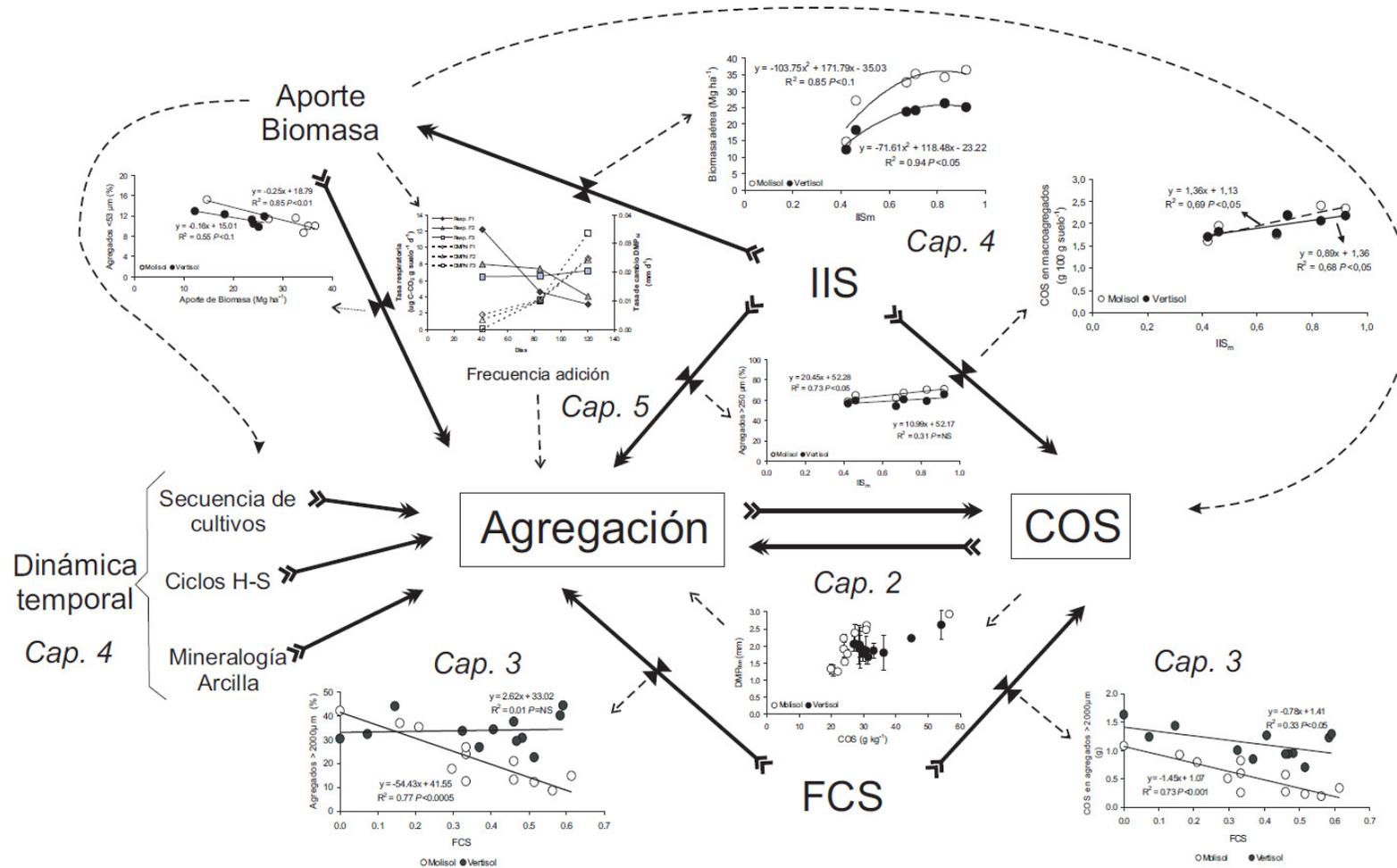
La idea de mantener el suelo con cobertura vegetal viva durante el mayor período de tiempo posible, en donde la actividad biológica del suelo mantenga elevadas tasas y los aportes de residuos sean más frecuentes en los sistemas agrícolas, fue lo que motivó esta tesis (Figura 1.3). Se ha reportado que la reducción de los períodos de barbecho presenta beneficios sobre la agregación del suelo y el almacenaje de COS (Alvaro-Fuentes et al., 2008; Wood et al., 1990, 1991; Peterson et al., 1998; Sherrod et al., 2003, Gan et al., 2012), aunque el comportamiento de algunos suelos presuponía un impacto diferencial de la intensificación de las secuencias de cultivos en suelos contrastantes en su mineralogía.

Algunos autores reportaron que los mecanismos involucrados en la consolidación de la estructura no eran los mismos en suelos con diferente textura o mineralogía de las arcillas (Denef et al., 2004; Denef y Six, 2005; Le Bissonnais, 1996; Fabrizzi et al., 2009; Novelli et al., 2011), sugiriendo que otros mecanismos controlaban la dinámica de la agregación del suelo y del COS (Figura 1.1). Sin embargo, al presente, se carecía de información sobre el impacto del cambio en el uso de la tierra sobre la agregación del suelo y el almacenaje de COS en suelos con diferentes agentes de agregación. En consecuencia, el objetivo general de esta tesis fue evaluar en Molisoles y Vertisoles los mecanismos involucrados en la consolidación de la estructura y en el almacenaje de COS ante cambios en el nivel de intensificación de las secuencias de cultivos.

Para poder encarar el estudio se propuso la evaluación a través de diferentes escalas (i.e. lotes de productores, ensayos de campo, laboratorio). Ésta aproximación, permitió lograr una profundización en el conocimiento de los mecanismos involucrados en la consolidación estructural y en el almacenaje de COS en agregados de suelos Molisoles y Vertisoles ante cambios en el uso de la tierra, logrando avanzar de lo general a lo particular, y de un menor a mayor control de las variables analizadas, generando, de esta manera, una visión más holística de la temática en estudio.

Con el objeto de unificar los diferentes niveles de investigación que integran esta tesis se presenta la Figura 6.1, la cual permite sintetizar los principales aportes de la misma que se centraron en el vínculo entre la agregación y el COS en dos suelos contrastantes en sus principales agentes de agregación. Además, se resaltan los índices de uso de la tierra de mayor impacto sobre el COS y la agregación.

En esta tesis se demostró un comportamiento diferencial de los suelos evaluados en cuanto a su dinámica de la agregación y el almacenaje de COS (Figura 6.1). El Molisol demostró una mayor dependencia para la formación de agregados de agentes orgánicos de la agregación, siendo afectado de manera importante por el uso de la tierra (Capítulos 2 y 3). En este sentido, la FCS impactó fuertemente la macroagregación en este suelo (Figura 3.5), incrementando las fracciones de tamaños menores (Tabla 3.2). Por otro lado, el tiempo de ocupación con cultivos o pasturas se asoció estrechamente con mejoras en la agregación en este suelo (Tabla 2.6; Tabla 3 Anexo).



**Figura 6.1.** Diagrama conceptual sintetizando las principales relaciones detectadas a lo largo de la tesis y mostrando las diferentes causas que afectan la agregación y el almacenaje de COS en suelos con agentes de agregación contrastantes. Las relaciones entre las variables son descritas en cada paso por medio de gráficos que resumen los principales hallazgos de la tesis. COS: carbono orgánico del suelo. IIS: índice de intensificación de las secuencias. FCS: frecuencia del cultivo de soja. Ciclos H-S: ciclos de humedecimiento-secado.

Un hallazgo novedoso de esta tesis surgió al relacionar la concentración de COS con la estabilidad de los agregados en el Molisol, donde se detectó una relación estrecha de ambas variables hasta los  $30 \text{ g C kg}^{-1}$ , mientras que valores superiores no afectaron la agregación (Figura 2.2; Figura A.1). Asimismo, la mayor dependencia de agentes orgánicos de agregación del Molisol se comprobó en el ensayo de incubaciones (Capítulo 5), en donde se asoció más estrechamente con el contenido de C-CEAC, en comparación con el Vertisol. Además, fue más sensible al impacto de las secuencias de cultivos en el ensayo de campo (Capítulo 4), principalmente en 0-5 cm de profundidad, y en el que fue detectado un mayor impacto de la erosividad de las precipitaciones en las secuencias con mayores períodos de barbecho (Figura 4.9). Estos resultados no proporcionan evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 1**, que propone que *“la relación entre los índices de uso de la tierra y las variables de estabilidad de agregados es más estrecha en el Molisol en comparación con el Vertisol debido a la mayor dependencia de agentes orgánicos de agregación”*.

