

**UNIVERSITAT DE LLEIDA**

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA**



**TESIS DOCTORAL**

**ROTACIONES DE CULTIVOS EN EL SUDESTE DE LA  
PROVINCIA DE BUENOS AIRES (ARGENTINA): UNA  
HERRAMIENTA PARA EL MANEJO DE LA DINÁMICA  
DEL NITRÓGENO Y DEL CARBONO EN EL SUELO**

**Guillermo Alberto Studdert**

**Lleida, febrero de 2006**

UNIVERSITAT DE LLEIDA  
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA

**ROTACIONES DE CULTIVOS EN EL SUDESTE DE LA PROVINCIA DE  
BUENOS AIRES (ARGENTINA): UNA HERRAMIENTA PARA EL MANEJO  
DE LA DINÁMICA DEL NITRÓGENO Y DEL CARBONO EN EL SUELO**

Memoria de tesis presentada por Guillermo Alberto Studdert para optar al grado de Dr. Ingeniero Agrónomo por la Universitat de Lleida.

Dirigida por el Dr. Jaume Lloveras Villamanyà profesor del "Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal" de la E.T.S. d'Enginyeria Agrària de Lleida.

El Director de Tesis

Jaume Lloveras Vilamanyà

Lleida, febrero de 2006

***A Norma, Santiago y Rodrigo***

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor desea expresar su especial agradecimiento a:

- Dr. Jaume Lloveras Vilamanyà, quien aceptó ser mi Director a pesar de las distancias y de los tiempos, por su apoyo y aliento para concluir este trabajo.
- Dr. Fernando Andrade por haberme alentado a iniciar este nuevo paso en mi carrera académica y haberme allanado el camino para hacerlo como lo hice.
- Ing. Agr. Hernán Echeverría por su permanente compañía, apoyo y amistad.
- Dr. Carlos Cantero Martínez por su aliento y amistad.
- Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària de la Universitat de Lleida por haberme permitido concluir esta etapa de mi carrera en sus claustros.
- Agencia Española de Cooperación Internacional por haber financiado mi estadía en Lleida para cumplimentar parte de los requisitos académicos para esta etapa.
- Unidad Integrada Balcarce (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata -Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) por haberme permitido el trabajo en su ámbito y haberme dado las facilidades para la concreción de este trabajo y la culminación de esta etapa.
- Todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron para que este trabajo pudiera ser llevado a cabo y terminado.

## ÍNDICE

Contenido	Pag.
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	iv
RESUMEN	vii
SUMMARY	x
<b>1. INTRODUCCIÓN GENERAL</b>	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	2
1.1. Rotación de cultivos: definición y generalidades	4
1.2. Efectos de largo plazo de la rotación de cultivos	7
1.2.1. Contenido de materia orgánica	8
1.2.1.1. <i>Rotaciones de cultivos anuales</i>	9
1.2.1.2. <i>Rotaciones de cultivos anuales con pasturas</i>	12
1.2.2. Disponibilidad de nitrógeno	13
1.2.3. Propiedades físicas del suelo	14
1.3. Efectos de corto plazo de la rotación de cultivos	17
1.3.1. Plagas, enfermedades y malas hierbas	18
1.3.2. Alelopatía	20
1.3.3. Dinámica del nitrógeno	22
1.3.3.1. <i>Mineralización-inmovilización</i>	23
1.3.3.2. <i>Rotación con leguminosas</i>	25
1.4.- Características del sudeste de la Provincia de Buenos Aires .....	30
<b>2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS GENERALES</b>	34
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS GENERALES	35
2.1. Hipótesis	35
2.2. Objetivos	36
<b>3. CAPÍTULO I</b>	37
3. CAPÍTULO I: CROP-PASTURE ROTATION FOR SUSTAINING THE QUALITY AND PRODUCTIVITY OF A TYPIC ARGIUOLL	38
3.1. Abstract	38
3.2. Introduction	39
3.3. Materials and methods	41
3.4. Results and discussion	45
3.4.1. Soil organic carbon	47
3.4.2. Light-Fraction Carbon and Nitrogen in the Microbial Biomass	50
3.4.3. Aggregate stability index	51
3.5. Summary and conclusions	53
3.6. Acknowledgements	55
3.7. References	56
<b>4. CAPÍTULO II</b>	61
4. CAPÍTULO II: CROP ROTATIONS AND NITROGEN FERTILIZATION TO MANAGE SOIL ORGANIC CARBON DYNAMICS	62
4.1. Abstract	62
4.2. Introduction	63

4.3. Materials and methods	65
4.4. Results and discussion	69
4.5. Acknowledgements	79
4.6. References	80
<b>5. CAPÍTULO III</b>	<b>83</b>
5. CAPÍTULO III: ESTIMACIÓN DEL NITRÓGENO MINERALIZADO PARA UN CULTIVO DE TRIGO EN DISTINTAS SECUENCIAS DE CULTIVOS	84
5.1. Abstract	84
5.2. Introducción	85
5.3. Materiales y métodos	88
5.3.1. Ensayo de campo	88
5.3.2. Ensayo de laboratorio	90
5.3.3. Estimación del nitrógeno mineralizado	91
5.3.4. Relación entre la estimación de la mineralización y el ensayo de campo	92
5.4. Resultados y discusión	93
5.4.1. Ensayo de campo	93
5.4.2. Ensayo de laboratorio y estimación de mineralización	96
5.4.3. Relación entre la estimación de la mineralización y el ensayo de campo	99
5.5. Conclusiones	102
5.6. Agradecimientos	102
5.7. Bibliografía	103
<b>6. CAPÍTULO IV</b>	<b>107</b>
6. CAPÍTULO IV: RELACIÓN ENTRE EL CULTIVO ANTECESOR Y LA DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO PARA EL TRIGO EN LA ROTACIÓN	108
6.1. Resumen	108
6.2. Abstract	109
6.3. Introducción	110
6.4. Métodos	113
6.4.1. Experimento 1: Rotación cultivos-pastura	113
6.4.2. Experimento 2: Rotación de cultivos agrícolas	114
6.4.3. Manejo general de los experimentos	115
6.4.4. Análisis de los datos	116
6.5. Resultados y discusión	117
6.6. Agradecimientos	127
6.7. Bibliografía	127
<b>7. DISCUSIÓN GENERAL</b>	<b>131</b>
7. DISCUSIÓN GENERAL	132
<b>8. CONCLUSIONES GENERALES</b>	<b>148</b>
8. CONCLUSIONES GENERALES	149
<b>9. BIBLIOGRAFÍA GENERAL</b>	<b>150</b>
9. BIBLIOGRAFÍA GENERAL	151
<b>ANEXO I</b>	<b>165</b>
ANEXO I: CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS UTILIZADOS	166

I.1. Relación suelo-paisaje en le Partido de Balcarce (Adaptado de CGCC (2004) y F. Cabria, com. Personal, 2005)	166
I.2. Descripción de los suelos utilizados en los ensayos	169
I.2.1. Argiudol Típico	169
<i>I.2.1.1 Descripción del perfil típico de la Serie Mar del Plata (INTA, 1979; actualizada según SSS, 1999) (Figura I.3)</i>	170
<i>I.2.1.2 Datos analíticos del perfil típico de la Serie Mar del Plata (INTA, 1979; descripción actualizada según SSS, 1999) .....</i>	172
I.2.2. Paleudol Petrocálcico	173
<i>I.2.2.1 Descripción del perfil típico de la Serie Balcarce (INTA, 1979; actualizada según SSS, 1999) (Figura I.4)</i>	174
<i>I.2.2.2 Datos analíticos del perfil típico de la Serie Balcarce (INTA, 1979; descripción actualizada según SSS, 1999)</i>	175
I.3. Bibliografía	176
<b>ANEXO II</b>	177
ANEXO II: CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DEL PARTIDO DE BALCARCE .....	178
II.1. Precipitaciones	178
II.2. Evapotranspiración de referencia (ET <sub>0</sub> )	179
II.3. Temperatura	181
II.4. Heladas	183
II.5. Bibliografía	184

## RESUMEN

Un sistema de producción sostenible debe tender a mantener o mejorar la condición de su suelo. La rotación de cultivos influye sobre los procesos del suelo que determinan su condición y su productividad, siendo las dinámicas del carbono (C) y del nitrógeno (N) de gran importancia para su definición. Para suelos del sudeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina) no sujetos a erosión hídrica, se hipotetizó que: *i)* la rotación de cultivos es una herramienta idónea para mantener la sostenibilidad agrícola aún con el empleo de laboreo convencional (LC); *ii)* la inclusión de períodos bajo pastura en una rotación permite recomponer las propiedades del suelo afectadas por la agricultura convencional; *iii)* en rotaciones cultivos-pastura, es posible definir un período mínimo bajo pastura y uno máximo bajo agricultura convencional para mantener las propiedades del suelo dentro de límites de variación compatibles con la sostenibilidad del sistema; *iv)* en los períodos bajo agricultura convencional, la variación del contenido de materia orgánica (MO) del suelo puede ser manejada mediante la elección de los cultivos a incluir en la rotación y la fertilización nitrogenada; *v)* la prolongación de los ciclos agrícolas producen una depresión en los rendimientos del cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) asociada a los cambios en el contenido de MO y la capacidad del suelo de proveer N al cultivo; *vi)* la variación de la disponibilidad de N para el trigo asociada a la agricultura convencional, puede ser manejada a través de la elección del cultivo que lo precede en la rotación. Sobre un complejo de Argiudol Típico y Paleudol Petrocálcico no sujeto a erosión hídrica en Balcarce (Argentina) (37° 45' S, 58° 18' W), se llevaron a cabo dos ensayos de larga duración entre 1976 y 1993 uno y entre 1984 y 1996 el otro, en los que se implementaron distintas rotaciones y secuencias de cultivo bajo LC. Se evaluó la variación del contenido de MO y de otras propiedades del suelo y la incidencia de la combinación de los cultivos en el tiempo



sobre la variación de los rendimientos de trigo. El contenido de MO de la capa arable del suelo disminuyó 12% luego de 6 a 7 años de agricultura y recuperó su nivel original luego de 3 a 4 años de pastura. El C en la fracción liviana, el N en la biomasa microbiana y el índice de estabilidad de agregados cayeron abruptamente durante el período agrícola (97-100% de la variación total estimada) y se recuperaron durante el período bajo pastura. Por otro lado, en sistemas agrícolas puros se demostró que a lo largo de 11 años de agricultura, la disminución de la MO de la capa arable (11 a 23% sin N y 7 a 19% con N) varió con el aporte de residuos al suelo determinado por la combinación de cultivos y la fertilización nitrogenada. Las pérdidas de MO incrementaron cuando la soja (*Glycine max* (L.) Merr.) estaba presente en la secuencia y disminuyeron cuando el maíz (*Zea mays* L.) estaba presente, debido a sus diferentes volúmenes de residuos. Asimismo, la mayor frecuencia de laboreos en épocas de mayor temperatura afectó la relación entre el aporte de residuos y la variación en la MO del suelo. Si bien la secuencia de cultivos determinó el nivel de MO del suelo y con ello de su capacidad de mineralizar N (N potencialmente mineralizable,  $N_o$ ), se demostró que la dinámica de la disponibilidad de N para el trigo fue definida por el cultivo antecesor a través del efecto de las características de sus residuos. Independientemente del  $N_o$ , los residuos de baja relación C/N (C:N) (p.e. de soja) se asociaron a mayor liberación de N para el trigo, mientras que rastrojos de alta C:N (p.e. de maíz) provocaron una intensa inmovilización que impidió que el N estuviera disponible para el trigo cuando lo requería. Estas relaciones fueron lo suficientemente fuertes como para enmascarar el efecto a largo plazo de las secuencias sobre la MO del suelo y de su  $N_o$ . Los rendimientos relativos de trigo cayeron a lo largo del período agrícola al igual que el contenido de MO de la capa arable, pero la magnitud de la disminución estuvo regulada por la influencia de los residuos sobre la dinámica de

corto plazo del N más que por la capacidad del suelo de proveerlo. No hubo evidencias suficientes para rechazar las hipótesis planteadas, aunque debe aclararse que el efecto de la agricultura convencional sobre algunas propiedades de la capa superficial del suelo puede tener consecuencias serias para aquéllos susceptibles a mecanismos de degradación como la erosión hídrica y con ello sobre la sostenibilidad del sistema.

## SUMMARY

A sustainable production system must maintain or improve its soil condition. Crop rotations affect the soil processes that determine its condition and productivity. Soil carbon (C) and nitrogen (N) dynamics are key factors for their definition. For soils of the southeastern Buenos Aires Province (Argentina) not exposed to water erosion, it has been hypothesized that: *i)* crop rotation is an adequate tool to maintain system sustainability even under conventional tillage (LC); *ii)* the inclusion of periods under pasture in the rotation allows the reversion of conventional cropping effect on surface soil properties; *iii)* in cropping-pasture rotations it is possible to define a minimum period under pasture and a maximum period under conventional cropping to keep soil properties between limits of variation compatible with system sustainability; *iv)* under conventional cropping, organic matter content (MO) variation can be managed through the election of the crops to be included in the rotation and through N fertilization; *v)* the extension of cropping periods depress wheat (*Triticum aestivum* L.) yields due to changes in soil MO and its capability of supplying N to the crop; *vi)* N availability variation associated to conventional cropping may be managed through the election of the preceding crop. Two long term crop rotation experiments under LC were carried on at Balcarce (Argentina) (37° 45' S, 58° 18' W) between 1976 and 1993 and 1984 and 1996, respectively, on a complex of Typic Argiudoll and Petrocalcic Paleudoll not exposed to water erosion. Variation of MO and other soil surface properties and the incidence of crop combination on wheat yields were evaluated. Arable layer MO decreased 12% along 6 to 7 years under conventional cropping but returned to original level after 3 to 4 years under pasture. Carbon in the light fraction, microbial biomass N and aggregate stability index fell abruptly along the cropping period (97-100% of total estimated variation) and recovered their original values along the period under pasture.

On the other hand, it was demonstrated that under continuous cropping, MO content in the arable layer fell along 11 years of conventional cropping, and that the magnitude of such decrease (11 to 23% without N and 7 to 19% with N) depended on the amount of crop residues returned to the soil, which in turn depended on crop sequence, and on N fertilization. Due to their different volume of residues, MO content fall was greater when soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) was present in the sequence and lower when corn (*Zea mays* L.) was present. Likewise, the higher frequency of tillage operations when temperatures were higher, affected the relationship between residue return and soil MO. Even though crop rotation determined MO content and with it, soil capability to supply N (potentially mineralizable N,  $N_o$ ), N availability to wheat was defined by the preceding crop through the effect of its residue characteristics on soil N dynamics. Independently of  $N_o$ , residues with low C/N ratio (C:N) (e.g. soybean) generated a greater N supply to wheat, whereas high C:N residues (e.g. corn) provoked intense immobilization that restricted the availability to the crop when it required the N. Such relationships were strong enough to mask the long term effect of crop sequences on soil MO and  $N_o$ . Wheat relative yields fell along the cropping period such as arable layer MO, but the magnitude of the decrease was regulated by the short term influence of crop residues on soil N instead of by soil capability to provide N. There were not enough evidences to reject the hypotheses formulated, even though it is necessary to point out that the effect of conventional cropping on some soil surface properties may produce serious consequences to soils subject to water erosion and with that, on system sustainability.

# **1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La agricultura es el proceso de producción primaria cuyo objetivo principal es satisfacer de manera efectiva y persistente las demandas de alimentos y fibras de la humanidad. La agricultura es una de las bases fundamentales de la civilización actual (Pesek, 1994), dado que ha sido la encargada de proveer el sustento para un siempre creciente número de habitantes (Stewart *et al.*, 1991) ya que una gran población de seres humanos no hubieran podido subsistir sobre la faz de la Tierra, de no haberse desarrollado aquélla (Pesek, 1994).

La manipulación de los ecosistemas naturales con el fin de desarrollar la agricultura, dio origen a los agroecosistemas (Altieri, 1987; Elliot y Cole, 1989). Como cualquier sistema natural, los agroecosistemas están sujetos a un proceso de evolución, aunque, en este caso, no sólo influyen sobre él los factores naturales, sino que intervienen también las acciones del hombre para lograr sus objetivos de producción (Altieri, 1987; Lal, 1993). Se producen así alteraciones que pueden ser positivas o negativas para la integridad del sistema, resultando su estado final del balance entre ellas (Lal, 1993). Un agroecosistema se mantiene en buena condición y en armonía con su ambiente cuando la sumatoria de los efectos de las acciones positivas supera o al menos iguala a la de los efectos negativos (Stewart *et al.*, 1991) y se preserva su capacidad de reorganización ante fluctuaciones ambientales (Viglizzo, 1989; Addiscott, 1995).

Los agroecosistemas se diferencian de los ecosistemas que les dieron origen, en que son estructural y funcionalmente más simples (Altieri, 1987; Tivy, 1990). Sin embargo, en la mayor parte de los países productores, la agricultura ha evolucionado, o lo está haciendo (Meadows *et al.*, 1993), hacia agroecosistemas sobresimplificados, con muy bajo retorno de materiales que contribuyan al mantenimiento de su capacidad

de reorganización interna y una elevada exportación de productos secundarios que pueden ser perniciosos para el ambiente, debido a que, para mantener su estabilidad y nivel de producción, requieren grandes cantidades de insumos externos (energía fósil y agroquímicos) (Viglizzo, 1989; Addiscott, 1995). Son conocidos y han sido ampliamente documentados (Altieri, 1987; Norse *et al.*, 1992; Lal y Pierce, 1991; Lal y Stewart, 1992) algunos fenómenos tales como la erosión, la pérdida de productividad de los suelos y de diversidad biológica, la desertificación, y la contaminación de aguas y aire con agroquímicos, entre otros, que se asocian directamente con la agricultura actual.

Ante esta situación, se está haciendo un replanteo de los sistemas de producción, a través de la revalorización de otras formas de agricultura que la hacen más segura sin perjudicar el logro de sus objetivos (Harwood, 1990). En términos generales, podría hablarse de *agricultura alternativa*, concepto que comprende a todos aquellos sistemas que: *i*) se basan en procesos naturales (p.e. ciclo de nutrientes, relaciones predador-plaga-hospedante), *ii*) reducen el uso de insumos que pueden ser potencialmente peligrosos para el ambiente y la salud humana y animal, *iii*) aprovechan más eficientemente el potencial genético y biológico de plantas y animales, *iv*) utilizan las tierras de acuerdo a su potencial y limitaciones, y *v*) tienen como objetivo que la producción sea lucrativa, eficiente y sostenida (National Research Council, 1989). Todo aquel sistema de producción que satisfaga las necesidades humanas en cuanto a alimentos, fibras y calidad de vida a través del uso eficiente y seguro de los recursos naturales y de los insumos, es un sistema de *agricultura sostenible* (Ikerd, 1990; Reganold *et al.*, 1990; Harwood, 1990), que es una de las formas de *agricultura alternativa*.

El concepto de *agricultura sostenible* no excluye el aprovechamiento de las ventajas de las técnicas y medios desarrollados por la ciencia para mejorar la

producción de los cultivos, sino que propone su uso racional a la luz del objetivo de conservación ambiental y del logro de rentabilidad (Stenholm y Waggener, 1990). Para ello es necesaria una cuidadosa elección de las prácticas a emplear para hacer el mejor aprovechamiento posible de los procesos biológicos y de su interacción con los componentes y condiciones del sistema de producción. Esto supone un profundo conocimiento de su funcionamiento y de los factores que intervienen (Francis y Clegg, 1990). Prácticas que conduzcan al manejo del ciclo de los nutrientes y de plagas y enfermedades, y que permitan el manejo de los agroquímicos que sean necesarios, son citadas como pertinentes para el logro de una *agricultura sostenible* (National Research Council, 1989). Los sistemas de laboreo y de cultivos, y la relación entre ellos son elementos clave en este aspecto (Zadocks y Schein, 1979; Pierce y Rice, 1988; Francis y Clegg, 1990; Bullock, 1992; Cook, 1993; Karlen y Sharpley, 1994; Addiscott, 1995).

### **1.1. Rotación de cultivos: definición y generalidades**

La *rotación de cultivos* es un sistema de cultivo del que existen diversas definiciones e interpretaciones. En términos generales podría decirse que una *rotación de cultivos* es la siembra sucesiva de diferentes cultivos sobre la misma porción de terreno (National Research Council, 1989; Bullock, 1992). Sin embargo, algunos autores (Pierce y Rice, 1988; Urbano Terrón, 1989) prefieren hacer una diferenciación entre *secuencia de cultivos* y *rotación de cultivos*. Definen a la primera como la serie o sucesión de cultivos ordenados en el tiempo que se siembra sobre una superficie, mientras que la segunda se refiere a las situaciones en que la *secuencia de cultivos* es repetida.

Las definiciones de otros sistemas de cultivo suelen confundirse o superponerse con la de *rotación de cultivos*, a la luz de los efectos que producen. Algunos tipos de



cultivo múltiple, tales como el cultivo secuencial (siembra de dos o más cultivos por año sobre el mismo terreno) o algunas de las formas de cultivo intercalar (cultivo intercalar desfasado: siembra de un segundo cultivo antes de que finalice el ciclo del primero) (Francis, 1986), son algunos de los casos. Estas definiciones comprenden el doble o triple cultivo, el intercalado de cultivos de verano en cultivos de invierno o viceversa, o la utilización de cultivos de cobertura, abonos verdes o cultivos trampa. Asimismo, algunos autores (Pierce y Rice, 1988; Urbano Terrón, 1989; Campbell y Zentner, 1993; Peterson *et al.*, 1993) consideran a la alternancia entre cultivos (uno o más) y períodos de barbecho, como una *rotación de cultivos*.

Actualmente el concepto de *rotación de cultivos*, o simplemente rotación, es utilizado como contraposición al de monocultivo (producción de un solo cultivo año tras año sobre una porción de terreno) (Power y Follet, 1987; National Research Council, 1989; Bullock, 1992). Power y Follett (1987) y Liebman (1987) han puntualizado las desventajas del monocultivo: *i)* elevado requerimiento de insumos externos, *ii)* dependencia de un solo mercado, *iii)* inestabilidad del sistema de producción, *iv)* mayor riesgo de degradación ambiental, *v)* disminución de diversidad biológica y genética, *vi)* concentración estacional y espacial en el uso de los recursos. Aquellos autores también puntualizan algunas ventajas, tales como la simplicidad en el manejo, tanto físico como económico, y la posibilidad de permitir al productor la especialización en el cultivo que siembra y la obtención de subvenciones y ayudas establecidas por las distintas administraciones.

Las ventajas de la rotación se contraponen *vis a vis* con las desventajas del monocultivo (Power y Follett, 1987; Liebman, 1987), y sus beneficios para la producción de cultivos son conocidas desde antaño (Leighty, 1938; Bullock, 1992; Pesek, 1994). No obstante, a pesar de los inconvenientes asociados al monocultivo, el

abaratamiento de los agroquímicos, la facilidad de manejo y, en algunos casos, las políticas gubernamentales, han favorecido la generalización de esa práctica en muchos lugares donde es posible combinar cultivos, produciendo los efectos negativos mencionados (Kurtz *et al.*, 1984; Power y Follett, 1987; Pesek, 1994). Sin embargo, las condiciones agroecológicas o las socio-económicas de muchas zonas de producción, limitan las posibilidades de alternancia de cultivos y hacen que el monocultivo sea casi la única alternativa posible.

Todos los beneficios de la rotación sobre la producción son, por lo general, referidos como el *efecto rotación*. Este término comprende la acción de la combinación de cultivos sobre la disponibilidad de nutrientes y agua; la dinámica de plagas, malas hierbas y enfermedades; la presencia de sustancias inhibitorias o promotoras del crecimiento; y sobre la condición del suelo (Power y Follett, 1987; Francis y Clegg, 1990; Bullock, 1992). La naturaleza del *efecto rotación* no es aún completamente conocida, y se asume que es la resultante del efecto combinado de todos aquellos efectos, con importancias relativas variables de acuerdo a las condiciones ambientales (Bullock, 1992; Whiting y Crookston, 1993). En términos generales, las ventajas de la rotación se relacionan con la posibilidad de *i*) manejar la cantidad y la calidad del material vegetal (raíces y residuos de cosecha) que se devuelven al suelo; *ii*) incorporar cultivos que fijen nutrientes (p.e. leguminosas) o con distintos patrones de utilización de nutrientes y agua; *iii*) manejar las malas hierbas, las plagas y las enfermedades; *iv*) combinar sistemas de laboreo y de agroquímicos, permitiendo una utilización más eficiente; y *v*) manejar la cobertura del suelo y sus propiedades químicas, biológicas y físicas (Urbano Terrón, 1989). En definitiva, el logro de una agricultura más segura tiene su piedra angular en el conocimiento de las delicadas relaciones entre los componentes del sistema, los procesos y mecanismos involucrados en la definición de

la producción, y el ambiente. El paso desde una agricultura tradicional hacia una *agricultura sostenible* supone la transformación de una agricultura basada casi exclusivamente en la utilización de insumos externos, en una agricultura basada en el manejo de las interacciones y de los procesos (Luna y House, 1990) que permita hacer un uso más racional y seguro de aquéllos, valiéndose de los servicios que el agroecosistema puede brindar si se lo mantiene en condiciones adecuadas. Las rotaciones de cultivos son una herramienta de gran valía para el logro de tal objetivo, pero es necesario continuar la investigación sobre las relaciones entre los cultivos, otras prácticas de manejo y el sistema, a fin de permitir su manejo en provecho de una agricultura que garantice la sostenibilidad del mismo.

## **1.2. Efectos de largo plazo de la rotación de cultivos**

Los efectos de largo plazo son aquéllos que tienen que ver con la influencia de las rotaciones sobre algunas características del suelo que condicionan no sólo los procesos dentro del mismo, sino también el comportamiento de los cultivos en relación al estado edáfico logrado. Las prácticas de manejo (entre las que se incluyen las rotaciones) intervienen sobre el ambiente del suelo alterando las condiciones que regulan la actividad de los microorganismos y de las raíces (Power, 1994) a través de la modificación de las condiciones abióticas (disponibilidad de agua y de aire, temperatura, compactación, porosidad, exposición a la erosión, etc.) y bióticas (disponibilidad y accesibilidad de sustrato). Por otro lado, el manejo de las propiedades del suelo tiene importancia para el logro de sistemas agrícolas productivos en el largo plazo, ya que de ellas dependen gran parte de las condiciones necesarias para garantizar una *agricultura sostenible* (Robinson *et al.*, 1994).

### **1.2.1. Contenido de materia orgánica**

Uno de los componentes del suelo más alterados por las prácticas de manejo es la materia orgánica (MO) (Follett *et al.*, 1987). La MO es un componente clave del sistema suelo dada su influencia sobre las propiedades biológicas, físicas y químicas que definen su productividad (Robinson *et al.*, 1994) y su calidad, conducentes al logro de la sostenibilidad (Doran y Parkin, 1994). Las variaciones en la MO significan cambios en la fertilidad del suelo y en su resistencia a la erosión, como así también en la facilidad con que puede ser laboreado, en su capacidad de infiltración y de almacenaje de agua, y en la habilidad para ligar o promover la degradación de sustancias tóxicas (Follett *et al.*, 1987). Por otro lado, las variaciones en el contenido de MO del suelo son asociadas a la emisión o fijación de dióxido de carbono con el consecuente efecto sobre la atmósfera (Varvel, 1994). El contenido de MO del suelo determina la capacidad de éste para reorganizarse ante las alteraciones provocadas por el manejo (Kanal y Kölli, 1996), propiedad que caracteriza a los sistemas sostenibles (Addiscott, 1995). Actualmente se considera que toda aquella práctica tendiente al mantenimiento o incremento del nivel de MO en el suelo es una práctica que contribuye a la sostenibilidad (Robinson *et al.*, 1994).

El contenido de MO de un suelo refleja la historia del balance entre las tasas de humificación y de mineralización (Campbell, 1978; Stevenson, 1986). Este balance es afectado por la cantidad y forma de manejo del carbono (C) restituído al suelo bajo la forma de residuos de cosecha y de raíces remanentes (Larson *et al.*, 1978; Robinson *et al.*, 1994), y por las labranzas y la fertilización (Doran y Smith, 1987; Bullock, 1992; Robinson *et al.*, 1994). A través de las rotaciones se puede manejar la dinámica del carbono en el suelo, y con ella la de otros nutrientes asociados (nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre), mediante la manipulación de los momentos y las cantidades de retorno de C al suelo, y la calidad (i.e. composición química) y distribución de los restos

aportados (Campbell, 1978). No obstante, los efectos de las rotaciones sobre la MO son complementados por los de las labranzas y los de otras prácticas (p.e. fertilización y riego), y sus relaciones son tan estrechas y complejas que es generalmente difícil separarlos y analizarlos individualmente.

#### **1.2.1.1. Rotaciones de cultivos anuales**

Campbell y Zentner (1993) observaron que la evolución del contenido de N orgánico del suelo (íntimamente asociado a la evolución del contenido de C orgánico) variaba en función de la cantidad de residuos devuelta por distintas rotaciones con base de trigo (*Triticum aestivum* L.). La reducción de la frecuencia de barbechos (14 meses entre cultivos de trigo) en la rotación y la fertilización con N y P aumentaron la oferta de residuos y, por lo tanto, el contenido de N orgánico del suelo. Similares resultados fueron publicados por Peterson *et al.* (1993), Wood *et al.* (1990), y Wood *et al.* (1991) quienes observaron incrementos de C orgánico en los primeros 10 cm de suelo al incrementar el aporte de residuos y reducir la frecuencia de los períodos de barbecho en la rotación luego de cambiar el sistema de cultivo tradicional (trigo-barbecho con laboreo convencional (LC)) por rotaciones más intensivas (trigo-maíz (*Zea mays* L.)-barbecho y trigo-maíz-mijo (*Panicum miliaceum* L.)-barbecho) con siembra directa (SD). No obstante, Campbell *et al.* (1996) no lograron incrementos en el contenido de C orgánico de los primeros 15 cm de suelos de textura gruesa, ni eliminando los barbechos de la rotación, ni reduciendo el laboreo a su mínima expresión. Esto fue atribuido a la baja productividad de esos suelos que no permitió producir la cantidad de residuos necesaria para mantener o incrementar el contenido de MO del suelo. Sin embargo, estos autores también informaron de un leve incremento del C orgánico del suelo en los últimos 4 años de la experiencia, causado por una producción más elevada de residuos por el cultivo de trigo, debida a la

ocurrencia de lluvias inusuales. Por su parte, Collins *et al.* (1992) observaron que los aportes de C logrados con la alternancia trigo-barbecho con agregado de abono orgánico (11 Mg al trigo) y sistemas el trigo continuo y de rotación trigo-guisante (*Pisum sativum* L.) mantuvieron un más alto contenido de C orgánico en el suelo que los sistemas de trigo-barbecho tradicionales, entre los que incluyeron una alternativa con quemado de los rastrojos (i.e. sin aporte de material) que presentó el más bajo contenido de C orgánico. Estos autores, observaron, sin embargo, que cuando el suelo se mantuvo con pradera durante toda la experiencia, los contenidos de C y N orgánicos fueron significativamente más elevados que en cualquiera de los tratamientos mencionados. Wood *et al.* (1991) informaron que el incremento de C y N orgánicos logrados con una pastura de gramíneas, fue significativamente mayor que el logrado al reducir la frecuencia de barbecho en la rotación y eliminar el LC.

En un estudio realizado con distintas rotaciones (soja (*Glycine max* (L.) Merr.) continua, rotación sorgo para grano (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.)-soja y sorgo continuo), distintos sistemas de labranza (LC y SD) y en distintos suelos, Havlin *et al.* (1990) observaron relaciones de todas esas variables con la dinámica del C y del N orgánicos. En general, el contenido de C y N orgánicos en la capa superficial del suelo (2.5 cm), se incrementaron linealmente con el aumento en la cantidad de residuos devueltos al mismo, el cual se debió al incremento de la frecuencia del cultivo de sorgo en la rotación (o sea, disminución de la frecuencia del cultivo de soja). Las pendientes del incremento fueron más altas bajo SD que bajo LC, como así también fueron más elevadas para un suelo de textura limosa fina respecto a uno de textura arcillo-limosa, aunque los contenidos de C y N orgánicos de aquél fueron menores. Las diferencias entre rotaciones y sistemas de labranza fueron más atenuadas por debajo de los 2.5 cm y fueron muy leves al considerar los 15.0 cm superficiales del suelo. En una

experiencia paralela con tres sistemas de cultivo (soja continua, rotación soja-maíz, y maíz continuo) y distintas dosis de fertilización nitrogenada, los mismos autores observaron que la fertilización elevó sólo levemente los contenidos de C y N mientras que fue más importante la cantidad de residuos aportada al sistema. Resultados similares en cuanto al efecto de la presencia del cultivo de soja en la rotación sobre el contenido de C y N orgánicos, fueron informados por Varvel (1994). Este autor observó, además, que la fertilización nitrogenada producía incrementos de importancia de C y N en el suelo a través de su efecto sobre la producción de materia seca de los cultivos. Con una adecuada selección de la rotación y fertilización, es posible mejorar el contenido de MO del suelo, aún con LC (Varvel, 1994), aunque sería recomendable dejar los residuos sobre la superficie del suelo (Havlin *et al.*, 1990).

El aporte de las raíces de los cultivos de material para la formación de MO, es de fundamental importancia (Richter *et al.*, 1990), no sólo por la cantidad de C que devuelven al suelo, sino también porque lo dejan más uniformemente distribuido en la matriz del suelo (Kanal y Kölli, 1996). A través de las rotaciones se pueden combinar cultivos que tanto restituyan distintas cantidades de residuos superficiales, como que presenten diferentes relaciones parte aérea/raíz y morfología y fisiología de sus sistemas radicales. Roder *et al.* (1988) informaron que, si bien el sorgo para grano y la soja en monocultivo producían menor biomasa aérea que en rotación, la acumulación de materia seca en las raíces era mayor para ambos cultivos cuando el antecesor era sorgo. No obstante, esto no se tradujo en diferencias significativas entre sistemas de cultivo en contenido de MO en los primeros 30 cm de suelo, aunque éste tendió a ser mayor en los casos con mayor producción de biomasa radical. Kanal y Kölli (1996) encontraron diferencias en el aporte en tiempo y espacio de biomasa subterránea entre distintos cereales (trigo, cebada (*Hordeum vulgare* L.) y centeno (*Secale cereale* L.)) y

entre éstos y pasturas de gramíneas. En este último caso determinaron una mayor producción de biomasa radical, sugiriendo su potencial para el mantenimiento de elevados contenidos de MO. Fraser *et al.* (1994) determinaron diferencias en contenido de C orgánico en los primeros 10 cm de suelo entre parcelas bajo cultivos anuales y parcelas bajo pasturas de gramíneas y leguminosas y bajo pradera natural, las que fueron atribuidas al diferente aporte y distribución de biomasa radical. Richter *et al.* (1990) observaron que las gramíneas de una pradera de larga duración producían mayor biomasa radical que las plantas herbáceas anuales espontáneas en parcelas laboreadas anualmente, lo que se tradujo en diferencias en el contenido de C orgánico.

#### **1.2.1.2. Rotaciones de cultivos anuales con pasturas**

La inclusión de pasturas en una rotación puede contribuir a manejar las fluctuaciones de contenido de MO del suelo, permitiendo incrementarlo luego de períodos de disminución (Campbell, 1978; Díaz Rossello, 1992a, b). Las pasturas producen un incremento en la cantidad de componentes orgánicos del suelo debido a su mayor y más continua producción de biomasa aérea y subterránea (Tisdall y Oades, 1982; Haynes *et al.*, 1991), y a la excelente distribución y mezcla de precursores de la MO dejados por sus raíces, especialmente las de las gramíneas (Oades, 1984). Wood *et al.* (1991) informaron que, si bien la producción de biomasa aérea de una pastura de gramíneas había sido menor que la de una rotación de cultivos bajo SD, el aumento de C y N orgánicos luego de cuatro años de instalados ambos sistemas, fue superior bajo la pastura debido al mayor aporte por parte de las raíces. Sparling *et al.* (1992) observaron incrementos de C orgánico con la inclusión de pasturas luego de monocultivo de maíz y de cereales de invierno bajo LC. No obstante, con cuatro años bajo pastura no se alcanzó el nivel de C orgánico determinado bajo la pradera natural,



y sugirieron que el manejo previo al establecimiento de la pastura podría haber tenido una gran influencia sobre la recuperación que ésta puede provocar. Las ventajas y condiciones de las rotaciones con pasturas dependen del tipo y ubicación del suelo (Addiscott, 1995), pero la cuidadosa selección de los cultivos a incluir (Havlin *et al.*, 1990; Varvel, 1994) y del sistema de labranza a utilizar (Lamb *et al.*, 1985) durante el período de agricultura, permitirán definir para cada situación cuáles van ser las duraciones de los períodos bajo agricultura y pastura que permitan mantener los niveles de MO.