En el Vertisol, la agregación fue una variable poco sensible para detectar cambios en el uso de la tierra (Capítulos 2 y 3, Figura 6.1), con escaso impacto de las secuencias de cultivos sobre la agregación (Capítulo 4). Se ha reportado que la pérdida de estabilidad de los agregados en un Vertisol es muy rápida cuando un sitio inalterado ingresa en uso agrícola (Cerana et al., 2006), pero luego los agentes inorgánicos de agregación, principalmente las arcillas esmectitas, estarían involucrados en mayor medida en la estabilización de los agregados. En efecto, en esta tesis se detectó una elevada estabilidad de los agregados por la metodología de Le Bissonnais (1996) en las situaciones inalteradas y con pasturas cultivadas, sitios que presentaron valores de COS superiores a  $35 \text{ g C kg}^{-1}$ , lo que sugiere que el COS aparece como un importante agente de agregación en el Vertisol con valores superiores al mencionado, pero comienza a ser irrelevante a valores inferiores de COS, en donde el tipo de arcilla parece controlar la dinámica de la agregación. Estos umbrales de COS resultan novedosos, siendo una contribución significativa para considerar como umbral de acción para tomar medidas tendientes a minimizar o revertir los impactos negativos del uso de la tierra en este suelo.

Un hallazgo inesperado en el Vertisol, dado el escaso efecto en la agregación, fue la disminución en el COS almacenado en los macroagregados con el incremento en la frecuencia de soja (Figuras 3.5, 6.1). A pesar de ello, la reducción en el COS almacenado en los macroagregados fue más marcada en el Molisol dada la importante disminución en la macroagregación, tal como se propuso en la hipótesis 3 de esta tesis (Figuras 3.5, 6.1). Estos resultados no proporcionan evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 3** de esta tesis que propone que *“el aumento en la frecuencia de soja reduce la estabilidad de los agregados y en consecuencia el almacenaje de COS en macroagregados en mayor proporción en el suelo Molisol que en el Vertisol”*.

La intensificación de las secuencias de cultivos ( $IIS_m$ ), por medio de la inclusión de cultivos dobles invernales (para grano y cobertura) se asoció con incrementos en los aportes de residuos de cosecha (Figura 4.5), mejoras en la agregación del suelo (Figura 4.8) y en el COS y COP almacenados en los macroagregados al final del experimento de campo (Figuras 4.14, 6.1), lo que sugiere que mantener el suelo con cobertura vegetal viva es una opción viable para mejorar la agregación del suelo en comparación con secuencias con barbechos frecuentes (Gan et al., 2012). Estos resultados no proporcionan evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 4** de esta tesis, que propone que *“en el corto plazo, el incremento en el índice de intensificación por la*

*incorporación de cultivos dobles invernales (para grano o cobertura) aumenta la proporción de agregados >250  $\mu\text{m}$  y el COP en esa fracción de agregados en comparación con el cultivo individual de soja”.*

Si bien no fue posible aislar el impacto de cada cultivo interviniente en la secuencia, hubo indicios para suponer un efecto importante del tiempo de ocupación con cobertura viva sobre la agregación y el almacenaje de COS en las secuencias que mantuvieron el suelo ocupado por un mayor período, sobre todo en el Molisol. Se lograron importantes aportes de residuos con la inclusión de trigo ya sea para cosecha o cobertura en los dos años del ensayo de campo (Capítulo 4), sin diferenciarse de las secuencias que incluyeron al maíz (Figura 4.1). Este resultado no proporciona evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 5** de esta tesis que propone que *“los cambios en la proporción de agregados y el COS asociado a ellos en el Molisol son más afectados por el índice de intensificación que por la composición de la secuencia de cultivos”*.

Tal como se demostró a lo largo de esta tesis, la evaluación de la estabilidad de los agregados por diferentes metodologías resultó ser dependiente del tipo de suelo evaluado (Tabla 2.8). La evaluación de diferentes metodologías de análisis de la estabilidad de los agregados fue útil para detectar los principales agentes involucrados en la consolidación de la estructura en cada suelo. El pretratamiento de disgregación mecánica surgió como un método apropiado para evaluar el impacto del uso de la tierra y su relación con el COS en el Molisol, lo que se demuestra por la estrecha asociación detectada con el COS (Figura A.1 c y d, Capítulo 2). Por otro lado, a pesar del menor impacto del uso de la tierra sobre la agregación en el Vertisol, las escasas diferencias registradas (Capítulo 2) se detectaron con el pretratamiento de humedecimiento lento. Este resultado no proporciona evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 2** que propone que *“el pretratamiento de humedecimiento lento por el método de estabilidad de agregados de Le Bissonnais es más adecuado que el de humedecimiento repentino o de disgregación mecánica para evaluar el uso de la tierra en el Vertisol debido a que evalúa la microfisuración por hinchamiento diferencial de las arcillas”*.

Otro aporte novedoso de la tesis, el cual no ha sido previamente documentado, es el impacto de la frecuencia de adición de residuos vegetales sobre el suelo (Capítulo 5), la que permitió mantener la actividad de los microorganismos elevada en el tiempo detectada por la respiración microbiana (Figura 5.12; Tabla A.5) y se asoció con mejoras en la estabilidad de los agregados de ambos suelos por el pretratamiento de humedecimiento lento (Figura 5.12). Estos resultados no proporcionan evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 6** de esta tesis que indicaba que *“independientemente del tipo de suelo, a igual cantidad de residuos de cosecha adicionados al suelo, la mayor frecuencia de adición determina un incremento en la estabilidad de los agregados”*.

En el experimento de incubaciones se detectaron mejoras en las tasas de agregación asociadas a mayores tasas de respiración (Figura 5.12). Fue importante notar que el efecto de la respiración instantánea al momento de la adición de residuos tuvo un impacto importante sobre la agregación (Figura 5.10 a y b), aunque la capacidad de detección de los cambios en la estabilidad de los agregados se vio limitada a la utilización del pretratamiento de estabilidad que generó un menor estrés sobre las muestras ( $\text{DMP}_{\text{hl}}$ ). A pesar de que la adición de residuos incrementó las tasas de respiración microbiana y la estabilidad de los agregados, el efecto fue transitorio, disminuyendo el cambio en la agregación al reducirse la tasa respiratoria (Figura 5.12).

Cabe aclarar que el tamaño del efecto de los tratamientos fue muy pequeño y más notorio en el Molisol en comparación con el Vertisol. Este resultado no proporciona evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 7** que establece que *“independientemente del tipo de suelo, los cambios en la tasa de respiración microbiana instantánea al momento de la adición de residuos esta asociada en mayor medida con la estabilidad de los agregados que con la respiración microbiana total”*.

### 6.2. Utilidad de la información generada

La información generada en esta tesis contribuyó en la búsqueda de secuencias de cultivos adecuadas para cada tipo de suelo y en la selección de indicadores de calidad de suelo adecuados para el monitoreo y tendencias de algunas propiedades ante cambios en el uso de la tierra. El conocimiento de los mecanismos involucrados en la consolidación de la estructura y en el almacenaje de COS es una temática de importante relevancia, y lo es aún más el conocimiento del comportamiento diferencial entre suelos que contrastan en sus principales agentes de agregación.

En esta tesis se destaca la importancia de mantener el suelo con cobertura viva por períodos más prolongados en comparación con los actuales sistemas agrícolas, lo cual tiene un importante impacto en la agregación del suelo y en el almacenaje de COS, principalmente en el Molisol, en el que se confirmó una mayor dependencia de agentes orgánicos de agregación. Por otra parte, se resalta el elevado contenido de COS y agregación que presenta el Vertisol en condiciones inalteradas, lo que contrasta claramente con las condiciones agrícolas en donde se registraron menores valores de COS, aunque sólo se detectaron diferencias entre la situación inalterada y las agrícolas (Capítulo 2 y 3). Sin embargo, este suelo en los sitios bajo agricultura alcanzó una mayor resistencia a los cambios de uso de la tierra sobre la agregación en comparación con el Molisol, principalmente debido a la preponderancia de agentes inorgánicos de agregación, lo que indicaría que la evaluación de la estabilidad de los agregados en este tipo de suelo no sería un indicador adecuado para monitorear los cambios en el uso de la tierra.

Por otra parte, la información generada en los ensayos de campo y en lotes de productores puede incluirse en modelos que analicen la dinámica del COS en diferentes suelos y secuencias de cultivos. De igual manera, la información generada en los ensayos de incubaciones, puede ser de gran utilidad para generar modelos que analicen los cambios de corto plazo en la agregación ante adiciones frecuentes de residuos vegetales.

### 6.3. Posibles líneas de investigación

De esta tesis surgieron diversos temas para profundizar:

*\* Impacto y cuantificación de los sistemas radicales en sistemas con diferente nivel de intensificación, para detectar su influencia en distintos tipos de suelos*

En esta tesis se destacó la necesidad de mantener el suelo con cobertura viva por un mayor período. Sin embargo, sólo se pudieron cuantificar los aportes de residuos aéreos, sin conocer ni cuantificar realmente la influencia de las raíces. Esta es una temática interesante para desarrollar en diferentes tipos de suelo.

*\* Evaluar en cada suelo el efecto de saturación de COS*

La mayoría de los modelos de COS sugieren incrementos lineales en el contenido de COS con los aportes de residuos. Sin embargo, en los últimos años esto se ha puesto en duda dado que en algunas situaciones mayores aportes de residuos no generan incrementos en el COS sugiriendo la existencia de una saturación del suelo.

Por otra parte, los aportes de residuos aéreos reportados en las situaciones inalteradas de Molisoles y Vertisoles son muy escasos (Paruelo et al., 2010; Lezana et al., 2011) en comparación con los aportados en secuencias agrícolas intensificadas, generando interrogantes sobre las causas que afectan la capacidad máxima de captura de COS de un suelo. Dado que la intensificación de las secuencias de cultivos permite incrementar la cantidad y frecuencia en la cual se adicionan los residuos vegetales al suelo, la evaluación de la capacidad de saturación de un suelo sería importante para conocer el potencial de captura de COS de los suelos agrícolas.

## Bibliografía

---

- Abiven, S., Menasseri, S., Angers, D.A., Leterme, P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *Eur. J. Soil Sci.* 58:239-247.
- Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – a literature analysis. *Soil Biol. Biochem.* 41:1-12.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 56. Roma, Italia.
- Álvaro-Fuentes, J., Arrúe, J.L., Gracia, R., López, M.V. 2007. Soil Management effects on aggregate dynamics in semiarid Aragon (NE Spain). *Sci. Total Environ.* 378:179-182.
- Álvaro-Fuentes, J., Arrúe, J.L., Gracia, R., López, M.V. 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma* 145:390-396.
- Álvaro-Fuentes, J., Cantero-Martínez, C., López, M.V., Paustian, K., Deneff, K., Stewart, C.E., Arrúe, J.L. 2009. Soil aggregation and soil organic carbon stabilization: effects of management in semiarid mediterranean agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1519-1529.
- Amezketta, E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *J. Sustain. Agr.* 14: 83-151.
- Angers, D.A. 1992. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1244-1249.
- Angers, D.A. 1998. Water-stable aggregation of Québec silty clay soils: some factors controlling its dynamics. *Soil Till. Res.* 47:91-96.
- Angers, D.A., Carter, M.R. 1996. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils. pp. 193-211. *En* Carter, M.R., Stewart, B.A. (eds.). *Structure and organic matter storage in agricultural soils. Advances in Soil Science.* Lewis Publishers, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- Angers, D.A., Samson, N., Légère, A. 1993. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Can. J. Soil Sci.* 73:51-59.
- Aparicio, V., Costa, J.L. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 96:155-165.
- Arshad, M.A., Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *Am. J. Altern. Agric.* 7:25-32.
- Baigorri, H. 1997. Elección de cultivares. pp 107-122. *En* Giorda, L., Baigorri, H. (eds.) *El cultivo de la soja en Argentina.* INTA C.R. Córdoba, Argentina.
- Baldi, G., Paruelo, J.M. 2008. Land-use and land cover dynamics in South American temperate grassland. *Ecol. Soc.* 13(2):6.

- Baldock, J.A., Kay, B.D., Schnitzer, M. 1987. Influence of cropping treatments on the monosaccharide content of the hydrolysates of a soil and its aggregate fractions. *Can. J. Soil Sci.* 67:489-499.
- Balesdent, J., Chenu, C. y Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53:215-230.
- Beare, M.H., Cabrera, M.L., Hendrix, P.F., Coleman, D.C. 1994a. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional-and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:787-795.
- Beare, M.H., Hendrix, P.F. y Coleman, D.C. 1994b. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional-and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:777-786.
- Beare, M.H., Hu, S., Coleman, D.C., Hendrix, P.F. 1997. Influences of mycelial fungi on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. *Appl. Soil Ecol.* 5:211-219.
- Boserup, E. 1987. Agricultural growth and population change. *En* Eatwell, J., Milgate, M., Newman, P. (eds.). *The New Palgrave: A Dictionary of Economics.* Macmillan, London and Basingstoke.
- Bossuyt, H., Deneff, K., Six, J., Frey, S.D., Merckx, R., Paustian, K. 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Appl. Soil Ecol.* 16:195-208.
- Bowman, R.A., Vigil, M.F., Nielsen, D.C., Anderson, R.L. 1999. Soil organic matter changes in intensively cropped dryland systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:186-191.
- Bravo-Garza, M.R., Bryan, R.B. 2005. Soil properties along cultivation and fallow time sequences on vertisols in northeastern Mexico. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:473-481.
- Bravo-Garza, M.R., Bryan, R.B., Voroney, P. 2009. Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma* 151:150-156.
- Bravo-Garza, M.R., Voroney, P. y Bryan, R.B. 2010. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of <sup>14</sup>C-labeled maize residues and wetting and drying cycles in vertisols. *Soil Biol. Biochem.* 42:953-959.
- Bronick, C.J., Lal, R. 2005a. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124:3-22.
- Bronick, C.J., Lal, R. 2005b. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil Till. Res.* 81:239-252.
- Cambardella, C.A., Elliot, E.T. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777-783.
- Cambardella, C.A., Elliot, E.T. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1071-1076.
- Campitelli, P., Aoki, A., Gudelj, O., Rubenacker, A., Sereno, R. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas

- agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del Suelo* 28 (2):223-231.
- Caviglia, O.P. 2007. Intensificación de la secuencia de cultivos en Entre Ríos: balance de carbono y aprovechamiento de recursos. *En* Caviglia, O.P., Papparotti, O.F. Sasal, M.C. (eds.). *Agricultura Sustentable en Entre Ríos*. Ediciones INTA. Buenos Aires. 232 pp.
- Caviglia, O.P., Andrade, F.H. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the argentinean pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *Americas J. Plant Sci. Biotech.* 3:1-8.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double cropped wheat-soybean. *Field Crop. Res.* 87:117-129.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H. 2011. Yield and quality of wheat and soybean in sole- and double-cropping. *Agron. J.* 103:1081-1089.
- Cerana, J.A., Wilson, M. De Battista, J.J., Noir, J., Quintero, C. 2006. Estabilidad estructural de los Vertisoles de Entre Ríos en un sistema arrocero regado con agua subterránea. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*. 35:87-106.
- Chan, K.Y. 1997. Consequences of changes in particulate organic carbon in vertisols under pasture and cropping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1376-1382.
- Chan, K.Y., Heenan, D.P., Ashley, R. 1994. Seasonal changes in surface aggregate stability under different tillage and crops. *Soil Till. Res.* 28:301-314.
- Chenu, C. y Guérif, J. 1991. Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1076-1080.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1479-1486.
- Chisci, G., Bazzoffi, P., Mbagwu, J.S.C. 1989. Comparison of aggregate stability indices for soil classification and assessment of soil management practices. *Soil Technol.* 2:113-133.
- Chung, H., Ngo, K.J., Plante, A., Six, J. 2009. Evidence for carbon saturation in a highly structured and organic-matter-rich soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:130-138.
- Cosentino, D. 2006. Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme. Dr. Sci. Theses. Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Cosentino, D., Chenu, C., Le Bissonnais, L. 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.* 38:2053-2062.
- Dalal, R.C., Bridge, B.J. 1996. Aggregation and organic matter storage in sub-humid and semi-arid soils. pp. 263-307. *En* Carter, M.R., Stewart, B.A. (eds.). *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- De Gryze, S., Six, J., Brits, C., Merckx, R. 2005. A quantification of short-term macroaggregate dynamics : influences of wheat residue input and texture. *Soil Biol. Biochem.* 37:55-66.