### **1.2.2. Disponibilidad de nitrógeno**

Uno de los principales efectos a largo plazo de las rotaciones tiene que ver con la capacidad del suelo de proveer N (Bullock, 1992), aunque las relaciones entre las variaciones en el contenido de MO y la dinámica del N en el suelo no son siempre predecibles, constantes o directas y están condicionadas por los efectos a corto plazo (Doran y Smith, 1987). Echeverría *et al.* (1994a) determinaron que suelos bajo rotación con pasturas presentaban mayor capacidad de mineralización de N que suelos bajo agricultura continuada luego de varios años desde la última pastura. Wani *et al.* (1994) observaron que suelos bajo rotaciones de cebada con leguminosas incorporadas como abono verde y pasturas de tres años, fueron capaces de mineralizar mucho más N que suelos bajo cebada continua o bajo una rotación de trigo-avena (*Avena sativa* L.)-cebada-pastura de dos años. Wood *et al.* (1990) informaron que una rotación trigo-maíz-mijo-barbecho había incrementado el contenido de fracciones activas de la MO del suelo respecto a la secuencia trigo-barbecho, mejorando así su potencialidad de proporcionar N a los cultivos. Estas diferencias fueron atribuidas, entre otros factores, a la mayor cantidad y diferente calidad de los residuos devueltos al suelo. Entry *et al.* (1996) informaron que la inclusión de leguminosas como abono verde en rotación con

algodón, mejoró tanto la cantidad de fracciones activas de la MO (tales como la biomasa microbiana), como su proporción respecto a la fracción orgánica total del suelo, lo que se tradujo en mejores rendimientos del algodón. Si bien la biomasa microbiana es un compartimento de N orgánico en el suelo de pequeño tamaño, su aporte al N disponible para las plantas es de gran importancia (Doran y Smith, 1987; Power, 1994). Echeverría *et al.* (1993) observaron que bajo pasturas, el N en la biomasa microbiana era significativamente superior que bajo una agricultura convencional prolongada.

### **1.2.3. Propiedades físicas del suelo**

Las propiedades físicas del suelo también son afectadas por las rotaciones, aunque generalmente en relación con su efecto sobre la MO (Bullock, 1992) y con la posibilidad de combinación de cultivos con distintos sistemas radicales. El continuo crecimiento y muerte de las raíces se asocia con incrementos en la biomasa microbiana y en la producción de sustancias ligantes de las partículas del suelo (Tisdall y Oades, 1982; Haynes y Francis, 1993; Haynes *et al.*, 1991). Además, distintos sistemas radicales ejercen diferentes patrones de fuerzas y de secado/humedecimiento que influyen diferencialmente sobre la agregación (Tisdall y Oades, 1982; Bullock, 1992; Haynes y Francis, 1993; Robinson *et al.*, 1994) y con ello la porosidad del suelo. No obstante, la práctica de manejo que más intensa y directamente influye sobre las propiedades físicas del suelo es el laboreo (Robinson *et al.*, 1994) ya que las sustancias que pueden haberse acumulado en el suelo en función de la rotación que se haya realizado, pueden perderse o modificarse en poco tiempo bajo laboreos agresivos (Doran y Smith, 1987; Bullock, 1992). Cuando las rotaciones incluyen períodos sin laboreo por varios años (p.e. bajo pasturas o SD) se mejoran las condiciones físicas y

de actividad biológica del suelo (Oades, 1984; Doran y Smith, 1987; Bullock, 1992; Fraser *et al.*, 1994).

La puesta en cultivo convencional de suelos bajo pasturas produjo disminuciones más pronunciadas de la estabilidad estructural del suelo que del C orgánico y del C de la biomasa microbiana, aunque las magnitudes de tales variaciones difirieron con los tipos de suelo, siendo menores en aquéllos de textura más fina o con mayor contenido de MO (Sparling *et al.*, 1992). Kay *et al.* (1988) relacionaron las variaciones de estabilidad estructural en rotaciones de maíz con pasturas de gramíneas, con los cambios en la cantidad en el suelo de materiales orgánicos ligantes, cuya dinámica fue descrita por modelos exponenciales. Sparling *et al.* (1992) hallaron relaciones significativas entre el contenido de C orgánico y el de C de la biomasa microbiana, y la estabilidad de la estructura durante la fase de disminución de estas variables. No obstante, al restituir la pastura después de un período largo de agricultura convencional, estas tres variables se incrementaron, pero las variaciones en C orgánico y C de la biomasa microbiana no explicaron adecuadamente la variación en estabilidad estructural. La relación entre el C orgánico y la estabilidad de los agregados no es siempre clara, pero pueden encontrarse patrones de disminución y aumento de esta última variable, similares a los de fracciones lábiles de la MO del suelo, que son las que más contribuyen a la estabilización de los macroagregados (Tisdall y Oades, 1982; Cambardella y Elliott, 1994). Con una pastura de 4 años luego de un largo período de agricultura convencional, Sparling *et al.* (1992) no lograron que el nivel de estabilidad de la estructura alcanzara al que presentaba la pastura permanente, posiblemente porque el grado de deterioro producido fue tal que no permitió un rápido restablecimiento de las condiciones.

Por otro lado, en los casos en que las rotaciones no incluyan períodos de más de un año bajo pastura, puede haber diferencias en el comportamiento de los cultivos involucrados en cuanto a las propiedades físicas del suelo. Chan y Heenan (1996) evaluaron el efecto de distintos cultivos alternados con trigo, sobre algunas propiedades físicas del suelo. Estos autores encontraron diferencias en la capacidad de los cuatro cultivos empleados (cebada, guisante, lupino (*Lupinus angustifolius* L.), y colza (*Brassica napus* L.)), para favorecer la formación y la estabilización de los agregados. El lupino fue el cultivo más efectivo en estos dos aspectos, mientras que la cebada y el guisante fueron sólo efectivos para estabilizar agregados. Las diferencias fueron atribuidas a los patrones de enraizamiento de cada cultivo y a la relación de sus raíces con la producción de materiales orgánicos que contribuyen a la estabilización y con el desarrollo de hifas de hongos. Sin embargo, Chan y Heenan (1996) concluyeron que los efectos observados fueron de corta duración debido al empleo de LC. En un ensayo similar comparando la alternancia de trigo con lupino y una pastura de gramíneas y leguminosas de un año con trigo continuo, Smettem *et al.* (1992) observaron efectos tanto del sistema de labranza (SD vs LC) como del sistema de cultivo sobre algunas propiedades físicas del suelo. La estabilidad de los agregados y el contenido de C orgánico fueron más elevados bajo SD, mientras que sólo hubo leves diferencias (no significativas) en C orgánico entre rotaciones que no explicaron las diferencias en estabilidad de los agregados. Raimbault y Vyn (1991) observaron que la estabilidad estructural fue mayor cuando se empleaba laboreo mínimo que cuando se utilizaba LC, tanto para maíz continuo como para maíz en rotación con leguminosas o cereales. Sin embargo, hubo diferencias entre sistemas de cultivo, presentando la menor estabilidad el maíz continuo y el maíz en rotación con soja, y la mayor estabilidad la rotación de maíz con alfalfa (*Medicago sativa* L.) y con cereales

mezclados con trébol rojo (*Trifolium pratense* L.). No obstante, todos los sistemas de cultivo presentaron menor estabilidad que la situación bajo alfalfa continua.

### **1.3. Efectos de corto plazo de la rotación de cultivos**

Se entiende que efectos de corto plazo son aquéllos que se refieren a la influencia directa o indirecta que ejerce un cultivo sobre el siguiente en la sucesión. Gran parte de la literatura identifica a este tipo de efectos como el *efecto rotación* y los relaciona fundamentalmente con el control de plagas, enfermedades y malas hierbas, con la dinámica y la disponibilidad de nutrientes (especialmente N) y de agua (especialmente en zonas áridas y semiáridas).

Raimbault y Vyn (1991) demostraron que, en condiciones de fertilidad y de control de plagas y malas hierbas adecuadas, el rendimiento del primer año de maíz después de otros cultivos, fue superior al de maíz en monocultivo. No obstante, en la mayoría de los años del estudio, los rendimientos del segundo año consecutivo de maíz siguiendo a los otros cultivos, no difirieron de los obtenidos en monocultivo. Crookston *et al.* (1991) obtuvieron resultados similares comparando durante varios años los rendimientos de maíz y soja en rotación y en monocultivo. Los rendimientos del primer año de maíz después de varios años de soja fueron significativamente superiores que los del monocultivo de maíz, mientras que los rendimientos de maíz alternado con soja fueron intermedios. A partir del segundo año de maíz luego de varios años de soja los rendimientos cayeron por debajo de los obtenidos cuando el maíz era alternado con soja y no difirieron de los obtenidos bajo monocultivo. Los rendimientos de soja presentaron un comportamiento similar, difiriendo sólo en que igualaron a los del monocultivo recién al tercer año luego de varios años de maíz, mientras que al segundo igualaron a lo obtenidos al alternar soja con maíz. No obstante, en las

experiencias mencionadas se observaron interacciones entre los rendimientos y el ambiente (año y localidad) lo que llevó a Crookston *et al.* (1991) a concluir que el efecto rotación es inconstante y fugaz, producto de la interacción de diversos factores que pueden o no ser de significancia según el ambiente o la combinación de cultivos.

### **1.3.1. Plagas, enfermedades y malas hierbas**

La rotación es uno de los métodos más importantes para discontinuar los requisitos de las plagas y de los agentes patógenos, y reducir sus formas de perpetuación (Zadocks y Schein, 1979; Pedigo, 1991). No obstante, la rotación no es efectiva para el control de cualquier tipo de plaga o enfermedad (Bullock, 1992). La alternancia de cultivos será más efectiva para el control de especies con un estrecho rango de hospedantes, con baja movilidad, que hayan formado o depositado sus órganos de perpetuación antes del nuevo cultivo, y que no sean capaces de sobrevivir por mucho tiempo sin su hospedante (Luna y House, 1990; Pedigo, 1991; Bullock, 1992). Estas características responden por lo general a plagas o agentes patógenos que habitan en el suelo durante una buena parte de su ciclo de vida (Zadocks y Schein, 1979; Pedigo, 1991; Cook, 1993). El manejo de las enfermedades y plagas de los cultivos comienza, entre otras cosas, por contar con un suelo libre de patógenos (i.e. saneado) y plagas, lo cual puede ser logrado naturalmente con las rotaciones, siempre y cuando haya suficiente tiempo entre la aparición en la secuencia de los cultivos susceptibles, para que los depredadores naturales o el mismo ciclo de vida haga disminuir la incidencia de la especie dañina (Luna y House, 1990; Cook, 1993).

La alternancia de soja y maíz era recomendada como muy efectiva (Bullock, 1992) para el control del "gusano de la raíz del maíz" (*Diabrotica sp.*) ya que sus larvas son monófagas (sólo se alimentan de tejidos de maíz) y al eclosionar los huevos durante el ciclo de la soja no encontraban alimento y morían (Pedigo, 1991). Sin

embargo, el uso reiterado de esa rotación ha estado ejerciendo una selección sobre aquel insecto y se ha incrementado la proporción de huevos que pueden persistir por más de una año sin eclosionar, lo que obligará a extender el período entre cultivos de maíz (Pedigo, 1990; Bullock, 1992). Whiting y Crookston (1993) no encontraron relación entre la disminución de rendimiento de soja al incrementarse los años de monocultivo luego de maíz, y la severidad de "podredumbre marrón del tallo" (*Phialophora gregata*), ni detectaron efecto significativo de otras enfermedades. Sin embargo, notaron que la severidad de aquella enfermedad se incrementaba con los años de monocultivo, no era importante cuando la soja era alternada con maíz, su incidencia era mucho menor cuando se usaba una variedad resistente y era variable según el año. A pesar de que el nivel de enfermedad en relación al patógeno, al cultivo y al ambiente, debe ser considerado como uno de los componentes del *efecto rotación* (Whiting y Crookston, 1993), no se conoce la incidencia detrimental de todas las plagas y enfermedades sobre los cultivos. Por lo tanto, se podría hipotetizar que una parte importante del *efecto rotación* podría deberse a la acción de la rotación sobre efectos o niveles de afectación desconocidos o no medibles (Bullock, 1992).

El uso de rotaciones establece el marco para un manejo sostenible de las malas hierbas (Liebman y Janke, 1994). La severidad de los problemas asociados con las malas hierbas es menor cuando se diversifican los cultivos (Leighty, 1938). Cada cultivo es afectado por un grupo particular de malas hierbas que tiene hábitos de crecimiento similares y se beneficia con las prácticas de manejo empleadas para el cultivo (Bullock, 1992). Con la combinación de cultivos que difieran en las fechas de siembra y maduración y en los requerimientos de manejo (Liebman y Janke, 1994) o que ejerzan diferente forma, intensidad u oportunidad de competencia (Reigner y Janke, 1990), el crecimiento y la reproducción de aquellas especies de malas hierbas, pueden ser

interrumpidos. Rotaciones en las que se emplee laboreo y se puedan rotar y combinar herbicidas, o que incluyan períodos bajo algún cultivo perenne (p.e. pasturas) son alternativas deseables para un manejo sostenible de las malas hierbas (Liebman y Janke, 1994). Sin embargo, el exceso de laboreo puede asociarse a otros problemas de degradación (p.e. erosión) y las pasturas pueden favorecer el desarrollo de algunas malas hierbas perennes (Reigner y Janke, 1990; Liebman y Janke, 1994). Otra de las ventajas de las rotaciones respecto al manejo de las malas hierbas y la eventual reducción de uso de herbicidas, es la explotación de los efectos alelopáticos que algunos cultivos pueden ejercer sobre aquéllas (Putnam, 1988).

### **1.3.2. Alelopatía**

La alelopatía es definida como el efecto positivo o negativo provocado sobre alguna especie vegetal, por productos químicos producidos por individuos de la misma o de otra especie (Putnam, 1988). Se pueden distinguir dos tipos de alelopatías negativas: autotoxicidad, cuando una especie libera sustancias que inhiben la germinación o el crecimiento de plantas de la misma especie; y heterotoxicidad, cuando las sustancias tóxicas liberadas por una especie ejercen su efecto sobre otra (Miller, 1996). Las mismas consideraciones pueden ser realizadas en lo que respecta a los efectos alelopáticos positivos. Las sustancias químicas responsables de la alelopatía pueden provenir del lavado de cualquier órgano vegetal, de exudados de raíces, o como productos orgánicos por la acción microbiana durante la descomposición de exudados, de residuos de cosecha o de raíces (Putnam, 1988). Si bien la existencia de la alelopatía ha sido demostrada, la intensidad y la efectividad de la misma varía en función de un gran número de factores que interactúan (Einhelling, 1996).

En un estudio de laboratorio, Lovett y Jessop (1982) demostraron la existencia de efectos alelopáticos de distinta magnitud provocados por residuos de diferentes



especies vegetales, sobre la germinación y el crecimiento inicial del trigo, siendo, a su vez, diferentes en función del estado de esos residuos (frescos, en descomposición o secos). Sin embargo, en condiciones de invernadero, si bien los efectos alelopáticos se mantuvieron, su intensidad varió de acuerdo a si los residuos se mezclaban con el suelo (mayor efecto alelopático) o se dejaban en superficie. Resultados similares fueron publicados por Morris y Parrish (1992) quienes en laboratorio hallaron que distintas concentraciones de extractos de residuos de girasol (*Helianthus annuus* L.), afectaban el crecimiento de plántulas de trigo, pero en estudios de invernadero y de campo el mayor efecto se producía cuando los residuos de girasol eran incorporados al suelo.

Muchos autores mencionan que los efectos negativos del monocultivo son debidos a sustancias autotóxicas (Bullock, 1992). Crookston *et al.* (1988) concluyeron que los mejores rendimientos de maíz en rotación con soja, eran debidos a la ausencia de algún factor negativo presente en el suelo en condiciones de monocultivo, más que a la presencia de alguna sustancia promotora del crecimiento liberada por la soja. Crookston y Kurle (1989) observaron que cantidades adicionales de residuo de maíz, no disminuyeron el efecto rotación producido por la soja como cultivo antecesor, ni provocaron mayor disminución del rendimiento en condiciones de maíz continuo. Esto lo atribuyeron a que la permanencia del residuo de maíz incorporado al suelo durante todo el invierno, habría hecho que sus sustancias tóxicas fueran liberadas permitiendo así su desactivación en el suelo antes de la siembra del cultivo siguiente.

La utilización de las relaciones entre cultivos a través de la alelopatía, es una de las posibilidades que ofrece la rotación (Francis y Clegg, 1990; Bullock, 1992). Sin embargo, tales relaciones son poco conocidas y no se han podido identificar los productos químicos que actúan, ni se conoce su modo de acción ni los factores que lo

condicionan (Putnam, 1988; Miller, 1996). La alelopatía resulta del efecto combinado de varios componentes y no está aislada de otros factores que alteran el crecimiento de las plantas (i.e. enfermedades, estrés nutricional o hídrico, plagas, condiciones de suelo, etc.) lo que provoca que su impacto varíe según el ambiente y dificulta su evaluación y manejo (Einhelling, 1996).

### **1.3.3. Dinámica del nitrógeno**

El nitrógeno es el nutriente deficiente con mayor frecuencia en la producción de cultivos y muchos de los procesos que gobiernan su transformación y disponibilidad, pueden ser manipulados a través de las prácticas de manejo de suelo y de cultivos (Tisdale *et al.*, 1993). Estas prácticas producen, en general, una alteración del ambiente edáfico, modificando las condiciones ambientales para la actividad de los microorganismos, los que son, en definitiva, los responsables de las transformaciones del N (Power, 1994). De todos los factores que intervienen en el *efecto rotación*, la influencia de las rotaciones sobre la dinámica de N es uno de los más antigua y universalmente reconocidos (Kurtz *et al.*, 1984; Power, 1990, Bullock, 1992). No obstante, la disponibilidad de fertilizantes de síntesis que permiten suministrar las cantidades necesarias de N a relativamente bajo costo, ha provocado un decreciente interés por las rotaciones (Kurtz *et al.*, 1984; Power, 1990), y un aumento de los problemas de contaminación (Tisdale *et al.*, 1993).

#### **1.3.3.1. Mineralización-inmovilización**

El proceso de mineralización/inmovilización es uno de los que más influye sobre la disponibilidad de N en el suelo (Doran y Smith, 1987). La intensidad de este proceso puede variar en función de condiciones naturales (p.e. disponibilidad de agua,

temperatura) o de alteraciones del ambiente edáfico provocado por prácticas de manejo (p.e. sistemas de laboreo, disposición de los residuos) (Power y Legg, 1978). No obstante, la cantidad y la calidad del sustrato (i.e. residuos de cosecha) disponible para los microorganismos, es un factor muy importante para el control de la tasa a la que el N puede estar disponible (Parr y Papendick, 1978). En términos generales, la actividad de los microorganismos en el suelo depende, entre otras cosas, de la disponibilidad de sustratos energéticos (compuestos carbonados) y de N. Cuando la cantidad de compuestos carbonados en el sustrato es muy superior a la cantidad de N (relación carbono/nitrógeno (C:N) alta), los microorganismos toman este nutriente del medio (inmovilización neta) y tardan más tiempo en descomponer el residuo. A medida que la C:N va disminuyendo a través del proceso de descomposición, o bien cuando los residuos presentan baja C:N, la muerte de microorganismos provoca liberación de N (mineralización neta) (Parr y Papendick, 1978; Power y Doran, 1988). En un ensayo de invernadero, Sánchez (1997) demostró que residuos de maíz (alta C:N) se descomponían más lentamente que residuos de soja (baja C:N), tanto si estaban mezclados con el suelo como si estaban sobre su superficie, aunque en este último caso la descomposición era aún más lenta. Asimismo, los residuos de maíz inmovilizaron N durante toda la experiencia (150 días), mientras los de soja sólo lo hicieron al principio y luego liberaron N durante todo el resto.

A través de las rotaciones es posible combinar cultivos que dejen residuos de distinta calidad y con ello modificar la disponibilidad de N para el cultivo siguiente. Echeverría *et al.* (1992) observaron mayor acumulación de materia seca aérea y de N en la planta, mayor rendimiento en grano, y menor respuesta al agregado de N cuando el cultivo de trigo había sido realizado luego de un cultivo de soja o de girasol, que cuando el antecesor había sido maíz. Las diferencias encontradas fueron atribuidas al

efecto de la calidad (C:N) y de la cantidad de los residuos dejados por cada cultivo antecesor sobre la disponibilidad de N. La disímil acumulación de N de nitratos en los seudotallos de trigo al estado fenológico de "doble arruga" (6770, 5648 y 3580 mg kg<sup>-1</sup> cuando los antecesores fueron soja (C:N=45), girasol (C:N=60) y maíz (C:N=72), respectivamente) indica que los efectos de los residuos sobre la disponibilidad de N se manifestaron desde los primeros estadios de desarrollo del cultivo de trigo. Similares resultados fueron informados por Lázaro (1996). En ambos casos (Echeverría *et al.*, 1992; Lázaro, 1996), la fertilización del trigo con N eliminó las diferencias entre antecesores.

Knowles *et al.* (1993) observaron que a pesar de que los residuos de sorgo para grano presentan una C:N más baja que los del trigo, los rendimientos de este último cultivo después de sorgo fueron más bajos. A pesar de que ambos residuos provocaron inmovilización neta de N, el mayor tiempo entre la cosecha del primer cultivo de trigo y la siembra del segundo, permitió la descomposición de los residuos y la mineralización del N. Las diferencias observadas disminuyeron cuando los residuos fueron retirados, se incrementaron cuando los residuos fueron dejados en superficie, y desaparecieron cuando se agregaron elevadas dosis de fertilizante nitrogenado. Por su parte, Debaeke *et al.* (1996) encontraron que el trigo sembrado luego de leguminosas había absorbido hasta antesis, entre el 86 y el 91% del total de N, mientras que cuando los antecesores habían sido cereales, la absorción en ese estado había sido sólo de entre el 73 y el 81%. Estas diferencias y la menor absorción total de N cuando los antecesores habían sido cereales, fueron atribuidas a que la C:N de los residuos era más elevada (mayor inmovilización del N del suelo) y a que éstos habían sido incorporados al suelo más tardíamente. Peterson y Varvel (1989a) encontraron que la soja en monocultivo produjo un menor rendimiento en grano y acumuló menos materia seca que cuando el

cultivo antecesor era maíz o sorgo. No obstante, el agregado de N expuso diferencias entre antecesores, ya que el cultivo de soja sobre sorgo respondió a la fertilización generando mayores rendimientos. Esto llevó a sugerir que los residuos de sorgo provocaron mayor inmovilización de N del suelo que los residuos de maíz. Sin embargo, las diferencias de rendimiento en grano observadas en condiciones de monocultivo en relación a la situación en rotación, fueron proporcionalmente menores (aunque significativas), que las informadas por Peterson y Varvel (1989b,c) para maíz y sorgo en esas mismas condiciones de sistema de cultivo. El cultivo antecesor influyó el momento y la cantidad de mineralización del N, como así también la cantidad y el momento de absorción del nutriente por el cultivo siguiente (Debaeke *et al.*, 1996).

#### **1.3.3.2. Rotación con leguminosas**

Tal como se señaló anteriormente, una de las ventajas de las rotaciones es la de permitir incorporar cultivos que tengan la capacidad de fijar el N atmosférico. La simbiosis entre las bacterias del género *Rhizobium* o *Bradyrhizobium*, que aportan las enzimas para catalizar la reducción del N<sub>2</sub>, y las leguminosas, que aportan la energía y la protección necesarias para el proceso; tanto como el elevado valor agronómico de muchas de aquéllas, han hecho que las leguminosas fueran ampliamente utilizadas desde antaño en las rotaciones (Kurtz *et al.*, 1984; Power, 1990). Algunos autores han sugerido que la contribución de N por parte de las leguminosas en la sucesión de cultivos es la responsable de gran parte de los efectos beneficiosos de la rotación (Bullock, 1992). No obstante, la cantidad de N aportado por las leguminosas depende de muchos factores tanto abióticos, como referidos al comportamiento de las bacterias y del cultivo que pueden afectar la eficiencia y cantidad de N fijado, como así también factores relacionados al manejo que se haga de las leguminosas que pueden afectar la cantidad de N aportado al sistema. Cultivos cuya producción (tanto vegetativa como en

granos) se exporta del sistema significan un menor aporte de N al mismo y, a veces, hasta resulta en déficits en el balance del nutriente (Power, 1990).

Se define al "valor de fertilizante de sustitución" (VRF) como la cantidad de fertilizante nitrogenado requerido para que un cultivo en monocultivo produzca el mismo rendimiento que cuando sucede a una leguminosa (Hesterman, 1988; Bullock, 1992). Este valor representa una estimación cuantitativa de la cantidad de N que aporta la leguminosa al cultivo que la sigue en la secuencia (Bullock, 1992). Peterson y Varvel (1989b, c) informaron que eran necesarios 90 y 180 kg N ha<sup>-1</sup> para que los rendimientos del monocultivo de sorgo para grano y de maíz, respectivamente, igualaran los rendimientos obtenidos luego de soja o de una mezcla de avena, trébol rojo y trébol de olor amarillo (*Melilotus officinalis* L.). Badaruddin y Meyer (1994) calcularon un VRF de 75 kg N ha<sup>-1</sup> para un monocultivo de trigo de primavera respecto a trigo sembrado siguiendo a distintas leguminosas cosechadas para grano (soja, judía (*Phaseolus vulgaris* L.) y lenteja (*Lens culinaris* Medicus)), aunque la cantidad de N aportada por un barbecho de veinte meses fue algo superior que la aportada por las leguminosas. Vanotti y Bundy (1995) informaron VRF de 75 y 153 kg N ha<sup>-1</sup> para el cultivo de maíz luego de soja y de dos años de alfalfa, respectivamente. Baldock *et al.* (1981) calcularon aportes de N al maíz de 66, 51 y 84 kg N ha<sup>-1</sup> por parte de un cultivo de soja, un cultivo de un año de alfalfa y un cultivo de dos años de alfalfa, respectivamente. Sin embargo, dada la compleja dinámica del N en el suelo, es probable que el VRF sobreestime la contribución de N por las leguminosas en la rotación (Bullock, 1992) y podría considerarse que incluye otros efectos que intervienen en el *efecto rotación* (Badaruddin *et al.*, 1994).

En un estudio realizado por Hesterman *et al.* (1987) utilizando nitrógeno marcado (<sup>15</sup>N), se calculó que las eficiencias de utilización del N aportado por un cultivo de

alfalfa de un año y por un cultivo de soja eran, en promedio, 48 y 34%, respectivamente. Si los VRF son afectados por estas eficiencias, se puede tener una idea de cuál es la cantidad de N que debería estar presente en los restos de las leguminosas para que sean capaces de aportar el N que surge por el cálculo de los VRF. Los valores resultantes no son reales para las condiciones normales de manejo. Hesterman *et al.* (1987) encontraron amplios rangos de variación de la eficiencia entre localidades y variedades y formas de manejo de la alfalfa (27-70%) y entre localidades y grado de nodulación de la soja (18-50%). Las mayores eficiencias corresponden a las situaciones en que las leguminosas fijaron menos N (alfalfa con mayor frecuencia de cortes y soja no nodulada). Tales variaciones fueron atribuidas a la diferencia en la cantidad de N incorporada en cada situación más que a diferencias en absorción de N por parte del maíz.

Las bajas eficiencias de recuperación del N de las leguminosas podrían estar asociadas al proceso de inmovilización/mineralización que se produce en el suelo antes de que aquél sea absorbido por las plantas (Hesterman, 1988). Varvel y Peterson (1990a) compararon la recuperación de N del fertilizante por parte de maíz continuo y en rotación con leguminosas, calculada por el método de la diferencia (N absorbido por el cultivo fertilizado - N absorbido por el cultivo sin el agregado de N) y mediante la utilización de  $^{15}\text{N}$ . Los resultados obtenidos variaron según el método empleado lo que fue atribuido a la falta de sincronización entre el uso del N por el maíz y el N mineralizado a partir del suelo y de los residuos, posiblemente debido al cultivo previo, el tipo y cantidad de residuos y, quizás, a algún otro factor ambiental. Stecker *et al.* (1995) encontraron que la cantidad de N aportada por un cultivo de soja a uno de maíz, era mayor cuando para este último se había utilizado LC que cuando se había empleado SD. Tal diferencia pudo haberse debido a que bajo este sistema de labranza

se producen, generalmente, mayor desnitrificación e inmovilización y menor mineralización del N de los residuos.

De todas maneras, sea cual fuere el efecto de las leguminosas en la rotación, éste es efímero y disminuye con los años. Vanotti y Bundy (1995) reportaron que al segundo y tercer año de maíz luego de dos años de alfalfa, el VRF cayó 76 y 100% respectivamente, respecto al del primer año. Baldock *et al.* (1981) encontraron que el aporte de N de un cultivo de alfalfa de un año al segundo y tercer año de maíz posteriores, fue 51 y 95% menor, respectivamente, que el aporte para el maíz sembrado inmediatamente después de la leguminosa. Asimismo, el aporte de N de un cultivo de alfalfa de dos años al segundo cultivo de maíz fue de sólo el 29% respecto al aporte para el primero. Similares resultados fueron informados por otros autores al analizar el efecto de cultivos de alfalfa de uno (Shrader *et al.*, 1966; Lory *et al.*, 1995), dos y tres años (Shrader *et al.*, 1966) sobre el primer y segundo cultivo de maíz. Baldock *et al.* (1981) también observaron que el efecto rotación (definido como el efecto beneficioso de las leguminosas diferente del aporte de N) sobre el maíz luego de alfalfa también disminuía al incrementarse los años de monocultivo. Por otro lado, Vanotti y Bundy (1995) observaron que, si bien un cultivo de soja había aportado más N al maíz que lo sucedía que el aportado por un cultivo de alfalfa de dos años al segundo cultivo de maíz posterior, el N remanente para un cultivo de avena siguiente a ambos cultivos de maíz, era menor en el primer caso que en el segundo. Tales diferencias fueron eliminadas con el agregado de N, lo que indica un efecto del cultivo de la soja sobre el reciclo del N en el corto plazo. Este cultivo habría absorbido, durante su ciclo, todo el N disponible, aportando el N necesario para el cultivo de maíz siguiente mediante la descomposición de sus residuos, y no dejando N residual para la avena. Badaruddin y Meyer (1994) encontraron que el N de nitratos en el suelo a la siembra



de un cultivo de primavera era menor cuando éste sucedía a leguminosas cosechadas para grano que cuando había habido un período de barbecho. Sin embargo, los rendimientos del trigo fueron similares en ambos casos. Varvel y Peterson (1990b) observaron que el cultivo de soja tanto en rotación como en monocultivo absorbe grandes cantidades de N del suelo pudiendo actuar tanto como fuente o como destino del nutriente según la cantidad que esté presente en el suelo durante su ciclo. Estos autores concluyeron que la presencia de la soja en la rotación es deseable porque, por un lado, permite reducir las dosis de fertilización en el cultivo siguiente y, por el otro, puede contribuir a la reducción de los excedentes de N mineral en el suelo que podrían ser lavados hacia las napas de agua subterránea. Vanotti y Bundy (1995) también reportaron resultados de incubaciones de suelo tomado a la siembra del cultivo de avena mencionado anteriormente, que indican que las muestras que provenían de la rotación en que había habido un cultivo de dos años de alfalfa, fueron capaces de mineralizar 51 kg N ha<sup>-1</sup> más que las muestras que provenían de la rotación en que había habido soja. Esto sugiere que para algunas leguminosas los efectos sobre los cultivos que siguen pueden ser más duraderos.

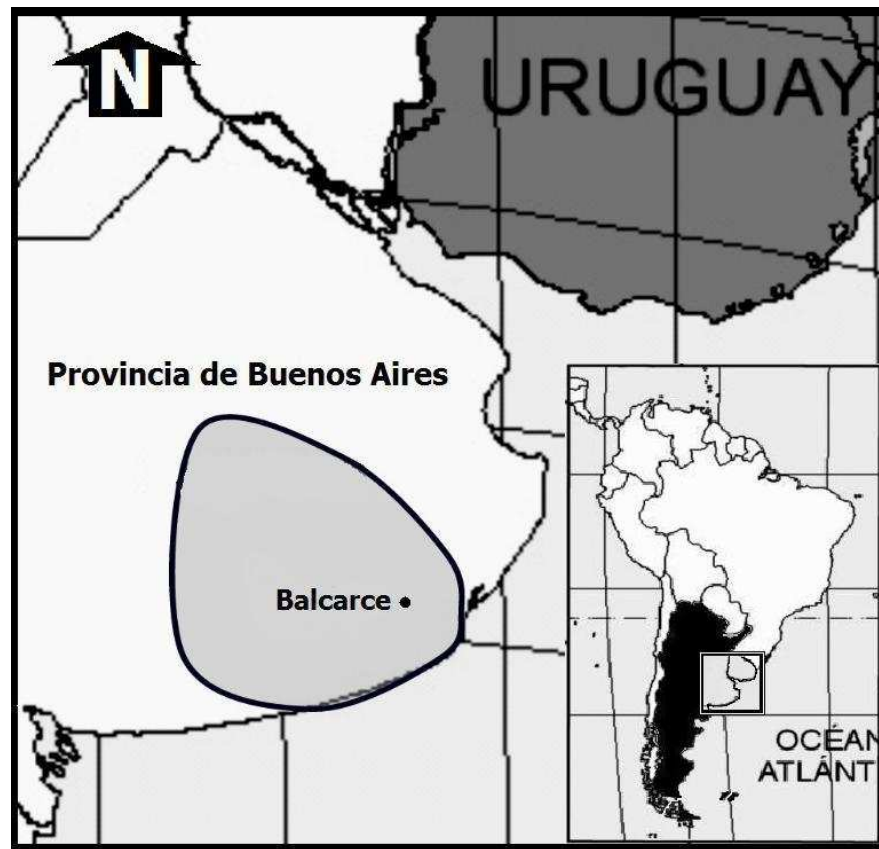
Hesterman *et al.* (1987) indicaron que sus resultados acerca del aporte de N por parte de un cultivo de alfalfa de un año al maíz que le seguía en la rotación podían estar limitados por la corta duración de aquel cultivo. Consideraron que los aportes podrían haber sido mayores si el cultivo de alfalfa hubiera sido de mayor duración. Baldock *et al.* (1981) informaron que el VRF para el monocultivo de maíz comparado con el primer año de maíz luego de un cultivo de alfalfa de un año fue de aproximadamente 74 kg N ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, cuando el cultivo de alfalfa había durado dos o tres años los rendimientos del maíz en monocultivo con elevadas dosis de N no habían igualado a los del maíz luego de la alfalfa. No obstante, las cantidades de N

proveniente de la alfalfa absorbida por el segundo cultivo de maíz luego de alfalfas de uno o dos años, fueron similares, aunque el *efecto rotación* fue mayor en el segundo caso. Por su parte, Shrader *et al.* (1966) informaron que la cantidad de N disponible para el segundo cultivo de maíz luego de cultivos de alfalfa de uno, dos o tres años, se incrementó con la duración de la alfalfa, aunque el N disponible para el primer cultivo de maíz fue considerada similar en todos los casos.