- Degens, B., Sparling, G. 1996. Changes in aggregation do not correspond with changes in labile organic C fractions in soil amended with  $^{14}\text{C}$ -glucose. *Soil Biol. Biochem.* 28:453-462.
- Degens, B.P., Sparling, G.P., Abbott, L.K. 1996. Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates. *Appl. Soil Ecol.* 3:149-159.
- Denef, K., Six, J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *Eur. J. Soil Sci.* 56:469-479.
- Denef, K., Six, J. 2006. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate-associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy. *Eur. J. Soil Sci.* 57:774-786.
- Denef, K., Six, J., Merckx, R., Paustian, K. 2004. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1935-1944.
- Denef, K., Six, J., Paustian, K., Merckx, R. 2001. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles. *Soil Biol. Biochem.* 33:2145-2153.
- Denef, K., Six, J., Merckx, R., Paustian, K. 2002. Short-term effect of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant Soil* 246:185-200.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz-Zorita, M., Perfect, E., Grove, J.H. 2002. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil Till. Res.* 64:3-22.
- Doran, J.W., Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. pp. 3-21. *En* Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdieck, D.F., Stewart, B.A. (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA, Madison, WI.
- Dou, F., Wright, A.L., Hons, F.M. 2007. Depth distribution of soil organic C and N after long-term soybean cropping in Texas. *Soil Till. Res.* 94:530-536.
- Edwards, A.P., Bremner, J.M. 1967. Microaggregates in soils. *J. Soil Sci.* 18:64-73.
- Ellsworth, T.R., Clapp, C.E., Black, G.R. 1991. Temporal variations in soil structural properties under corn and soybean cropping. *Soil Sci.* 151:405-416.
- Fabrizzi, K.P., Morón, A., Garcia, F.O. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1831-1841.
- Fabrizzi, K.P., Rice, C.W., Amado, T.J.C., Fiorin, J., Barbagelata, P., Melchiori, R. 2009. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. *Biogeochemistry.* 92:129-143.
- FAO. 2009. Como alimentar al mundo en el 2050. Disponible en [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/synthesis\\_papers/Cómo\\_alimentar\\_al\\_mundo\\_en\\_2050.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/synthesis_papers/Cómo_alimentar_al_mundo_en_2050.pdf) (acceso 23 de agosto, 2012).

- FAOSTAT. 2011. FAOSTAT Agriculture Data. FAO, Rome, Italy. Available at <http://faostat.fao.org> (acceso 23 de agosto, 2011).
- Farahani, H.J., Peterson G.A. Westfall D.G. 1998. Dryland cropping intensification: a fundamental solution to efficient use of precipitation. *Adv. Agron.* 64:197-223.
- Fehr, W.R., Caviness, C.E. 1977. Stages of soybean development. Special Report 80. Iowa State University, Ames, Iowa. 11 p.
- Franzluebbers, A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66: 95-106.
- Franzluebbers, A.J. 2010. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the southeastern United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 347-357.
- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M. y Zuberer, D.A. 1998. In situ and potential CO<sub>2</sub> evolution from a Fluventic Ustochrept in southcentral Texas as affected by tillage and cropping intensity. *Soil Till. Res.* 47:303-308.
- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M., Zuberer, D.A. 1994. Long-term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1639-1645.
- Gabioud, E.A., Wilson, M.G., Sasal, M.C. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del Suelo* 29:129-139.
- Galantini, J.A. 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. *En* Marbán, L y Ratto, S (eds.). *Tecnologías en análisis de suelos: alcance a laboratorios agropecuarios*. 1ª ed. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires. pp 103-114.
- Galantini, J.A. 2008. Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. *En* Galantini, J. A. (ed.). *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina*. 1ª ed. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur. EdiUNS. 309 p.
- Gale, W.J., Cambardella, C.A., Bailey, T.B. 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:201-207.
- Gan, Y., Liang, C., Campbell, C.A., Zenter, R.P., Lemke, R.L., Wang, H., Yang, C. 2012. Carbon footprint of spring wheat in response to fallow frequency and soil carbon changes over 25 years on the semiarid Canadian prairie. *Eur. J. Agron.* 43: 175-184.
- Ghani A., Dexter, M y Perrott, K.W. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 35:1231-1243.
- Gregory, P.J., Ingram, J.S.I., Andersson, R., Betts, R.A., Brovkin, V., Chase, T.N., Grace, P.R., Gray, A.J., Hamilton, N., Hardy, T.B., Howden, S., Jenkins, A., Meybeck, M., Olsson, M., Ortiz-Monasterio, I., Palm, C.A., Payn, T.W., Rummukainen, M., Schulze, R.E., Thiem, M., Valentin, C., Wilkinson, M.J. 2002. Environmental consequences of alternative practices for intensifying crop production. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88:279-290.
- Hallett, P.D., Young, I.M. 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *Eur. J. Soil Sci.* 50:35-40.

- Hassink, J., Whitmore, A.P. 1997. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:131-139.
- Havlin, J.L., Kissel, D.E., Maddux, L.D., Claassen, M.M. y Long, J.H. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:448-452.
- Haynes, R.J. 1993. Effect of sample pretreatment on aggregate stability measured by wet sieving or turbidimetry on soils of different cropping history. *J. Soil Sci.* 44:261-270.
- Haynes, R.J. 1999. Labile organic matter fractions and aggregate stability under short-term, grass-based leys. *Soil Biol. Biochem.* 31:1821-1830.
- Herman, J.C. 1985. How a Soybean Plant Develops. Special Report N° 53. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Services, Ames, Iowa.
- Isemeyer, H. 1952. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. pp 215-127. *En* Alef, K., Nannipieri, P. (eds.). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press.
- Kay, B.D. 1998. Soil structure and organic carbon: a review. pp. 169-197. *En* Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (eds.). *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Lal, R. 2010. Enhancing eco-efficiency in agro-ecosystems through soil carbon sequestration. *Crop Sci.* 50:120-131.
- Larson, W., Pierce, F. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. pp. 37-51. *En* Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdieck, D.F., Stewart, B.A. (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA, Madison, WI.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assesement of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47:425-437.
- Le Bissonnais, Y., Arrouays, D. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.* 48:39-48.
- Lee, J., Hopmans, J.W., Rolston, D.E., Baer, S.G., Six, J. 2009. Determining soil carbon stock changes: simple bulk density corrections fail. *Agr. Ecosyst. Environ.* 134:251-256.
- Lezana, L., Pueyo, J.M., Fonseca, J., Burns, J., Massa, E. 2011. Producción primaria del pastizal natural en el centro-norte de Entre Ríos. *Disponible en:* <http://inta.gob.ar/documentos/produccion-primaria-del-pastizal-natural-en-el-centro-norte-de-entre-rios-1/>
- Liu, A., Ma, B.L., Bomke, A.A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:2041-2048.
- López-Fando, C., Pardo, M.T. 2011. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. *Soil Till. Res.* 111:224-230.
- Martens, D.A. 2000a. Management and crop residue influence soil aggregate stability. *J. Environ. Qual.* 29:723-727.

- Martens, D.A. 2000b. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.* 32:361-369.
- McGarry, D. 1996. The structure and grain size distribution of vertisols. p. 231-260. En: Ahmad, N., Mermud, A. (eds.) *Vertisols and technologies for their management*. Elsevier, Amsterdam.
- Mikha M.M., Rice, C.W. 2004. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:809-816.
- Monzon, J.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H. 2006. Fallow soil evaporation and water storage as affected by stubble in sub-humid (Argentina) and semi-arid (Australia) environments. *Field Crop. Res.* 98:83-90.
- Nicoleso, R.S., Lovato, T., Amado, T.J.C., Bayer, C. y Lanzasova, M.E. 2008. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo.* 32:2425-2433.
- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168:254-260.
- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Wilson, M.G., Sasal, M.C. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196, 260-267.
- Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56:377-400.
- Oades, J.M., Waters, A.G. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.* 29:815-828.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V., Ojima, D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1173-1179.
- Paruelo, J.M., Guerschman, J.P., Piñeiro, G., Jobbágy, E.G., Verón, S.R., Baldi, G. y Baeza, S. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia* 10:47-61.
- Paruelo, J.M., Piñeiro, G., Baldi, G., Baeza, S., Lezama, F., Altesor, A., Oesterheld, M. 2010. Carbon stocks and fluxes in rangelands of the Río de la Plata Basin. *Rangeland Ecol Manage* 63: 94-108.
- Paz Ferreiro, J., Wilson, M., Vidal Vazquez, E. 2009. Multifractal description of nitrogen adsorption isotherms. *Vadose Zone J.* 8:209-219.
- Perfect, E., Kay, B.D., van Loon, W.K.P., Sheard, R.W., Pojasok. 1990a. Factors influencing soil structural stability within a growing season. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:173-179.
- Perfect, E., Kay, B.D., van Loon, W.K.P., Sheard, R.W., Pojasok. 1990b. Rates of Change in soil structural stability under forages and corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:179-186.
- Peterson, G.A., Halvorson, A.D., Havlin, J.L., Jones, O.R., Lyn, D.J., Tanaka, D.L. 1998. Reduced tillage and increasing cropping intensity in the Great Plains conserves soil C. *Soil Till. Res.* 47:207-218.

- Pillai, U.P., McGarry, D. 1999. Structure repair of a compacted Vertisol with wet-dry cycles and crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:201-210.
- Plan Mapa de Suelos, 1998. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos, Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 17, 114 pp.
- Plante, A.F., Conant, R.T., Stewart, C.E., Paustian, K. y Six, J. 2006. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:287-296.
- Pojasok, T., Kay, B.D. 1990. Assessment of a combination of wet sieving and turbidimetry to characterize the structural stability of moist aggregates. *Can. J. Soil Sci.* 70:33-42.
- Porta Casanellas, J., López Acevedo, M., Roquero de Laburu, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. 2ª edición. Madrid. 849 p.
- Post, W.M., Kwon, K.C. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Glob. Change Biol.* 6:317-327.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, D.K., McCool, D.K., Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook N° 703, 404 pp.
- Richards, L.A. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Sci.* 66:105-110.
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Services, Ames, Iowa. Special Report 48. 21 p.
- Roberson, E.B., Sarig, S., Firestone, M.K. 1991. Cover crop management of polysaccharide-mediated aggregation in an orchard soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:734-739.
- Roberson, E.B., Sarig, S., Shennan, C., Firestone, M.K. 1995. Nutritional management of microbial polysaccharide production and aggregation in an agricultural soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1587-1594.
- Sainju, U.M., Caesar-Tonthat, T., Jabro, J.D. 2009. Carbon and nitrogen fractions in dryland soil aggregates affected by long-term tillage and cropping sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1488-1495.
- SAS Institute. 2003. SAS procedures for personal computers. v. 9.1. SAS Inst., Cary, NC.
- Sasal, M.C., Castiglioni, M.G., Wilson, M.G. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108:24-29.
- Satorre, E. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia Hoy* 97:24-31.
- Shaver, T.M., Peterson, G.A., Sherrod, L.A. 2003. Cropping intensification in dryland systems improves soil physical properties: regression relations. *Geoderma* 166:149-164.

- Sherrod, L.A., Peterson, G.A., Westfall, D.G., Ahuja, L.R. 2003. Cropping intensity enhances soil organic carbon and nitrogen in a no-till agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1533-1543.
- Six, J., Paustian, K., Elliot, E.T., Combrink, C. 2000a. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:681-689.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K. 2000b. Soil structure and soil organic matter: II. A Normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1042-1049.
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E.G., Paul, E.A., Paustian, K. 2002. Measuring and Understanding Carbon Storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1981-1987.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Deneff, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79:7-31.
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K. y Batten, K.M. 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:555-569.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy, eleventh ed. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 346 pp.
- Stephan, S., Berrier, J., De Petre, A.A., Jeanson, C., Kooistra, M.J., Scharpenseel, H.W., Shiffmann, H. 1983. Characterization of in situ organic matter constituents in Vertisols from Argentina, using submicroscopic and cytochemical methods—first report. *Geoderma* 30:21-34.
- Stevenson, F.J. 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur and micronutrients. John Willey & Sons, NY, USA.
- Studdert, G.A., Echeverria, H.E. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503.
- Studdert, G.A., Echeverría, H.E., Casanovas, E.M. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Viglizzo, E.F., Franck, F.C., Carreño, L.V., Jobbágy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincén, D., Ricard, M.F. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Glob. Change Biol.* 17:959-973.
- Viglizzo, E.F., Paruelo, J.M., Littera, P., Jobbágy, E.G. 2012. Ecosystems service evaluation to support land-use policy. *Agr. Ecosyst. Environ.* 154:78-84.
- Villamil, M.B., Bollero, G.A., Darmody, R.G., Simmons, F.W., Bullock, D.G. 2006. No-till corn soybean systems including winter cover crops: Effects on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1936-1944.
- Weil, R.R. 1992. Inside the heart of sustainable farming: An intimate look at soil life and how to keep it thriving. *New Farm* 12:45-48.

- Williams, B.G., Greenland, D.J., Lindstrom, G.R., Quirk, J.P. 1966. Techniques for the determination of the stability of soil aggregates. *Soil Sci.* 101:157-163.
- Wilson, M.G. 2008. *Uso de la Tierra en el área de bosques nativos de Entre Ríos, Argentina.* Tesis Doctoral. Instituto Universitario de Geología. Universidad de La Coruña, España.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. *Agric. Handbook N° 537.* USDA, Washington, D.C. 58 pp.
- Wood, C.W., Westfall, D.G., Peterson, G.A. y Burke, I.C. 1990. Impacts of cropping intensity on carbon and nitrogen mineralization under no-till dryland agroecosystems. *Agron. J.* 82:1115-1120.
- Wood, C.W., Westfall, D.G. y Peterson, G.A. 1991. Soil carbon and nitrogen changes on initiation of no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:470-476
- Wright, A.L., Hons, F.H. 2004. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:507-513.
- Wright, A.L., Hons, F.M. 2005. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:141-147.
- Wright, A.L., Inglett, P.W. 2009. Soil organic carbon and nitrogen and distribution of carbon-13 and nitrogen-15 in aggregates of everglades Histosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:427-433.
- Yang, X.-M., Wander, M.M. 1998. Temporal changes in dry aggregate size and stability: tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois. *Soil Till. Res.* 49:173-183.
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28:337-351.