#### **1.4. Características del sudeste de la Provincia de Buenos Aires**

El sudeste de la provincia de Buenos Aires en la República Argentina (Sudeste Bonaerense) (Figura 1.1), comprende una superficie total de unos trece millones de ha. Los suelos pertenecen en su gran mayoría al orden de los molisoles variando desde haplustoles en el oeste hasta argiudoles y hapludoles en el este. El régimen de lluvias varía desde algo menos de 700 mm en el oeste, hasta alrededor de 1000 mm en el este. De la superficie total, algo menos de la mitad presenta condiciones que la hacen apta para la producción de cultivos agrícolas extensivos e intensivos y el resto tiene una aptitud predominantemente ganadera (ganadería extensiva) aunque con áreas de aptitud agrícola incluídas de diferente magnitud (Darwich *et al.*, 1985).

El sector con aptitud predominantemente agrícola comprende dos áreas agroecológicamente homogéneas, denominadas "zona mixta papera" y "zona mixta cerealera", y la zona central de una tercera, denominada "zona ganadera con tosca". A



**Figura 1.1. Ubicación geográfica del sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.**

pesar de que las condiciones edafoclimáticas permiten una agricultura de alta producción, el manejo tradicional de la producción se realizaba con combinación de actividades agrícolas con la producción extensiva de ganado vacuno para carne. Esto obligaba a que se alternaran ciclos bajo cultivos agrícolas con ciclos bajo pasturas cultivadas o, eventualmente, prados naturales, dentro de una rotación que, de esta forma, contribuía al mantenimiento de alta fertilidad y productividad de los suelos. Sin embargo, hace unos 20 años, la mayor rentabilidad de la agricultura frente a la ganadería, hizo que los productores se volcaran hacia un mayor uso agrícola del suelo (Darwich, 1991, Rearte, 1996), tendencia que aún subsiste. Si bien la relación de precios agricultura–ganadería ha vuelto a equilibrar la rentabilidad de ambas actividades, la tendencia hacia una "agriculturización" continúa posiblemente por la imposibilidad de los productores de reinvertir en el capital necesario para la ganadería

(animales, instalaciones, cercas, etc.), o bien, por la complicación que significa planificar y manejar una rotación incluyendo cultivos y los recursos forrajeros necesarios para los animales.

Esta tendencia hacia un mayor uso agrícola de los suelos se está viendo reflejada en cada vez más evidentes signos de degradación de las propiedades físicas y químico-bioquímicas del suelo (Echeverría y Ferrari, 1993). A pesar de que los suelos de la región presentan elevados contenidos originales de MO, las deficiencias de nutrientes tales como el N son, en la actualidad, muy frecuentes (Darwich, 1991) y ya se están informando deficiencias de otros nutrientes asociados a la dinámica de la MO del suelo (p.e. azufre (S)). Asimismo, una de las limitaciones más importantes de los suelos de la región son sus gradientes de pendiente, lo que, junto con las condiciones climáticas, los hace altamente susceptibles a la erosión hídrica (Costamagna *et al.*, 1984). El debilitamiento de los suelos junto con la mayor agresividad e intensidad de los laboreos que actualmente se emplean, han incrementado la superficie seriamente afectada por erosión hídrica (C.F.A., 1995). A pesar de que el empleo del laboreo conservacionista está siendo cada vez más frecuente (Echeverría *et al.*, 1994b), el sistema de labranzas más difundido es el convencional con utilización de arado de reja y vertedera o arado de cinceles.

El cultivo de trigo es el más importante en superficie y producción en la Provincia de Buenos Aires (Tabla 1.1, S.A.G.P.yA., 2005). Más de la mitad del trigo producido proviene del sudeste y sudoeste bonaerense, regiones en los que se producen los granos de mejor calidad (S.A.G.P.yA., 2005). En el sudeste bonaerense ocupa una superficie de aproximadamente 1.2 millones de ha, por lo que se constituye en el cultivo agrícola más importante de la región. Este cultivo se inserta en las rotaciones agrícolas en aproximadamente un 60% siguiendo a cultivos de verano (girasol, maíz,

patata o soja) y el resto, luego de cultivos invierno-primaverales (trigo, avena, cebada, lino) (Berardo, 1994). Los rendimientos de trigo de los campos de productores oscilan entre 3000 y 7000 kg ha<sup>-1</sup> dependiendo de la variedad, de la condición de suelo y de la aplicación de fertilizantes nitrogenados y fosforados. El trigo es uno de los cultivos más sensibles a los cambios asociados a las prácticas de manejo.

**Tabla 1.1. Evolución de la superficie sembrada y de la producción total de trigo, soja, maíz y girasol en la Provincia de Buenos Aires (Argentina) (S.A.G.P.yA., 2005).**

Año agrícola	Superficie sembrada				Producción total			
	Trigo	Soja	Maíz	Girasol	Trigo	Soja	Maíz	Girasol
	ha x 10 <sup>6</sup>				Mg x 10 <sup>6</sup>			
1995/96	3.15	1.38	1.01	1.67	6.42	2.61	4.91	3.50
1996/97	4.45	1.31	1.12	1.90	10.77	2.38	4.49	3.51
1997/98	3.66	1.47	1.50	1.79	10.66	2.53	8.22	3.32
1998/99	3.25	1.60	1.37	1.96	7.52	3.86	9.03	3.26
1999/00	3.69	1.73	1.11	2.37	8.75	4.58	5.70	3.77
2000/01	3.55	1.81	1.21	1.91	9.85	3.78	6.59	3.29
2001/02	3.57	2.41	1.10	0.96	8.65	5.73	5.53	1.46
2002/03	3.29	2.19	0.80	1.07	6.83	5.78	4.05	1.84
2003/04	3.17	2.48	0.76	1.10	9.03	7.14	4.27	1.62
2004/05	3.32	3.21	0.80	0.97	9.82	7.85	5.00	1.65

La situación planteada para el Sudeste Bonaerense hace necesario profundizar en la investigación que proporcione información para permitir la toma de decisiones de manejo tendientes a mantener y mejorar la productividad del suelo. Con ello se reducirán los riesgos de degradación del recurso natural y se podrá maximizar la producción de los cultivos, especialmente el de trigo, con el mínimo riesgo posible para el ambiente. Las rotaciones ya sea con pasturas o sólo de cultivos agrícolas se presentan como una de las herramientas más importantes para ello.

## **2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS GENERALES**

## **2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS GENERALES**

### **2.1. Hipótesis**

Para condiciones edafoclimáticas representativas del Sudeste Bonaerense (Argentina) (Anexos I y II) sobre suelos con escaso riesgo de erosión hídrica:

- La rotación de cultivos es una herramienta idónea para mantener la sostenibilidad agrícola aún con el empleo de LC.
- La inclusión de períodos bajo pasturas en una rotación permite recomponer las propiedades del suelo afectadas por la agricultura convencional.
- En rotaciones cultivos-pastura, es posible definir un período mínimo bajo pastura y uno máximo bajo agricultura convencional para mantener las propiedades del suelo dentro de límites de variación compatibles con la sostenibilidad del sistema.
- En los períodos bajo agricultura convencional, la variación del contenido de MO del suelo puede ser manejado mediante la elección de los cultivos a incluir en la rotación y la fertilización nitrogenada.
- La prolongación de los ciclos agrícolas producen una depresión en los rendimientos del cultivo de trigo asociada a los cambios en el contenido de MO y la capacidad del suelo de proveer N al cultivo.
- La variación de la disponibilidad de N para el trigo asociada a la agricultura convencional, puede ser manejada a través de la elección del cultivo que lo precede en la rotación.

## **2.2. Objetivos**

Para suelos representativos del área agrícola del Sudeste Bonaerense con bajo riesgo de erosión hídrica en Balcarce, Provincia de Buenos Aires (Argentina) (Figura 1.1):

- Evaluar los cambios en los contenidos de MO de la capa arable del suelo bajo condiciones de rotaciones de cultivos anuales con pasturas y de cultivos anuales solos.
- Evaluar los cambios de algunas propiedades del suelo, tales como fracciones lábiles de la MO y estabilidad de agregados, bajo condiciones de rotaciones de cultivos anuales con pasturas.
- Relacionar los cambios en la MO de la capa arable del suelo con las características intrínsecas y de manejo de los cultivos.
- Evaluar la variación de los rendimientos y de la acumulación de biomasa aérea y de nitrógeno total del cultivo de trigo en rotación con otros cultivos agrícolas y con pasturas.
- Relacionar la variación de los rendimientos de trigo con la variación de las propiedades de la capa arable del suelo y con las características de los cultivos antecesores en la rotación.



# **3. CAPÍTULO I**

### 3. CAPÍTULO I

#### **CROP-PASTURE ROTATION FOR SUSTAINING THE QUALITY AND PRODUCTIVITY OF A TYPIC ARGIUOLL**

**Guillermo A. Studdert\*, Hernán E. Echeverría, and Elda M. Casanovas**

Facultad de Ciencias Agrarias (U.N.M.P.)-Estación Experimental Agropecuaria Balcarce (I.N.T.A.), Unidad Integrada Balcarce, C.C. 276, (7620) Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

Received 12 Sept. 1996. \* Corresponding author (gastudde@mdp.edu.ar).

#### **3.1. ABSTRACT**

Inclusion of pastures in a rotation may reverse the effects of conventional cropping and tillage on soil degradation. We hypothesized that crop-pasture rotations could be defined with a minimum pasture component and a maximum conventional cropping component to accomplish sustainable management. Soil organic carbon (SOC), light fraction carbon (LFC), microbial biomass nitrogen (MBN), and aggregate stability index (ASI) were measured in the surface 0-0.15 m of a fine, mixed, thermic Typic Argiudoll with 2% slope under a long-term crop rotation experiment at Balcarce, Argentina. Treatments were continuous cropping and crop-pasture (50%-50% and 75%-25%) rotations. All seedbeds were prepared with conventional tillage. All soil quality indicators decreased with cropping and increased with pasture. Data for each variable were fitted to an exponential model to describe their variation in time. Soil organic C decreased  $4.4 \text{ g kg}^{-1}$  in 6 to 7 yr under cropping and rose to the original level ( $37.2 \text{ g kg}^{-1}$ ) after 3 to 4 yr under pasture. Light fraction C, MBN and ASI fell  $0.9 \text{ g kg}^{-1}$ ,  $39.0 \text{ mg kg}^{-1}$ , and  $43.9$ , respectively (97-100% of the estimated decline), after 7 yr under cropping, while they recovered to the values at the beginning of the cropping period ( $1.8 \text{ g kg}^{-1}$ ,  $99.5 \text{ mg kg}^{-1}$ , and  $76.7$ , respectively) in a few years under pasture.

Rotations including a maximum of 7 yr of conventional cropping alternated with a minimum of 3 yr of pasture would maintain soil properties within acceptable limits and meet the goals of sustainable agriculture under conditions similar to this experiment.

### **3.2. INTRODUCTION**

Sustainability of agricultural systems depends, to a great extent, on the maintenance of soil properties within levels of variation that would allow their restoration and would not affect either crop production or the environment. Feasibility of sustainable agriculture is based on the knowledge of the effect of management practices on soil properties and how they affect soil-crop relationships (Francis and Clegg, 1990) in order to make sound management decisions. Crop rotation is a key practice within agricultural systems since it affects soil productivity, crop behavior, and need for inputs, and is closely related to the economic sustainability of the system (Power and Follet, 1987; Francis and Clegg, 1990). However, long term conventional tillage-based cropping generally diminishes soil productivity.

Soil organic matter (SOM) varies due to the way different management practices alter mineralization-humification processes and to the influence they have on the amount of C returned to the soil (Stevenson, 1986; Oades, 1984). Cropping including conventional tillage (Lamb *et al.*, 1985; Havlin *et al.*, 1990), long and/or frequent fallow periods (Campbell and Zentner, 1993), or low-residue-return crop combinations (Havlin *et al.*, 1990; Peterson *et al.*, 1993; Campbell and Zentner, 1993) lead to a decrease in SOM. Changes in SOC dynamics as a response to management practices are associated with changes in the relative amount and in the activity of SOM fractions (Doran and Smith, 1987). Conventional cropping initially produces a more intense mineralization of labile fractions, leaving the more recalcitrant fractions as remnant. Microbial biomass N

and microbial biomass C (MBC) are very sensitive to changes in soil management and diminish with the years under cropping (Angers *et al.*, 1992; Dalal and Mayer, 1986c). The use of MBN and MBC as early indicators of management-induced changes in soil organic components has been frequently suggested (Angers *et al.*, 1992; Follet and Schimel, 1989). Likewise, variation in soil organic components is a determinant of soil physical condition (Doran and Smith, 1987). Conventional cultivation destroys macroaggregate structure and produces loss of structural stability due to the greater exposure of formerly protected SOM fractions (Tisdall and Oades, 1982) and the consequent loss of labile fractions (Cambardella and Elliott, 1993; Golchin *et al.*, 1994) which are responsible for binding microaggregates into macroaggregates (Tisdall and Oades, 1982; Cambardella and Elliott, 1994).

Inclusion of pastures in the rotation restores soil properties affected by cropping (Campbell, 1978; Haynes *et al.*, 1991). Pastures produce an increase in soil organic components because a greater production of aboveground and root biomass (Tisdall and Oades, 1982; Haynes *et al.*, 1991). Pasture root systems, especially those of grasses, play a key role in this recovery since they provide excellent distribution and mixing of large quantities of organic materials into the soil (Oades, 1984). Continuous growth and death of dense root systems is associated with increases in microbial biomass, intense production of binding agents (Tisdall and Oades, 1982; Haynes and Francis, 1993; Haynes *et al.*, 1991), and greater proportions of labile SOM fractions (Cambardella and Elliott, 1992). In addition, absence of soil disturbance under pasture not only facilitates soil physical and biochemical environment improvement, but also stimulates recovery of soil fauna (Oades, 1984).

Management of production systems in the southeastern Buenos Aires Province (Argentina) traditionally comprised alternation of no more than 4 yr periods of

conventional cash crop production with 3 to 5 yr periods under pasture for extensive livestock raising. This management contributed to maintaining agricultural soil physical and chemical properties almost unaltered and, consequently, to conserving high fertility and productivity. In the last two decades, however, greater profitability of cash crops made the producers switch to a more intense cropping without rotating with pastures (Darwich, 1991). Soil physical and chemical-biochemical properties are being degraded (Echeverría and Ferrari, 1993) and soil erosion and nutrient deficiency problems are becoming more frequent. This process of deterioration is worsened by the fact that conservation tillage systems have not been completely adopted by producers.

We propose that it is feasible to define crop-pasture rotations with a maximum and a minimum duration of the periods under conventional cropping and under pasture, respectively, to keep the variation of some soil properties within limits of change that would contribute to accomplish sustainable management in the area mentioned above. To demonstrate this hypothesis SOC, LFC, MBN, and ASI changes in a long term crop-pasture rotation experiment conducted on a Typic Argiudoll at Balcarce, Buenos Aires Province, Argentina, were analyzed.

### **3.3. MATERIALS AND METHODS**

A long-term crop rotation experiment has been conducted since 1976 at Balcarce, Argentina (37° 45' S, 58° 18' W, 138 m over sea level, 870 mm mean annual rainfall, 13.7 C° mean annual temperature) on a fine, mixed, thermic Typic Argiudoll with 2% slope (no erosion). Before the beginning of the experiment, this field had been under pasture for several years. The surface horizon of this soil has a pH of 6, loamy texture, 33.1 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> cation-exchange capacity, and 5.0 mg kg<sup>-1</sup> Bray and Kurtz P. The experiment was carried out as a randomized complete block design with a split plot

treatment arrangement, three replicates, and 10 by 35 m experimental units. Treatments assigned to main plots were referred to as rotations and comprised continuous cropping (Rotations 5 and 6) and crop sequences alternated with pastures (Fig. 3.1). Crop-pasture rotations included combinations of approximately 50:50 (Rotations 2 and 7) and 75:25 (Rotations 1, 3, and 4) ratios of time under cropping and time under pasture. Pastures lasted 2 yr (Rotations 1, 4, and 7) and 4 or 5 yr (Rotations 3 and 2, respectively). Crops included were spring wheat (*Triticum aestivum* L.), potato (*Solanum tuberosum* L.), corn (*Zea mays* L.), sunflower (*Helianthus annuus* L.), oat (*Avena sativa* L.), and oat + hairy vetch (*Vicia villosa* L.) as green manure. Pastures included grasses and legumes usually employed in the area (orchard grass [*Dactylis glomerata* L.], bulbous canarygrass [*Phalaris tuberosa* L.], tall fescue [*Festuca arundinacea* Schreb.], perennial ryegrass [*Lolium perenne* L.], white clover [*Trifolium repens* L.], red clover [*Trifolium pratense* L.], and alfalfa [*Medicago sativa* L.]) at recommended rates, with predominance of grasses. Pastures were not grazed but were periodically cut and the material removed to simulate grazing. Seedbeds for either agricultural crops or pastures were conventionally prepared (moldboard plowing, disking, and harrowing). Tillage operations were started no less than 3 mo before planting date of each crop. Nitrogen fertilization levels (0 and 90 kg N ha<sup>-1</sup>) were assigned to subplots. Either crops or pastures were fertilized at planting with superphosphate according to soil analysis.

Rotation	Year																						
	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93					
1			P	C	W	O	S	W	O	S			P	W	C	S	W	C	S	W			
2					P	C	W	O	S					P	W	C	S	W	C	S	W		
3	W	O	S		P	C	W	O	S				P	W		P	W	C	S	W	S		
4	W	O	S			P	C	W	O	S	W	O	S	W		P	W	C	S	W	C		
5	P	W	O	P	W	O	P	W	O	P	W	O	P	W	O	P	W	O	P	W	O	P	W
6	P	W	Ov	P	W	Ov	P	W	Ov	P	W	Ov	P	W	Ov	P	W	Ov	P	W	Ov	P	W
7			P	W	O	P	W				P	W	O	P	W			P	W	O	P	W	

■ Pasture C: corn; P: potato; W: wheat; S: sunflower; O: oats; Ov: oats + hairy vetch; ORc: oats + red clover

**Figure 3.1. Crop rotation scheme applied since the beginning of the experiment.**

Soil samples were taken from experimental units in fall (March-April) every year between 1981 and 1993. Between 1981 and 1989 samples were taken only from non-N-fertilized subplots. Samples were taken from the surface layer (0-0.15-m depth) and composed of 15 to 20 subsamples. Samples for biochemical analyses were air dried, ground to pass a 2.0-mm-opening sieve, and stored until analysis. Samples for aggregate stability determination were taken only from non-N-fertilized subplots in 1982 through 1986, 1988, 1989, and 1992. Samples were hand disrupted, passed through an 8.0-mm-opening sieve, air dried and stored until analysis.