## **Anexo**

**Tabla A.1.** Diámetros medios ponderados (DMPs) de los agregados de los diferentes pretratamientos de la metodología de Le Bissonnais (1996) para 0-5 y 5-15 cm, once sitios cultivados y una situación inalterada, bajo monte nativo, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Suelo	Sitio	0-5 cm			5-15 cm		
		DMP <sub>hr</sub>	DMP <sub>dm</sub>	DMP <sub>hl</sub>	DMP <sub>hr</sub>	DMP <sub>dm</sub>	DMP <sub>hl</sub>
		-----mm-----					
Molisol	1	1,23 ± 0,19 <sup>a</sup>	2,93 ± 0,08	1,87 ± 0,12	0,90 ± 0,00	2,95 ± 0,08	1,57 ± 0,01
	2	1,33 ± 0,22	2,61 ± 0,09	1,92 ± 0,27	1,11 ± 0,23	2,71 ± 0,09	1,79 ± 0,37
	3	0,79 ± 0,34	2,23 ± 0,12	1,19 ± 0,38	0,46 ± 0,08	1,98 ± 0,16	0,72 ± 0,05
	4	0,45 ± 0,07	2,05 ± 0,38	0,77 ± 0,16	0,45 ± 0,01	2,58 ± 0,13	0,71 ± 0,06
	5	0,62 ± 0,06	1,92 ± 0,25	0,99 ± 0,07	0,41 ± 0,05	2,34 ± 0,06	0,64 ± 0,03
	6	0,50 ± 0,11	1,78 ± 0,12	0,84 ± 0,18	0,43 ± 0,10	2,01 ± 0,19	0,60 ± 0,10
	7	0,88 ± 0,30	2,49 ± 0,12	1,56 ± 0,49	0,55 ± 0,30	2,71 ± 0,12	1,03 ± 0,49
	8	0,47 ± 0,12	1,29 ± 0,15	0,70 ± 0,15	0,38 ± 0,02	1,84 ± 0,09	0,50 ± 0,03
	9	0,69 ± 0,22	2,39 ± 0,23	1,08 ± 0,24	0,49 ± 0,04	2,71 ± 0,05	0,71 ± 0,10
	10	0,46 ± 0,11	1,33 ± 0,15	0,75 ± 0,25	0,40 ± 0,08	1,64 ± 0,30	0,54 ± 0,12
	11	0,44 ± 0,05	1,54 ± 0,11	0,73 ± 0,13	0,49 ± 0,05	2,22 ± 0,27	0,69 ± 0,10
	12	0,41 ± 0,03	1,25 ± 0,03	0,74 ± 0,07	0,35 ± 0,01	1,90 ± 0,19	0,52 ± 0,03
		<i>Media</i>	0,69	1,98	1,10	0,53	2,30
	<i>EE<sup>b</sup></i>	0,06	0,09	0,08	0,04	0,07	0,07
Vertisol	13	1,81 ± 0,65	2,62 ± 0,42	2,19 ± 0,78	1,59 ± 0,57	2,36 ± 0,57	1,93 ± 0,63
	14	1,15 ± 0,53	1,80 ± 0,52	1,36 ± 0,63	0,84 ± 0,34	1,42 ± 0,42	1,09 ± 0,36
	15	1,18 ± 0,14	1,67 ± 0,21	1,51 ± 0,20	0,60 ± 0,11	1,15 ± 0,37	0,74 ± 0,24
	16	1,20 ± 0,19	2,00 ± 0,32	1,53 ± 0,17	0,85 ± 0,13	1,72 ± 0,42	0,90 ± 0,11
	17	1,03 ± 0,08	1,78 ± 0,22	1,39 ± 0,22	0,80 ± 0,26	1,73 ± 0,70	0,91 ± 0,33
	18	1,43 ± 0,22	2,24 ± 0,02	1,78 ± 0,12	1,25 ± 0,47	1,97 ± 0,61	1,06 ± 0,15
	19	1,19 ± 0,21	2,06 ± 0,23	1,39 ± 0,26	0,85 ± 0,19	1,60 ± 0,31	0,81 ± 0,10
	20	1,19 ± 0,49	2,03 ± 0,56	1,37 ± 0,41	0,75 ± 0,24	1,38 ± 0,49	0,93 ± 0,20
	21	1,17 ± 0,05	1,86 ± 0,21	1,21 ± 0,20	0,79 ± 0,17	1,60 ± 0,50	0,91 ± 0,20
	22	1,16 ± 0,29	1,87 ± 0,41	1,32 ± 0,34	0,80 ± 0,18	1,65 ± 0,50	0,88 ± 0,15
	23	1,20 ± 0,48	1,96 ± 0,59	1,41 ± 0,52	0,75 ± 0,19	1,38 ± 0,26	0,84 ± 0,16
	24	1,14 ± 0,04	1,94 ± 0,01	1,61 ± 0,24	0,58 ± 0,11	1,43 ± 0,28	0,70 ± 0,07
		<i>Media</i>	1,24	1,99	1,50	0,87	1,62
	<i>EE</i>	0,06	0,06	0,07	0,06	0,08	0,06

<sup>a</sup> Desvío estándar de la media para cada sitio (n=3). <sup>b</sup> EE= error estándar de la media para cada suelo y profundidad (n=36). DMP<sub>hr</sub>, DMP<sub>dm</sub> y DMP<sub>hl</sub> son los diámetros medios ponderados de los pretratamientos de humedecimiento repentino, disgregación mecánica y humedecimiento lento, respectivamente.

**Tabla A.2.** Diámetros medios ponderados (DMPs) de los agregados de los diferentes pretratamientos de la metodología de Le Bissonnais (1996) para 0-5 y 5-15 cm, once sitios cultivados y una situación inalterada, bajo monte nativo, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

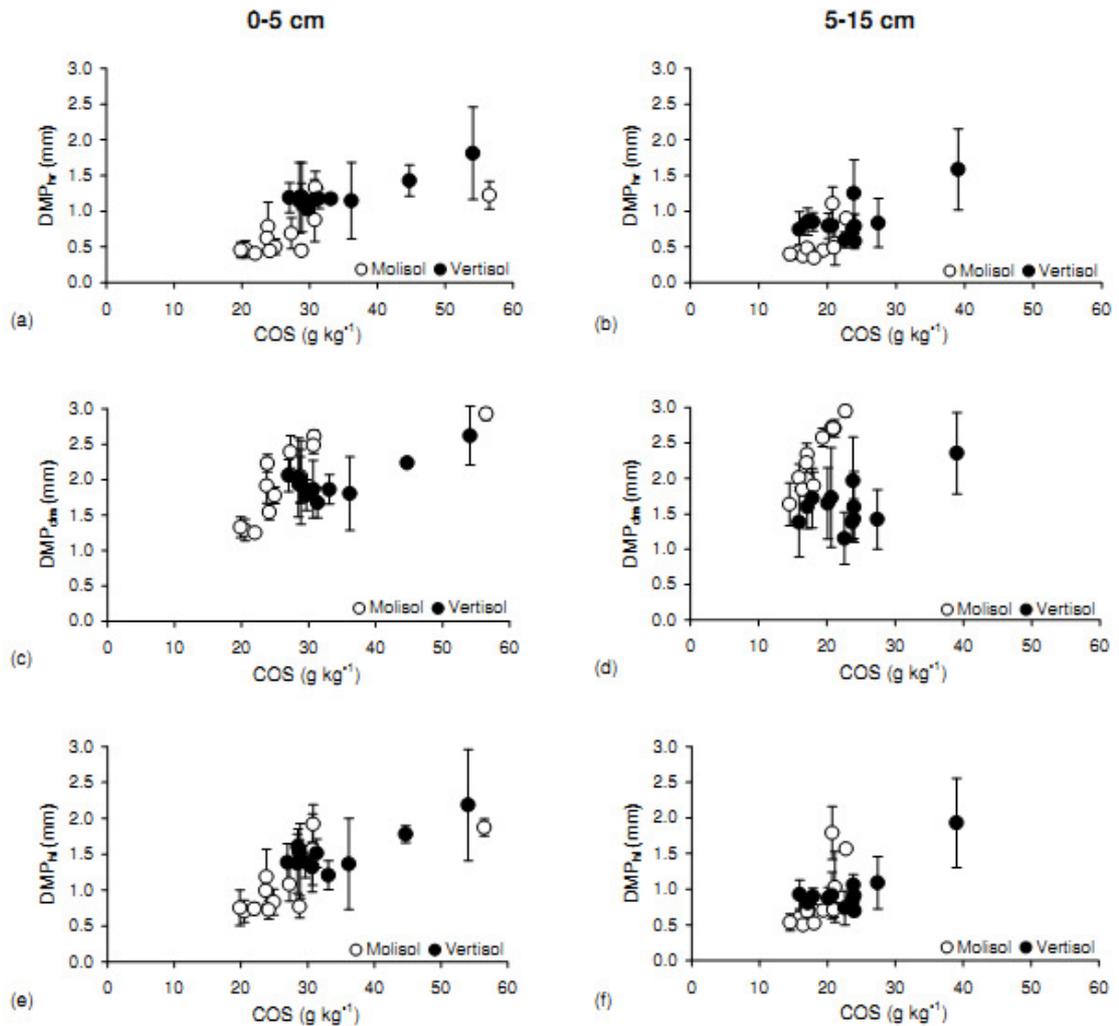
Suelo	Sitio	Agregados >2000 µm					
		0-5 cm			5-15 cm		
		hr	dm	hl	hr	dm	hl
		-----%-----					
Molisol	1	21,22 ± 5,34	79,29 ± 4,13	39,57 ± 3,95	11,84 ± 0,51	79,71 ± 2,79	28,83 ± 0,61
	2	26,21 ± 7,73	67,23 ± 3,51	41,92 ± 10,07	16,58 ± 6,90	70,97 ± 3,93	35,98 ± 13,12
	3	10,71 ± 8,26	53,10 ± 4,52	19,84 ± 11,26	2,31 ± 1,26	42,64 ± 5,94	5,78 ± 0,12
	4	3,14 ± 1,88	47,49 ± 12,65	8,45 ± 4,96	1,37 ± 0,26	64,54 ± 5,58	4,25 ± 1,35
	5	6,61 ± 1,01	41,65 ± 7,88	13,96 ± 1,04	1,13 ± 0,59	55,83 ± 2,24	2,96 ± 0,25
	6	4,04 ± 2,78	35,85 ± 5,20	10,03 ± 5,86	1,79 ± 2,07	41,57 ± 7,23	3,11 ± 2,08
	7	12,30 ± 7,33	62,53 ± 4,84	29,67 ± 15,50	2,09 ± 7,33	70,45 ± 4,84	9,72 ± 3,69
	8	3,88 ± 2,74	21,43 ± 5,38	7,01 ± 3,89	0,95 ± 0,27	37,47 ± 1,73	1,53 ± 0,52
	9	7,40 ± 5,21	58,80 ± 8,36	14,72 ± 6,43	2,47 ± 0,82	70,11 ± 2,04	5,28 ± 2,37
	10	3,34 ± 2,22	21,70 ± 2,85	8,34 ± 5,03	1,34 ± 1,07	29,45 ± 9,49	1,99 ± 1,51
	11	2,49 ± 0,85	29,72 ± 2,75	5,79 ± 2,26	2,22 ± 0,39	50,96 ± 10,06	4,88 ± 1,49
	12	3,32 ± 0,67	21,92 ± 1,75	9,36 ± 1,39	0,75 ± 0,31	40,46 ± 7,74	2,00 ± 0,63
	<i>Media</i>	8,72	45,06	17,39	3,74	54,51	8,86
	<i>EE<sup>b</sup></i>	1,41	3,27	2,30	0,87	2,77	1,92
Vertisol	13	37,68 ± 21,90	66,67 ± 15,78	50,79 ± 28,06	29,77 ± 17,24	55,49 ± 21,82	40,62 ± 20,81
	14	16,36 ± 14,85	34,90 ± 18,52	21,89 ± 18,08	5,55 ± 6,06	18,23 ± 15,01	11,07 ± 8,19
	15	15,96 ± 3,69	30,12 ± 7,25	26,26 ± 5,63	2,19 ± 1,32	12,05 ± 10,44	4,34 ± 4,44
	16	18,69 ± 6,10	43,09 ± 11,18	27,75 ± 5,26	6,48 ± 3,24	30,60 ± 15,29	6,54 ± 3,05
	17	12,66 ± 1,97	34,24 ± 8,71	22,24 ± 7,05	5,73 ± 5,55	30,69 ± 25,60	8,13 ± 7,57
	18	26,09 ± 4,35	51,17 ± 1,00	35,42 ± 2,51	21,17 ± 16,22	40,09 ± 23,73	13,17 ± 4,63
	19	18,51 ± 7,26	44,64 ± 9,21	23,09 ± 9,72	8,34 ± 5,99	24,59 ± 11,38	6,85 ± 3,63
	20	19,49 ± 13,30	44,72 ± 20,31	23,15 ± 12,19	7,24 ± 4,45	20,91 ± 17,28	10,77 ± 4,11
	21	14,77 ± 0,82	35,31 ± 8,85	15,26 ± 6,52	3,57 ± 3,47	24,46 ± 19,46	5,15 ± 3,98
	22	17,05 ± 7,21	37,91 ± 14,82	20,56 ± 9,70	5,32 ± 2,34	26,36 ± 16,78	6,71 ± 2,15
	23	15,59 ± 11,18	39,39 ± 22,00	21,59 ± 13,86	2,64 ± 1,89	16,06 ± 7,97	3,70 ± 1,80
	24	12,58 ± 1,43	37,00 ± 0,94	27,25 ± 8,67	1,59 ± 0,94	16,75 ± 8,13	3,54 ± 1,09
	<i>Media</i>	18,79	41,60	26,27	8,30	26,36	10,05
	<i>EE</i>	1,77	2,42	2,27	1,74	3,05	1,93

<sup>a</sup> Desvío estándar de la media para cada sitio (n=3). <sup>b</sup> EE= error estándar de la media para cada suelo y profundidad (n=36). hr, dm y hl son los pretratamientos de humedecimiento repentino, disgregación mecánica y humedecimiento lento, respectivamente.

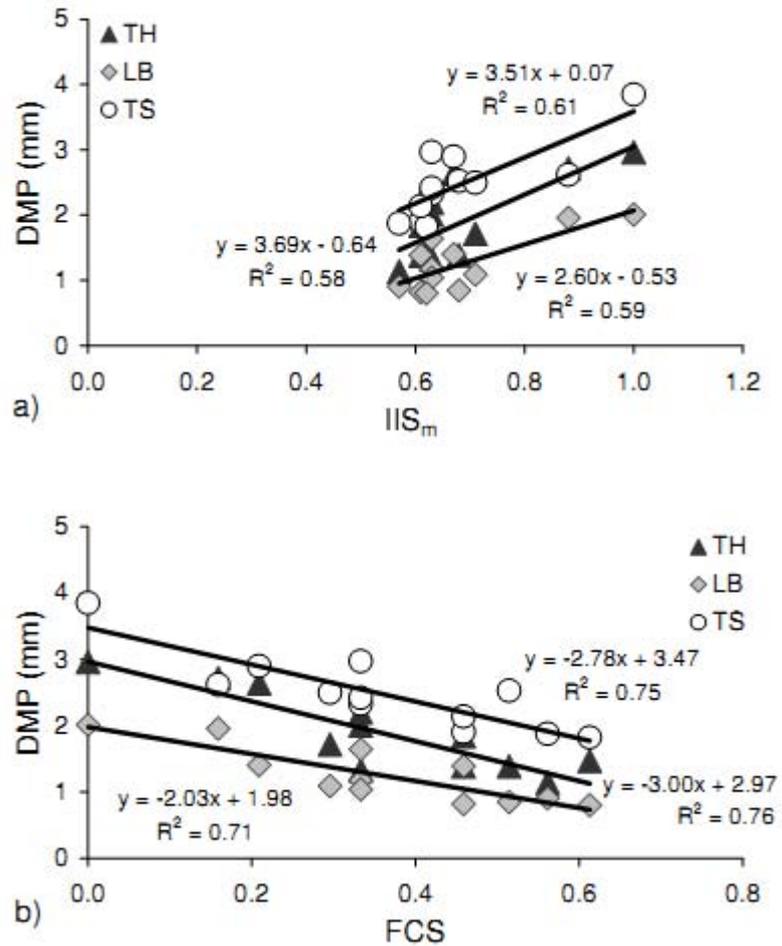
**Tabla A.3.** Coeficientes de correlación (r) de la relación entre los índices de uso de la tierra, el stock de COS en masa equivalente ( $C_{equiv}$ ) y los agregados >2000  $\mu\text{m}$  de diferentes pretratamientos de estabilidad de agregados por la metodología de Le Bissonnais (1996) en 0-5 y 5-15 cm de profundidad, para once sitios agrícolas y un sitio inalterado, bajo monte nativo, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Suelo	Profundidad	Agr >2000 $\mu\text{m}$	Índices de uso de la tierra										$C_{equiv}$
			IIS	IIS <sub>m</sub>	ICS	ICT	ICC	ICP	FCS	FCT	FCC	FCP	
Molisol	0-5 cm	hr	0,82 **	0,83 ***	-0,76 **	-0,43 NS	-0,54 NS	0,83 ***	-0,79 **	-0,61 *	-0,61 *	0,85 ***	0,67 *
		dm	0,67 *	0,70 *	-0,84 ***	-0,43 NS	-0,27 NS	0,68 *	-0,83 ***	-0,54 NS	-0,32 NS	0,69 *	0,78 **
		hl	0,79 **	0,81 **	-0,77 **	-0,44 NS	-0,51 NS	0,81 **	-0,80 **	-0,60 *	-0,57 NS	0,82 **	0,72 **
	5-15 cm	hr	0,84 ***	0,86 ***	-0,66 *	-0,44 NS	-0,66 *	0,87 ***	-0,69 *	-0,64 *	-0,74 **	0,90 ***	0,48 NS
		dm	0,49 NS	0,57 NS	-0,64 *	-0,43 NS	-0,29 NS	0,60 *	-0,61 *	-0,52 NS	-0,32 NS	0,61 *	0,89 ***
		hl	0,85 ***	0,88 ***	-0,71 *	-0,48 NS	-0,65 *	0,89 ***	-0,74 **	-0,67 *	-0,72 **	0,92 ***	0,57 NS
Vertisol	0-5 cm	hr	0,38 NS	0,45 NS	-0,57 NS	-0,47 NS	-0,40 NS	0,50 NS	-0,54 NS	-0,47 NS	-0,39 NS	0,49 NS	0,88 ***
		dm	0,14 NS	0,21 NS	-0,37 NS	-0,32 NS	-0,20 NS	0,27 NS	-0,31 NS	-0,28 NS	-0,18 NS	0,26 NS	0,69 *
		hl	0,41 NS	0,50 NS	-0,58 *	-0,48 NS	-0,46 NS	0,53 NS	-0,55 NS	-0,50 NS	-0,47 NS	0,52 NS	0,81 **
	5-15 cm	hr	0,34 NS	0,39 NS	-0,51 NS	-0,30 NS	-0,26 NS	0,41 NS	-0,49 NS	-0,32 NS	-0,27 NS	0,39 NS	0,69 *
		dm	0,17 NS	0,23 NS	-0,42 NS	-0,13 NS	-0,09 NS	0,23 NS	-0,39 NS	-0,13 NS	-0,10 NS	0,21 NS	0,65 *
		hl	0,54 NS	0,59 *	-0,68 *	-0,50 NS	-0,53 NS	0,63 *	-0,65 *	-0,54 NS	-0,55 NS	0,62 **	0,81 **