Soil organic carbon was determined on all samples, reground to pass a 0.5-mm-opening sieve, by the Walkley-Black procedure (Nelson and Sommers, 1982).

To determine a labile organic fraction, the densimetric fractionation method proposed by Richter *et al.* (1975) was used. Soil samples were reground to pass a 0.18-mm-opening sieve and suspended in a bromoform-ethanol solution adjusted to density  $2.0 \text{ Mg m}^{-3}$ , to separate the light fraction. The suspension was centrifuged at  $4300 \times g$  for 120 s. The supernatant was filtered through fiber glass filter paper (Whatman GFA) and analyzed for LFC as described before for SOC.

The chloroform fumigation-extraction method (Brookes *et al.*, 1985) was used to determine MBN. Since samples had been stored air-dry, prior to fumigation they were preincubated for 72 h at field capacity and  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Two subsamples of each sample were weighed; one of them was chloroform fumigated for 24 h, then extracted with  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . The extract was digested with  $\text{H}_2\text{SO}_4$  and analyzed for mineral N through microdistillation (Bremner, 1965). The other subsample was not fumigated and extraction and analysis for mineral N was done as described before. Microbial biomass N ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) was calculated as follows:

$$\text{MBN} = F - T / 0.47$$

where  $F$  is mineral N content ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) of fumigated subsamples after fumigation,  $T$  is mineral N content ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) of nonfumigated sub-amples, and 0.47 is the approximate proportion of the MBN that is recovered by this method (Ferrari *et al.*, 1992).

Light-fraction C and MBN were determined on soil samples from non-N-fertilized experimental units corresponding to Rotations 2, 3, and 5 (Fig. 3.1) in 1983, 1985, 1987, 1989, and 1991. Because of the lack of enough stored soil to run the analyses, there were some missing results of these two variables.

Aggregate stability was determined as the difference of mean weight diameter (MWD) between dry sieving and wet sieving in water (De Boodt *et al.*, 1961). Air-dry samples were sieved through a three-sieve nest (4.80-, 3.36- and 2.00-mm-opening sieves). A proportion of each dry fraction obtained was wetted and sieved under water through a six-sieve nest (4.80-, 3.36-, 2.00-, 0.84-, 0.50- and 0.30-mm-opening sieves) for 30 min. Results were expressed as ASI which was calculated as follows:

$$\text{ASI} = (0.26 / P)100$$

where 0.26 is the average of MWD difference of samples taken from similar soils not disturbed by tillage; and  $P$  is MWD difference between dry and wet sieving of samples taken from the experimental units.

The model proposed by Bartholomew and Kirkham (1960) was used to describe the relationship between the results obtained of each variable, and either years under cropping or years under pasture:

$$V_t = V_e - (V_e - V_o) * \exp(-r t) \quad [1]$$

where  $V_t$  is the value of the variable under analysis (SOC [ $\text{g kg}^{-1}$ ], LFC [ $\text{g kg}^{-1}$ ], MBN [ $\text{mg kg}^{-1}$ ], ASI [unitless]) at time  $t$ ;  $V_e$  is the value of the variable at equilibrium;  $V_o$  is the initial value of the variable;  $r$  is the exponential rate of variation ( $\text{yr}^{-1}$ ); and  $t$  is time under cropping or under pasture (yr). To fit the model depicted by Eq. [1] to the



dependent variables under cropping, data from crop-pasture rotations and from continuous cropping rotations were pooled. The half-life ( $t_{1/2}$ ) of each variable was calculated as  $t_{1/2} = 0.693r^{-1}$ . The values of  $t_{1/2}$  represent the estimated elapsed time between the beginning of cropping or pasture period and the decrease or increase to half of the total estimated variation. Soil organic C data from Rotations 1, 4, and 7 (short-term pastures before cropping, Fig. 3.1), were fitted to Eq. [1] separately from data from Rotations 2 and 3 (long-term pastures before cropping, Fig. 3.1) as a function of years under cropping.

For the analyses of variance, years were included as an independent variable, so that they were carried on as if treatment arrangement had been in sub-subplots (Little and Hills, 1978). Statistical analysis and curve fitting were performed with the GLM and NLIN (DUD method) procedures of the Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 1985), respectively.

### 3.4. RESULTS AND DISCUSSION

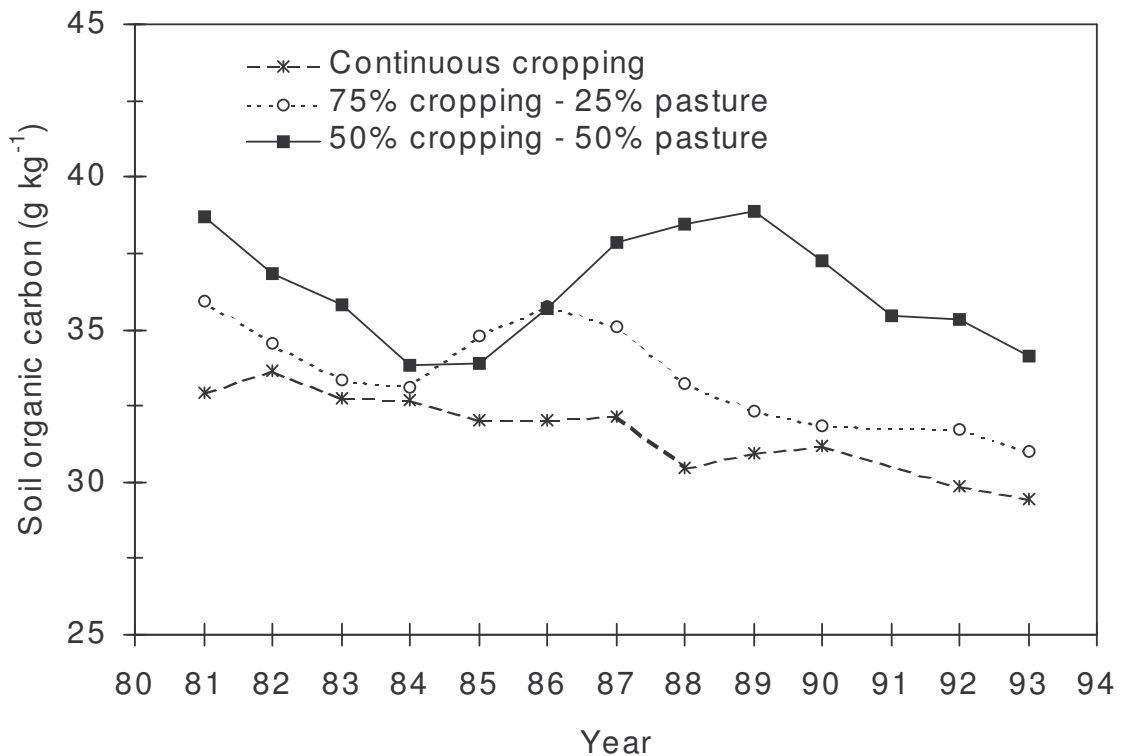
Year x rotation interaction was highly significant ( $P < 0.01$ ; Table 3.1) for all the variables analyzed. This indicates that the stated rotations produced differential changes with time of the analyzed dependent variables. During periods under pasture, the levels of SOC, LFC, MBN, and ASI increased, whereas during periods under cropping they decreased. As an example of the effect of cropping and pasture periods, changes in SOC along time for Rotations 1, 2 and 5 (Fig. 3.1) are shown in Fig. 3.2. Continuous cropping (Rotation 5) produced a continuous decrease in SOC. On the other hand, periods under pasture after periods under cropping (Rotations 1 and 2) reversed the fall in SOC produced by conventional cropping. Similar results had already been

reported by other researchers (Greenland, 1981; Tisdall and Oades, 1982; Díaz Rosello, 1992; Angers *et al.*, 1992; Haynes *et al.*, 1991).

**Table 3.1. Results of the analysis of variance for four soil variables in a crop-pasture rotation experiment at Balcarce, Argentina.**

Source of variation	Soil Organic Carbon (g kg <sup>-1</sup> )						Light-fraction C (g kg <sup>-1</sup> )			Microbial biomass N (g kg <sup>-1</sup> )			Aggregate stability index		
	1981 - 1989			1990 - 1993											
	df	MS	P	df	MS	P	df	MS	P	df	MS	P	df	MS	P
Block (B)	2	34.1	<0.01	2	46.40	<0.1	2	0.60	<0.01	2	613.4	0.02	2	88.8	0.37
Rotation (R)	6	63.20	<0.01	6	32.40	0.10	2	0.20	0.07	2	1228.8	0.02	6	3287.3	<0.01
Error a (B x R)	12	11.30	-	12	13.90	-	4	0.03	-	4	99.4	-	12	85.3	-
N fertilization (F)	-	-	-	1	0.03	0.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R*F	-	-	-	6	2.20	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Error b (B x R x F)	-	-	-	14	4.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Year (Y)	8	12.40	<0.01	3	144.50	<0.01	4	0.10	0.36	4	605.7	<0.01	7	2632.2	<0.01
R x Y	48	5.70	<0.01	18	9.90	<0.01	8	0.33	<0.01	7	1224.9	<0.01	42	842.2	<0.01
F x Y	-	-	-	3	0.20	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R x F x Y	-	-	-	18	1.50	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Experimental error	112	2.30	-	82	1.30	-	23	0.10	-	16	116.3	-	98	88.9	-
CV		4.43			3.48			25.03			14.99			21.19	
n		189			168			44			36			168	
SE		0.11			0.09			0.05			1.80			0.73	

Nitrogen fertilization did not significantly affect ( $P > 0.05$ ) SOC (Table 3.1), neither by interacting with rotation and/or year nor by itself. These results do not agree with those reported by other researchers (Doran and Smith, 1987; Havlin *et al.*, 1990; Campbell and Zentner, 1993; Robinson *et al.*, 1996) with regard to either increases of SOC or decreases of its rate of decline, due to the greater amounts of C returned to the soil associated with N fertilization. For model-fitting purposes, SOC of fertilized and nonfertilized sub plots were averaged.



**Figure 3.2. Soil organic C between 1981 and 1993 for continuous cropping, 75% cropping - 25% pasture (period under pasture 1984-1986), and 50% cropping - 50% pasture (period under pasture 1984-1989).**

### 3.4.1. Soil Organic Carbon

It can be seen in Table 3.2 that the values of  $V_o$  and  $r$  for the case of cropping after a longer term pasture were higher than when cropping after a short-term pasture (Fig. 3.3a). Including short-term pastures in the rotation meant shorter periods of recovery of SOC and, consequently, SOC at the beginning of the cropping period was lower (Fig. 3.2). This confirms that it was adequate to fit SOC observed data according to the duration of the previous period under pasture. However,  $V_e$  was high (29.3 g kg<sup>-1</sup>, Table 3.2) and the same for both cases of cropping after pasture. Likewise, total

**Table 3.2. Results of fitting the Bartholomew and Kirkham (1960) model to soil organic carbon (SOC), light-fraction carbon (LFC), microbial biomass nitrogen (MBN), and aggregate stability index (ASI) as a function of time under cropping or pasture.**

Dependent Variable†	Model parameters‡			R <sup>2</sup>	t <sub>1/2</sub> §
	V <sub>e</sub>	V <sub>o</sub>	r		
			yr <sup>-1</sup>		yr
			Cropping		
SOC <sub>L</sub> ¶, g kg <sup>-1</sup>	29.29	37.18	0.117	0.76	5.92
SOC <sub>S</sub> #, g kg <sup>-1</sup>	29.29	34.45	0.068	0.44	10.19
LFC, g kg <sup>-1</sup>	0.88	1.76	0.609	0.77	1.14
MBN, mg kg <sup>-1</sup>	60.50	99.50	1.010	0.80	0.69
ASI	32.81	76.67	0.973	0.72	0.71
			Pasture		
SOC, g kg <sup>-1</sup>	39.62	29.47	0.418	0.90	1.66
LFC, g kg <sup>-1</sup>	1.69	0.74	0.600	0.56	1.16
MBN, mg kg <sup>-1</sup>	99.00	50.00	0.790	0.41	0.88
ASI	93.53	27.93	0.661	0.76	1.05

† Units apply only to the values of V<sub>e</sub> and V<sub>o</sub>.

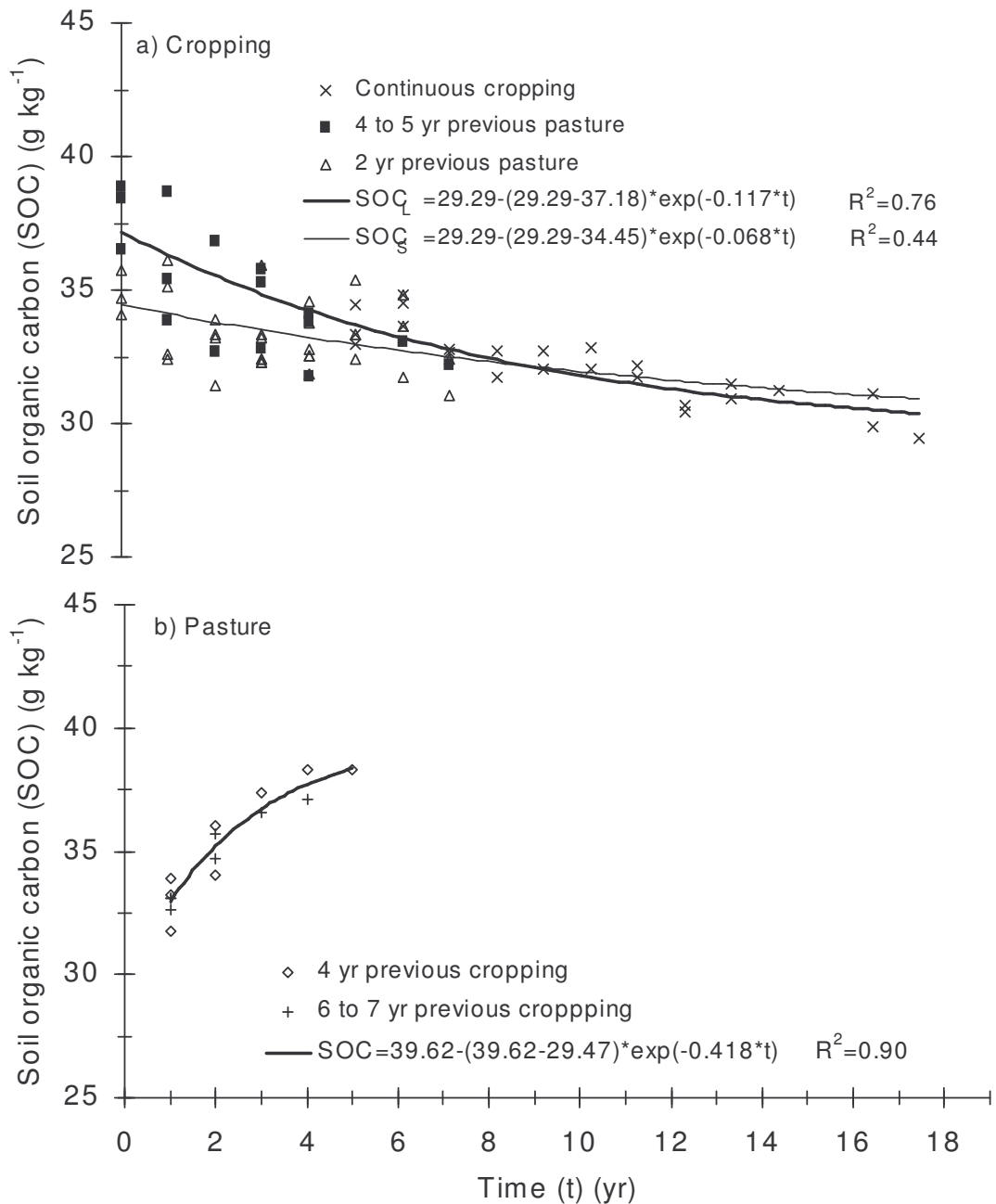
‡ V<sub>e</sub>: value of the variable at equilibrium; V<sub>o</sub>: initial value of the variable; r: exponential rate of variation.

§ t<sub>1/2</sub>: half-life

¶ SOC<sub>L</sub>: soil organic C under agriculture following a 4- to 5-yr pasture

# SOC<sub>S</sub>: soil organic C under agriculture following a 2-yr pasture

estimated variations of SOC ( $V_o - V_e = 7.9$  and  $5.2$  g kg<sup>-1</sup> for previous long- and short-term pasture, respectively, Table 3.2) were small. These values indicate that the soil under study contains a highly stable organic fraction that shows small variation even under continuous conventional tillage for long periods. This is due to the great proportion of highly protected mineral-associated humic substances that forms the SOM of these soils. These results contrast with those obtained with other soils in which equilibrium values were lower, and SOM content decreases due to conventional cropping were more drastic (Lamb *et al.*, 1985; Dalal and Mayer, 1986a).