NS, \*, \*\*, \*\*\* indica no significativo,  $P<0,05$ ,  $P<0,01$ ,  $P<0,001$ , respectivamente. hr= pretratamiento de humedecimiento repentino; dm= pretratamiento de disgregación mecánica; hl= pretratamiento de humedecimiento lento. IIS= índice de intensificación de la secuencia (cultivos por año); IIS<sub>m</sub>= índice de intensificación de la secuencia (meses con cultivos en relación a los meses de la secuencia); ICS= índice del cultivo de soja; ICT= índice del cultivo de trigo; ICC= índice de cultivos cereales; ICP= índice de pasturas; FCS= frecuencia del cultivo de soja; FCT= frecuencia del cultivo de trigo; FCC= frecuencia de cultivos cereales; FCP= frecuencia de pasturas. Los índices fueron calculados utilizando la fracción de tiempo anual con cobertura vegetal viva en un periodo de 6 años previos al periodo del muestreo de suelos (2002-2008).



**Figura A.1.** Diámetro medio ponderado de los agregados (DMPs) afectados por la concentración de COS a 0-5 y 5-15 cm de profundidad. Círculos vacíos representan el Molisol. Círculos llenos representan el Vertisol. a y b) Humedecimiento repentino (DMP<sub>hr</sub>) (Molisol 0-5 cm:  $R^2=0,51$ ,  $P<0,01$ ; Vertisol 0-5cm:  $R^2=0,82$ ,  $P<0,001$ ; Molisol 5-15cm:  $R^2=0,44$ ,  $P<0,05$ ; Vertisol 5-15 cm:  $R^2=0,47$ ,  $P<0,05$ ). c y d) Disgregación mecánica (DMP<sub>dm</sub>) (Molisol 0-5 cm:  $R^2=0,59$ ,  $P<0,01$ ; Vertisol 0-5 cm:  $R^2=0,58$ ,  $P<0,01$ ; Molisol 5-15 cm:  $R^2=0,87$ ,  $P<0,001$ ; Vertisol 5-15 cm:  $R^2=0,32$ ,  $P=NS$ ). e y f) Humedecimiento lento (DMP<sub>hl</sub>) (Molisol 0-5 cm:  $R^2=0,54$ ,  $P<0,01$ ; Vertisol 0-5 cm:  $R^2=0,67$ ,  $P<0,01$ ; Molisol 5-15 cm:  $R^2=0,55$ ,  $P<0,01$ ; Vertisol 5-15 cm:  $R^2=0,68$ ,  $P<0,01$ ). Las barras verticales junto a los círculos representan el desvío estándar de cada media (n=3).



**Figura A.2.** Diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados de suelo por tamizado en húmedo, tamizado en seco y por el método de Le Bissonnais, afectados por: a) el índice de intensificación de la secuencia (IIS<sub>m</sub>) y b) la frecuencia del cultivo de soja (FCS) a 0-5 cm de profundidad en un Molisol de Entre Ríos, Argentina.

**Tabla A.4.** Coeficientes de variación (CV-%), promedio de los diferentes momentos de muestreo de suelos, del diámetro medio ponderado por la metodología de tamizado en húmedo ( $DMP_{TH}$ ), de la concentración de carbono orgánico del suelo (COS) total, y del COS y carbono orgánico particulado (COP) almacenado en macroagregados de un experimento de secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Suelo	Profundidad	Secuencia de cultivos	CV- $DMP_{TH}$	CV-COS	CV-COS en macroagregados	CV-COP en macroagregados
Molisol	0-5 cm	S-S	25,73 A	11,70 A	20,07 A	90,92 AB
		S-M	19,96 A	11,09 A	16,27 A	80,06 AB
		CC <sub>T</sub> /S-CC <sub>T</sub> /S	16,03 A	11,68 A	17,71 A	75,50 B
		CC <sub>T</sub> /S-M	21,38 A	9,96 A	18,03 A	92,46 A
		T/S-T/S	23,88 A	12,82 A	27,84 A	79,67 AB
		T/S-M	23,60 A	13,14 A	23,20 A	84,60 AB
	5-15 cm	S-S	18,53 A	8,67 A	16,95 A	46,43 A
		S-M	15,35 A	10,33 A	14,60 A	50,28 A
		CC <sub>T</sub> /S-CC <sub>T</sub> /S	19,58 AB	16,66 A	17,77 A	62,85 A
		CC <sub>T</sub> /S-M	15,29 A	14,44 A	16,66 A	44,54 A
		T/S-T/S	32,87 B	9,33 A	24,37 A	56,14 A
		T/S-M	32,20 B	7,11 A	21,60 A	54,78 A
Vertisol	0-5 cm	S-S	44,91 AB	19,44 A	16,73 A	67,17 A
		S-M	40,91 AB	16,98 A	15,11 A	68,36 A
		CC <sub>T</sub> /S-CC <sub>T</sub> /S	61,03 B	10,80 A	21,45 A	72,14 A
		CC <sub>T</sub> /S-M	61,97 B	10,63 A	21,69 A	60,89 A
		T/S-T/S	34,77 A	11,57 A	17,13 A	73,68 A
		T/S-M	38,89 AB	12,42 A	19,64 A	73,91 A
	5-15 cm	S-S	15,60 AB	9,25 A	16,18 A	38,24 A
		S-M	12,64 A	20,81 A	11,23 A	38,03 A
		CC <sub>T</sub> /S-CC <sub>T</sub> /S	49,29 B	8,81 A	22,80 A	42,22 A
		CC <sub>T</sub> /S-M	49,73 B	8,25 A	25,14 A	39,07 A
		T/S-T/S	26,05 AB	6,59 A	21,13 A	38,20 A
		T/S-M	27,24 AB	7,26 A	21,54 A	35,45 A

Letras diferentes para un mismo tipo de suelo y profundidad, indican diferencias estadísticas significativas en los CV promedio de los diferentes muestreos de suelo de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha$ : 0,05).

**Tabla A.5.** Tasa respiratoria media de los distintos tratamientos evaluados para un período de 13-15 días posteriores a cada adición de residuos en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

Cultivo	Frecuencia	Período (días)	Tasa respiratoria media ( $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g suelo}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )	
			Molisol	Vertisol
Maíz	F1	0-14	21,9 Aa	17,0 Ba
		41-56	6,1 Ab	5,4 Ab
		62-76	3,3 Ac	4,1 Ab
		84-97	3,1 Ac	4,2 Ab
	F2	0-14	12,9 Aa	11,2 Ba
		41-56	5,3 Ab	4,7 Ab
		62-76	11,4 Aa	10,9 Aa
		84-97	4,6 Ab	5,0 Ab
	F3	0-14	10,2 Aa	8,9 Ba
		41-56	9,9 Aa	9,6 Aa
		62-76	3,8 Ab	3,8 Ab
		84-97	10,1 Aa	10,1 Aa
Soja	F1	0-14	24,6 Aa	22,9 Aa
		41-56	4,9 Ab	5,4 Ab
		62-76	3,0 Ac	2,3 Bc
		84-97	2,8 Ac	2,9 Abc
	F2	0-14	14,1 Aa	13,1 Ba
		41-56	4,3 Ab	4,0 Ab
		62-76	12,8 Aa	11,8 Ba
		84-97	4,4 Ab	4,8 Ab
	F3	0-14	10,8 Aa	9,8 Aa
		41-56	10,3 Aa	9,4 Aa
		62-76	3,0 Ab	3,2 Ab
		84-97	9,8 Aa	10,2 Aa
Testigo	-	0-14	4,8 Aa	4,8 Aa
		41-56	3,3 Aab	3,0 Ab
		62-76	2,2 Ab	2,1 Ab
		84-97	2,3 Ab	2,7 Ab

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a test de Tukey ( $\alpha: 0,05$ ). Mayúsculas entre suelos para un mismo cultivo, frecuencia de adición y período analizado. Minúsculas entre períodos analizados para un mismo tipo de suelo, cultivo y frecuencias de adición.