**Figure 3.3. Soil organic C as a function of years under cropping and years under pasture. Curves result from fitting observed data to a model proposed by Bartholomew and Kirkham (1960).  $SOC_L$  = estimated soil organic C after a long-term pasture;  $SOC_S$  = estimated soil organic C after a short-term pasture.**

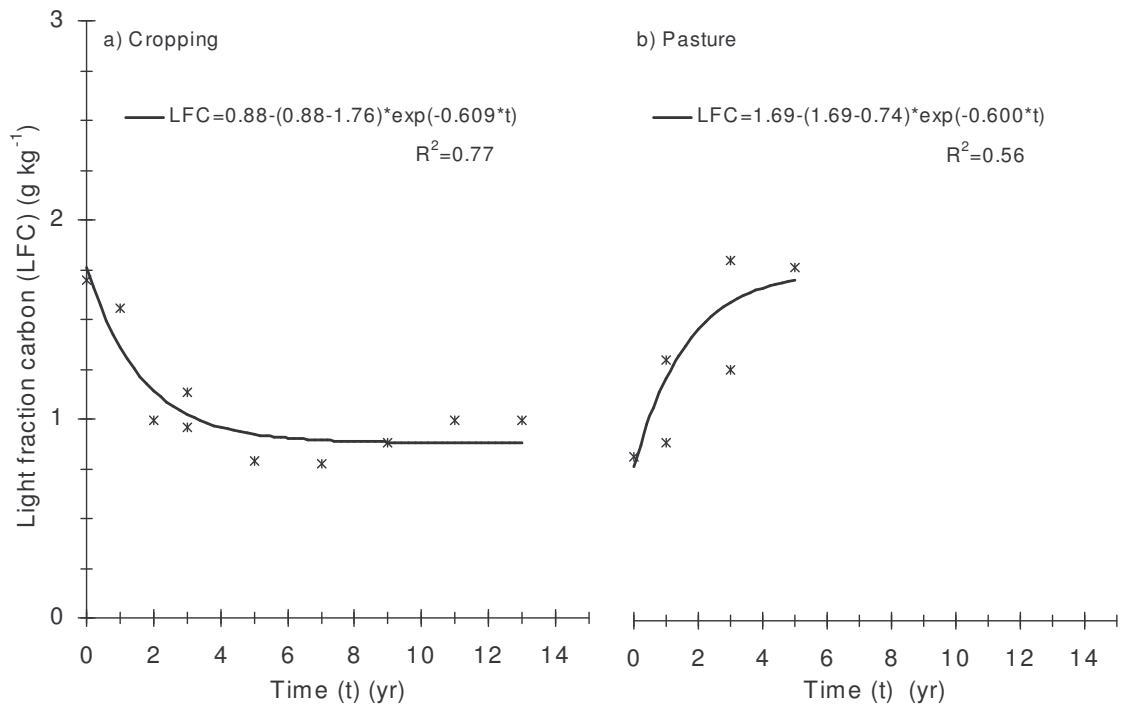
Figure 3.3b shows observed and fitted values of SOC during periods under pasture. The fast recovery of SOC after pasture establishment was defined by a high  $r$  (Table 3.2). This agrees with expected results since morphological characteristics of the species in the pasture mix (especially grasses) make them return great amounts of

aboveground and root biomass residues with a very uniform and complete distribution in the soil (Oades, 1984). It can also be seen in Table 3.2 that the  $V_o$  corresponding to the period under pasture and the  $V_e$  corresponding to the period under cropping are very close. This suggests that the model proposed by Bartholomew and Kirkham (1960) (Eq. [1]) was adequate to describe the variation of SOC under two contrasting managements.

### **3.4.2. Light-Fraction Carbon and Nitrogen in the Microbial Biomass**

The trend of change of LFC and MBN as a function of years under cropping and pasture were very similar. Therefore, only the variation of LFC with time is shown (Fig. 3.4). An abrupt fall in LFC in the first years under cropping can be seen (Fig. 3.4a). Light-fraction C became asymptotic to  $V_e$  after 6 to 7 yr under conventional cropping. In an analogous manner, there was a rapid recovery of this organic fraction after pasture establishment (Fig. 3.4b) reaching values close to  $V_e$  in 3 to 5 yr under pasture. Values of  $r$  for both variables were higher than those reported for SOC (Table 3.2). Consequently,  $t_{1/2}$  values (Table 3.2) were much lower and similar between variables when comparing the period under pasture with the period under cropping.

These variables are much more sensitive than SOC to system management changes and are early indicators of the variations in organic fraction contents provoked by such changes (Richter *et al.*, 1975; Dalal and Mayer, 1986b,c; Angers *et al.*, 1992; Wander *et al.*, 1994; Bremer *et al.*, 1994). Microbial biomass N represents only 2 to 10% of soil N (Vong *et al.*, 1990), but its turnover is approximately fivefold faster than that of other soil organic N fractions (Marumoto *et al.*, 1982) and accounts for a large portion of available N in soil (Power, 1994). Something similar occurs with other labile organic fractions (Doran and Smith, 1987) such as LFC (Cambardella and Elliott, 1992,



**Figure 3.4. Light-fraction C as a function of years under cropping and years under pasture. Curves result from fitting observed data to a model proposed by Bartholomew and Kirkham (1960).**

1994; Janzen, 1987; Janzen *et al.*, 1992; Dalal and Mayer, 1986b; Bremer *et al.*, 1994).

The fall in MBN and LFC during the period under cropping means decreasing N supply to crops and a consequent increase of N fertilizer need (Doran and Smith, 1987; Power, 1994).

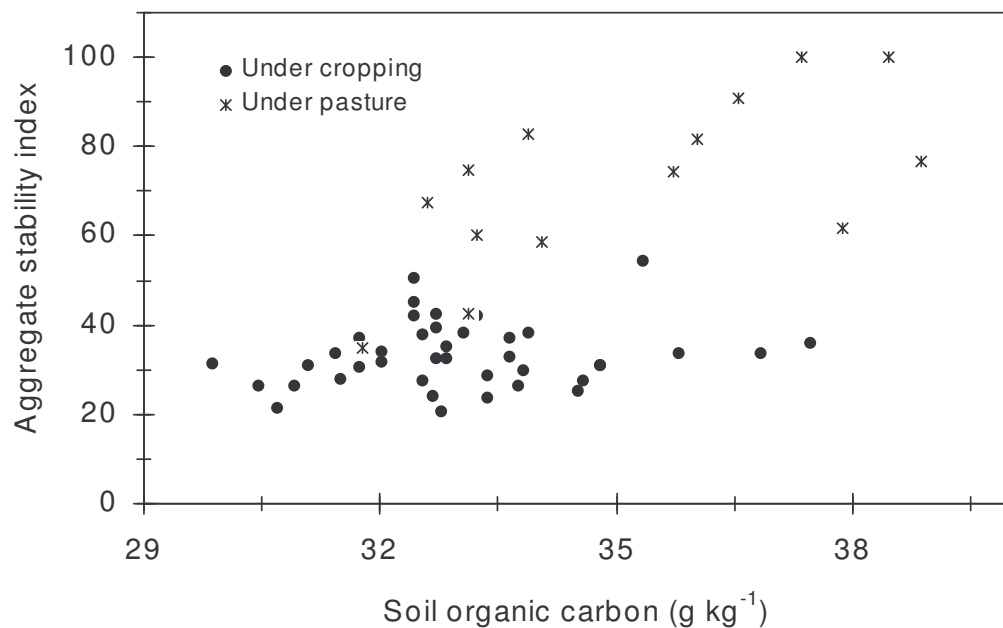
### 3.4.3. Aggregate stability index

The behavior of this variable as a function of years under cropping and pasture was almost the same as that reported for LFC and MBN, and the corresponding values of  $r$  and  $t_{1/2}$  were quite similar (Table 3.2). This indicates a close relationship between the labile organic fraction content in soil and its aggregate stability (Cambardella and Elliott, 1993, 1994; Golchin *et al.*, 1994, 1995).

Figure 3.5 shows the relationship between SOC and ASI. It can be seen that ASI values under cropping kept relatively constant over all the explored range of SOC (29.6 to  $37.7 \text{ g kg}^{-1}$ ). On the other hand, ASI increased with increases in SOC ( $r = 0.64$ ,  $P <$

*Publicado en Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1466-1472 (1997) (ISSN: 0361-5995)*

0.01) when periods under pasture were analyzed (Fig. 3.5). These results agree with the fact that aggregate stability and SOC are closely related (Greenland, 1981; Oades, 1984). However, it appears that SOC was not enough by itself to explain ASI variations



**Figure 3.5. Relationship between aggregate stability index and soil organic C.**

because ASI values were different at the same SOC under cropping or under pasture, respectively.

Labile SOM fractions content and dynamics are more closely related to aggregate stability than SOC (Cambardella and Elliott, 1993; Golchin *et al.*, 1994). Only for a few situations were the values of LFC and ASI available for the same treatment factor combination and sampling time. However, there exists some evidence of a relationship between both variables during the period under pasture. Across part of the explored range of LFC under cropping (0.88 to 1.15 g kg<sup>-1</sup>), ASI values ranged between 35.0 and 21.0, and averaged  $30.0 \pm 6.2$ , which is similar to  $V_e$  and  $V_o$  of the situation under cropping and pasture, respectively (Table 3.2). On the other hand, an increase of 57.0



in ASI (43.0 to 100.0) under pasture corresponded to an increase of  $0.47 \text{ g kg}^{-1}$  in LFC (1.26 to  $1.73 \text{ g kg}^{-1}$ ). These results seem to confirm that the relationship between the organic fraction of soil and aggregate stability was different according to whether the system was under pasture or conventional cropping.

Frequent soil tillage and seasonal growth of crops under cropping contrasts with the continuous pasture growth (aboveground and root biomass) without tillage for relatively long periods. The latter favors an abundant and uniform addition of SOC- and LFC-forming materials (Oades, 1984; Haynes and Francis, 1993) that, through the action of an increased microbial biomass, contribute to form larger and more stable aggregates (Haynes and Francis, 1993). Likewise, root system growth of pasture, especially if the pasture is dominated by grasses, facilitates soil particle aggregation and strengthens the resulting aggregates (Oades, 1984).

### 3.5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Whatever the duration of the previous period under conventional cropping, either 4 or 7 yr, 3 to 4 yr under pasture made SOC rise up to  $36.7$  and  $37.7 \text{ g kg}^{-1}$  (Fig. 3.3b, Eq. [1], Table 3.2), respectively. These levels of SOC are very close to  $V_o$  corresponding to cropping after a 4- to 5-yr pasture ( $37.2 \text{ g kg}^{-1}$ , Table 3.2). Likewise, the fitted model (Eq. [1], Table 3.2) also shows that such periods under pasture made LFC, MBN and ASI rise up to 91 to 95% (3-yr pasture) and to 95 to 98% (4-yr pasture) of the corresponding values of  $V_o$ . Thus, for conditions similar to those of this experiment, 3 to 4 yr of pasture allow a rapid and complete restoration of soil properties altered during the period under conventional cropping.

On the other hand, 6 to 7 yr under conventional cropping made LFC, MBN and ASI decrease to levels that represent 97 to 100% of the maximum estimated variation

( $V_o - V_{er}$ , Table 3.2). Considering that LFC and MBN are the most active pools of organic N and that these fractions are responsible of most of the short term N turnover, the decrease of their content with the years of conventional cropping would make necessary a progressive increase in N fertilizer rates to maintain crop yield levels. Likewise, even though it has not been demonstrated that decreases in ASI affected crop behavior, the risk of degradation of soil physical properties is greater as aggregate stability diminishes. Conversely, 7 yr of conventional cropping following 4 to 5 yr pastures made SOC fall as much as  $4.4 \text{ g kg}^{-1}$  (Fig. 3.3a, Eq. [1]) which is approximately 50% of the total estimated variation ( $V_o - V_e$ ,  $7.9 \text{ g kg}^{-1}$ , Table 3.2).

A rational crop-pasture rotation should be an operative and economically feasible one, and, besides, should not produce such a variation in soil properties that compromise system sustainability. It has been shown that periods of 6 to 7 yr of conventional cropping were associated with the maximum estimated variation of LFC, MBN, and ASI, and to decreases of no more than 50% of total estimated variation of SOC. This allowed a recovery of such soil properties during 3 to 4 yr of pasture. Longer periods of conventional cropping would not affect SOC since even its  $V_e$  is high (Table 3.2), but such durations of conventional cropping would increase the risks linked to N fertilizer utilization and to structure weakening.

For the conditions of this experiment, a rotation including a maximum of 7 yr of conventional cropping followed by a minimum of 3 yr under pasture produces a decrease with later recovery of SOM labile fractions and of ASI, making them vary between the maximum and minimum limits estimated by the model. The above proposed rotation is a feasible one for the area within which this study was carried out, and would allow the reduction of external inputs, contributing to the goal of a more sustainable agroecosystem.

### 3.6. ACKNOWLEDGEMENTS

This study was made possible thanks to the long-term crop-pasture rotation experiment at Balcarce, Argentina, conducted since 1976 in the Unidad Integrada Balcarce (UIB) with financial support of the Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. We want to express our gratitude to the scientists who have been in charge of the experiment during different periods, to the field personnel who have helped with most of the field work, and to the personnel of the Soil, Plant, and Water Analysis Laboratory of the UIB who ran a great part of all soil analyses. We also want to express our appreciation to Dr. John W. Doran for his valuable suggestions to improve the abstract of this paper.

### 3.7. REFERENCES

- Angers, D.A., A. Pessant, and J. Vigneux. 1992. Early cropping-induced changes in soil aggregation, organic matter and microbial biomass. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:115-119.
- Bartholomew, W.V. and D. Kirkham. 1960. Mathematical descriptions and interpretations of culture induced soil nitrogen changes. p. 471-477. *In Soil Biology. Trans. 7<sup>th</sup> Int. Congr. Soil Sci. Vol. II Comm. III, Int. Soc. Soil Sci.*, Madison, WI, 1960.
- Bremer, E.; H.H. Janzen, and A.M. Johnston. 1994. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practice in a Lethbridge soil. *Can. J. Soil Sci.*, 74:131-138.

- 
- Bremner, J.N. 1965. Inorganic forms of nitrogen. p. 1179-1237. *In* C.A. Black (ed.) Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agron. Monogr. 9. ASA, Madison, WI.
- Brookes, P.C., A. Landman, G. Pruden and D.S. Jenkinson. 1985. Chloroform fumigation and release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil. Biol. Biochem.*, 17:837-842.
- Cambardella, C.A. and E.T. Elliott. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:777-783
- Cambardella, C.A. and E.T. Elliott. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1071-1076.
- Cambardella, C.A. and E.T. Elliott. 1994. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:123-130.
- Campbell, C.A. 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. p. 173-271. *In* M. Schnitzer and S.U. Khan (ed.) Soil organic matter. Developments in Soil Science 8. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, Netherlands.
- Campbell, C.A. and R.P. Zentner. 1993. Soil organic matter as influenced by crop rotations and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1034-1040.
- Dalal, R.C. and R.J. Mayer. 1986a. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland: I. Total organic carbon and rate of loss from the soil profile. *Aust. J. Soil Res.*, 24:281-282.
- Dalal, R.C. and R.J. Mayer. 1986b. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland: III. Loss of organic carbon from different density fractions. *Aust. J. Soil Res.*, 24:301-309.

- Dalal, R.C. and R.J. Mayer. 1986c. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland: IV. Dynamics of nitrogen mineralization potential and microbial biomass. *Aust. J. Soil Res.*, 24:461-472.
- Darwich, N. A. 1991. Estado actual y manejo de los recursos naturales en la región pampeana húmeda sur. p. 51-62. *In* Seminario Juicio a Nuestra Agricultura. Hacia el desarrollo de una agricultura sostenible. Actas Seminario Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina, 14-15 Nov. 1991. Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.
- De Boodt, N., L. De Leenher, and D. Kirkham. 1961. Soil aggregate stability indexes and crop yields. *Soil Sci.*, 91:138-146.
- Díaz Rosello, R. 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agropecuarias*, 10(1):103-110
- Doran, J.W. and M.S. Smith. 1987. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients. p. 53-72. *In* R.F. Follet *et al.* (ed.). Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. SSSA Spec. Publ. 19. SSSA, Madison, WI.
- Echeverría, H.E. and J.L. Ferrari. 1993. Relevamiento de algunas características de los suelos agrícolas del sudeste bonaerense. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce, Boletín técnico 112
- Ferrari, J.L., R. Bergonzi, H.E. Echeverría, and C.A. Navarro. 1992. Comparación de técnicas de determinación de nitrógeno en la biomasa microbiana de los suelos del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 10-11:94-97.
- Follet, R.F. and D.S. Schimel. 1989. Effect of tillage practices on microbial biomass dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 1091-1096

- Francis, C.A. and M.D. Clegg. 1990. Crop rotations in sustainable production systems. p. 107-122. *In* C.A. Edwards *et al.* (ed.). Sustainable Agricultural Systems. Soil and Water Conservation Soc., Ankeny, IA
- Golchin, A., J.M. Oades, J.O. Skjemstad, and P. Clarke. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.*, 32:1043-1068.
- Golchin, A., P. Clarke, J.M. Oades, and J.O. Skjemstad. 1995. The effects of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 33:975-993.
- Greenland, D.J. 1981. Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.*, 32:301-322
- Havlin, J.L., D.E. Kissel, L.D. Maddux, M.M. Claassen, and J.H. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:448-452.
- Haynes, R.J. and G.S. Francis. 1993. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *J. Soil Sci.*, 44:665-675.
- Haynes, R.J., R.S. Swift, and R.C. Stephen. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil Tillage Res.*, 19:77-87.
- Janzen, H.H. 1987. Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations. *Can. J. Soil Sci.*, 67:845-856.
- Janzen, H.H., C.A. Campbell, S.A. Brandt, G.P. Lafond, and L. Townley-Smith. 1992. Light fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1799-1806.

- Lamb, J.A., G.A. Peterson, and C.R. Cole. 1985. Wheat fallow tillage systems' effects on a newly cultivated grassland soils' nitrogen budget. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:352-356.
- Little, T.M. and F.J. Hills . 1978. *Agricultural experimentation. Design and analysis.* John Wiley and Sons, New York, NY.
- Marumoto, T., J.P.E. Anderson, and K.H. Domsch. 1982. Mineralization of nutrients from soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 14:475-496.
- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 539-579. *In* A.L. Page *et al.* (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2.* 2<sup>nd</sup> Ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Oades, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76:319-337.
- Peterson, G.A., D.G. Westfall and C.V. Cole. 1993. Agroecosystem approach to soil and crop management research. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1354-1360.
- Power, J.F. 1994. Understanding the nutrient cycling process. *J. Soil Water Conserv.*, Supplement to 49(2):16-23.
- Power, J.F. and R.F. Follet. 1987. Monoculture. *Sci. Am.* 256 (3):56-64.
- Richter, M., I. Mizuno, S. Aranguez, and S. Uriarte. 1975. Densimetric fractionation of soil organo-mineral complexes. *J. Soil Sci.*, 26:113-123.
- Robinson, C. A., R.M. Cruse, and M. Ghaffarzadeh. 1996. Cropping system and nitrogen effects on Mollisol organic carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:264-269.
- SAS Institute Inc. 1985. *SAS. User's guide. Statistics version.* 5<sup>th</sup> edition. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Stevenson, F.J. 1986. *Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur and micronutrients.* John Wiley and Sons, New York, NY.

Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33:141-163.

Vong, P.C., I. Kabibou, and F.A. Jacquin. 1990. Etudes des correlations entre biomasse microbienne et diferentes fractions d'azote organique presentes dans deux sols lorrains. *Soil Biol. Biochem.* 22:385-392.

Wander, M.M., S.J. Traina, B.R. Stinner, and S.E. Peters. 1994. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1130-1139.



# **4. CAPÍTULO II**

## 4. CAPÍTULO II

### **CROP ROTATIONS AND NITROGEN FERTILIZATION TO MANAGE SOIL ORGANIC CARBON DYNAMICS**

**Guillermo A. Studdert\* and Hernán E. Echeverría**

Facultad de Ciencias Agrarias (U.N.M.P.)-Estación Experimental Agropecuaria Balcarce (I.N.T.A.), Unidad Integrada Balcarce, C.C. 276, (7620) Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

Received 17 Aug. 1998. \* Corresponding author (gastudde@mdp.edu.ar).

#### 4.1. ABSTRACT

Sustainability is influenced in many production systems by the variation of soil organic C (SOC) content and dynamics, and crop rotations. We hypothesized that arable layer SOC under conventional tillage, can be managed through the amount of residue C (RC) returned to the soil as affected by tillage and fertilization. Soil organic carbon dynamics of a complex of Typic Argiudoll and Petrocalcic Paleudoll soils under conventional tillage between 1984 and 1995 at Balcarce, Argentina, was studied for 16 crop sequences. Crops included were spring wheat (*Triticum aestivum* L.), soybean [*Glycine max* (L.) Merr.], sunflower (*Helianthus annuus* L.), and corn (*Zea mays* L.). Eleven years of conventional tillage decreased SOC 4.1 to 8.8 g kg<sup>-1</sup> without supplemental N and 2.8 to 7.2 g kg<sup>-1</sup> when N fertilizer was applied. Soil organic C loss increased when soybean (1.2 Mg RC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) was present in the sequence and decreased when corn (3.0 Mg RC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) was present. The amount of RC returned by the sequences correlated with SOC in 1995 ( $r=0.84$ ,  $P < 0.01$ ) and with SOC at equilibrium ( $r = 0.76$ ,  $P < 0.01$ ), but the sequences with two summer crops (soybean, sunflower, or corn) every 3 years showed lower SOC in 1995 (28.9-33.8 g kg<sup>-1</sup>) and at equilibrium (24.0-34.4 g kg<sup>-1</sup>), than sequences with none or one summer crop (29.7-

35.0 g kg<sup>-1</sup> either in 1995 or at equilibrium) for the same range of RC (1.4-2.6 Mg RC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>). The difference between sequences in the relationship between RC and SOC were attributed to tillage timing. Under conventional tillage, arable layer SOC can be managed through the selection of the crops in the rotation and N fertilization, but the timing and intensity of tillage have to be taken into account.

#### **4.2. INTRODUCTION**

Crop rotation is an important agroecosystem management practice to preserve and/or improve its sustainability. Goals of crop rotation on system productivity are known as collectively as the rotation effect. This term comprises the effect of crop combination on nutrient and water availability; pest, weed and disease dynamics; presence of either growth inhibiting or promoting substances in the soil, and soil condition (Bullock, 1992). One of the soil components that is altered by soil management practices in the mid to long term, is soil organic matter content (SOM) (Doran and Smith, 1987, Robinson *et al.*, 1994). Soil organic matter is a key soil component because influences soil biological, physical and chemical properties that define soil productivity (Robinson *et al.*, 1994) and quality (Doran and Parkin, 1994). Soil organic matter content also determines soil capacity to reorganize after the alterations produced by tillage and cropping (Kanal and Kölli, 1996), which is a feature that characterizes sustainable agricultural systems (Addiscott, 1995). Likewise, SOM variations are associated to the amounts of CO<sub>2</sub> emitted from or fixed in the soil and, consequently, to the greenhouse effect (Varvel, 1994). It is believed that any management practice that contributes to the maintenance or the increase of SOM, is a sustainable one (Robinson *et al.*, 1994).

Cropping decreases SOM, especially if done with conventional tillage (Lamb *et al.*, 1985; Dalal and Mayer, 1986; Studdert *et al.*, 1997). However, SOM loss can be reduced by including pastures in the rotation (Studdert *et al.*, 1997) or increasing the amount of crop residues returned to the soil (Larson *et al.*, 1978; Collins *et al.*, 1992; Campbell and Zentner, 1993). The amount of SOM in a soil is the result of the balance between humification and mineralization rates (Campbell, 1978). Such balance could be managed by means of the amount of C returned to the soil as crop stover and roots (Larson *et al.*, 1978; Robinson *et al.*, 1994) and by tillage operations and fertilization (Doran and Smith, 1987; Bullock, 1992; Robinson *et al.*, 1994). Through crop rotations it is possible to manipulate the opportunities for, the amount, and the mechanism of C return to the soil and the characteristics and temporal distribution of crop residues (Campbell, 1978). Depending on crops selected, SOM could even be increased under conventional tillage (Varvel, 1994). However, to attenuate the universally admitted deleterious effects of conventional cropping on SOM, it would be necessary to increase the frequency of high biomass production and elevated residue C/N ratio crops in the rotation (Havlin *et al.*, 1990; Varvel, 1994; Huggins *et al.*, 1998), fertilize (Barber, 1979; Varvel, 1994), apply organic manure (Collins *et al.*, 1992), irrigate (Lueking and Schepers, 1985), and/or reduce tillage intensity (Lamb *et al.*, 1985; Havlin *et al.*, 1990; Eghball *et al.*, 1994)

In the last two decades, agricultural soils of the southeastern Buenos Aires province (Argentina) have been intensively used for conventional crop production (Darwich, 1991). Many producers have adopted conservation tillage systems in recent years, but conventional tillage (moldboard plowing) is still predominant in the area. Excessive and continuous soil cultivation is deteriorating soil properties (Echeverría and Ferrari, 1993) and erosion and nutrient deficiency problems are becoming more

frequent due to SOM reductions. Since the described production mode is expected to continue, it is necessary to manage SOC dynamics through crop combination in the rotation in order to contribute to system sustainability.

We propose that SOC decrease of agricultural soils under continuous cropping and conventional tillage can be minimized through managing the amount of residues returned to the soil by means of crop selection for the rotation and fertilization. The objective of this work was to relate the change in arable layer SOC of a complex of Typic Argiudoll and Petrocalcic Paleudoll soils along 11 years of continuous cropping under conventional tillage, with the amount of aboveground residues restored to the soil by 16 crop sequences including wheat, soybean, sunflower, and corn.

### **4.3. MATERIALS AND METHODS**

A long-term crop rotation experiment has been conducted since 1984 at Balcarce, Argentina (37° 45' S, 58° 18' W, 138 m above sea level, 870 mm mean annual rainfall, 13.7 C° mean annual temperature) on a soil complex of a fine, mixed, thermic Typic Argiudoll and a fine, illitic, thermic Petrocalcic Paleudoll (petrocalcic horizon was below 0.7 m) with 2% slope (no erosion). The surface horizon of this complex has a pH of 6 (1:2.5 in water), loamy texture, 33.1 cmol kg<sup>-1</sup> cation exchange capacity, and 5.0 mg kg<sup>-1</sup> Bray and Kurtz P. Prior to the establishment of the experiment, the site had been under a not-grazed predominantly grass pasture for at least 4 yr. According to previous research for the area (Studdert *et al.*, 1997), this period assures a high SOC content that could be reduced by cropping.

The experimental design was randomized complete block with a split-block treatment arrangement (Little and Hills, 1978) and four replicates. Spring wheat, soybean, sunflower and corn were sown in 25 by 100 m strips during the first year of

each 3-yr cycle. In the second year, the same crops were sown in 25 by 100 m strips perpendicular to those of the first year. This defined 16 crop sequences in 25 by 25 m grand plots. During the third year, the entire experiment was cropped to wheat. This 3-yr rotation cycle was repeated four times (until 1995) (Table 4.1).

**Table 4.1. Crop sequences evaluated in the experiment.** <sup>†</sup>

Crop Sequence <sup>‡</sup>	Crop											
	Cycle 1			Cycle 2			Cycle 3			Cycle 4		
	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
WW	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>W</i>
WSb	<i>W</i>	Sb	<i>W</i>	<i>W</i>	Sb	<i>W</i>	<i>W</i>	Sb	<i>W</i>	<i>W</i>	Sb	<i>W</i>
WSf	<i>W</i>	Sf	<i>W</i>	<i>W</i>	Sf	<i>W</i>	<i>W</i>	Sf	<i>W</i>	<i>W</i>	Sf	<i>W</i>
WC	<i>W</i>	C	<i>W</i>	<i>W</i>	C	<i>W</i>	<i>W</i>	C	<i>W</i>	<i>W</i>	C	<i>W</i>
SbW	Sb	<i>W</i>	<i>W</i>	Sb	<i>W</i>	<i>W</i>	Sb	<i>W</i>	<i>W</i>	Sb	<i>W</i>	<i>W</i>
SbSb	Sb	Sb	<i>W</i>	Sb	Sb	<i>W</i>	Sb	Sb	<i>W</i>	Sb	Sb	<i>W</i>
SbSf	Sb	Sf	<i>W</i>	Sb	Sf	<i>W</i>	Sb	Sf	<i>W</i>	Sb	Sf	<i>W</i>
SbC	Sb	C	<i>W</i>	Sb	C	<i>W</i>	Sb	C	<i>W</i>	Sb	C	<i>W</i>
SfW	Sf	<i>W</i>	<i>W</i>	Sf	<i>W</i>	<i>W</i>	Sf	<i>W</i>	<i>W</i>	Sf	<i>W</i>	<i>W</i>
SfSb	Sf	Sb	<i>W</i>	Sf	Sb	<i>W</i>	Sf	Sb	<i>W</i>	Sf	Sb	<i>W</i>
SfSf	Sf	Sf	<i>W</i>	Sf	Sf	<i>W</i>	Sf	Sf	<i>W</i>	Sf	Sf	<i>W</i>
SfC	Sf	C	<i>W</i>	Sf	C	<i>W</i>	Sf	C	<i>W</i>	Sf	C	<i>W</i>
CW	C	<i>W</i>	<i>W</i>	C	<i>W</i>	<i>W</i>	C	<i>W</i>	<i>W</i>	C	<i>W</i>	<i>W</i>
CSb	C	Sb	<i>W</i>	C	Sb	<i>W</i>	<b>C</b>	Sb	<i>W</i>	C	Sb	<i>W</i>
CSf	C	Sf	<i>W</i>	C	Sf	<i>W</i>	C	Sf	<i>W</i>	C	Sf	<i>W</i>
CC	C	C	<i>W</i>	C	C	<i>W</i>	C	C	<i>W</i>	C	C	<i>W</i>

<sup>†</sup> Italics indicate that the corresponding experimental unit has received N fertilization.

<sup>‡</sup> W: wheat, Sb: soybean, Sf: sunflower, C: corn.

All grand plots were split into two 12.5 by 25 m experimental units (EU). Whenever the crop on the plot was wheat, one of the EU was fertilized with urea (60 kg N ha<sup>-1</sup> in 1984 and 1985, 90 kg N ha<sup>-1</sup> in 1986 and 1987, and 120 kg N ha<sup>-1</sup> thereafter) at tillering until 1987 and at sowing thereafter. Likewise, since 1990, whenever the crop on the plot was corn, the EU that had been fertilized under wheat, was fertilized at planting with 120 kg N ha<sup>-1</sup> as urea. In all cases, urea was broadcasted. This fertilization scheme determined 16 EU per block that were never N fertilized and sixteen that received urea 3, 5, 7, 9, or 11 yr during the experiment

(disregarding 1995, Table 4.1). The corresponding EU under soybean, sunflower and corn (until 1990) were not N fertilized, but they were analyzed separately due to the possible N carryover generated by fertilizer applied to wheat and corn (since 1990) in the sequence. All crops were grown under rainfed conditions and superphosphate was banded at planting according to soil analysis.

All seedbeds were prepared by moldboard plowing, disking, and harrowing. Tillage operations for summer crops were started  $\approx$ 3 to 4 months before planting (mid October for corn, and mid November for soybean and sunflower). For wheat, tillage operations were started immediately after the preceding crop harvest. In all cases, tillage opportunity and intensity were those required to get a weed free and not excessively fine seedbed. In the case of the row crops, chemical weed control was complemented by mechanical control throughout the growing season.

Wheat and soybean were harvested with a conventional plot combine. Sunflower and corn yields were estimated by measuring head diameter and hand harvesting (ear collection and later stationary threshing), respectively, of several 14.3-m-length crop lines per EU. The amount of C returned to the soil as aboveground residues was estimated assuming average harvest indexes of 0.45, 0.40, 0.35, and 0.45 for wheat, soybean, sunflower, and corn, respectively, since in the long term, harvest index fluctuations under rainfed conditions, are more dependent on the moment when water stresses occur than on N fertilization (F. Andrade, 1997, personal communication) and a C content of 43.0%. The mean annual aboveground RC returned was calculated by averaging the estimated residue C left by each crop sequence on the ground, through the duration of the experiment, excluding 1995.

Arable layer (0-0.17 m depth) SOC was determined by the Walkley-Black procedure (Nelson and Sommers, 1982). Composite soil samples (15-20 subsamples

per sample) were taken each year before crop sowing (between July and October, according to the crop to be sown), air dried and ground to pass 0.5-mm-opening sieve. In 1984 only four samples were taken from the entire experiment area, and in 1985 and 1986 only one sample per strip of preceding crop and one sample per block, respectively, were taken. In 1987 and 1988 soil samples were taken from each grand plot disregarding N fertilization background. For the serial analysis throughout the experiment, SOC determined in 1984, 1985, 1986, 1987 and 1988 was assigned to each of the corresponding EU. Starting in 1989, soil samples were taken from each EU. In 1987, 1991 and 1993 only the EU that were going to be cropped to wheat were sampled. The last soil sampling was done at wheat sowing in 1995.

The model proposed by Bartholomew and Kirkham (1960) was used to describe the relationship between SOC and cropping years:

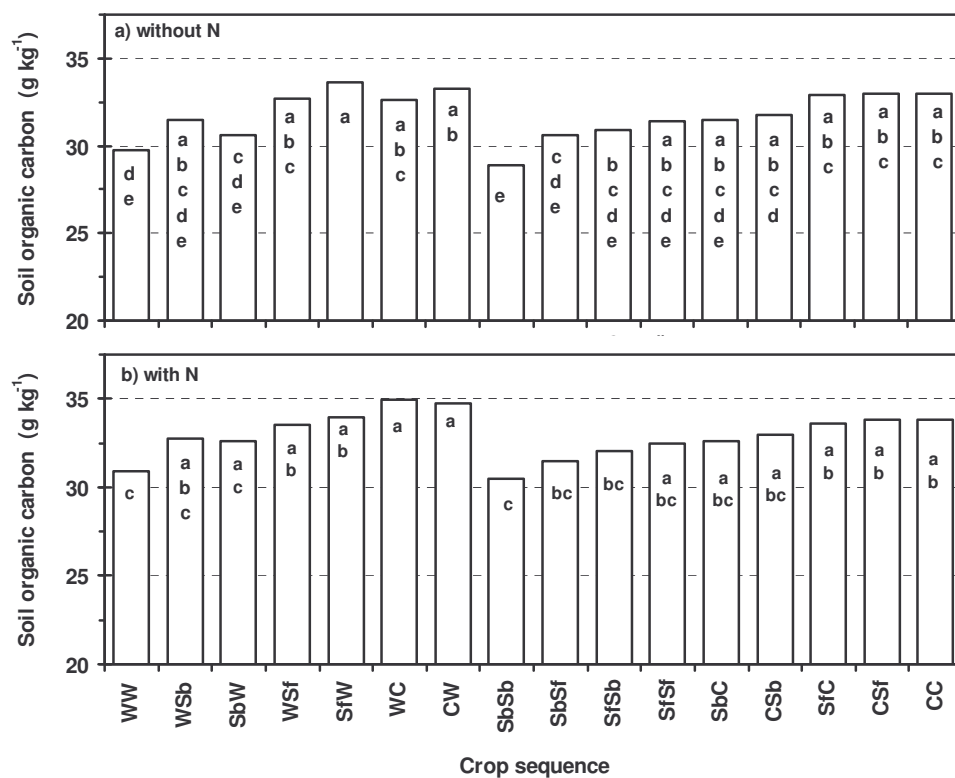
$$\text{SOC}_t = \text{SOC}_e - (\text{SOC}_e - \text{SOC}_0)\text{exp}(-rt) \quad [1]$$

where  $\text{SOC}_t$  is the value of SOC ( $\text{g kg}^{-1}$ ) at time  $t$ ;  $\text{SOC}_e$  is the value of SOC at equilibrium;  $\text{SOC}_0$  is the value of SOC at  $t = 0$  ( $37.7 \text{ g kg}^{-1}$ );  $r$  is the exponential rate of variation ( $\text{yr}^{-1}$ ); and  $t$  is cropping year ( $\text{yr}$ ). Soil organic C contents were fit to this model through nonlinear regression (Marquardt iteration method). Since N fertilization was not randomly assigned to EU, the analyses of variance to test the effect of crop sequences on SOC in 1995 and RC for unfertilized EU and for those that received N fertilizer at least once during each rotation cycle were performed separately. Duncan's multiple range test was used to compare treatment means of those two variables. Other statistical analyses (linear correlation and regression analyses) were also performed.



#### 4.4. RESULTS AND DISCUSION

Eleven years of continuous conventional cropping caused a decrease in the SOC. Soil organic C contents before the last wheat sowing (1995) for the 16 crop sequences studied are shown in Fig. 4.1. The difference between the initial SOC level ( $37.7 \text{ g kg}^{-1}$ ) and SOC content in 1995 ranged 2.8 to 7.2 and 4.1 to 8.8  $\text{g kg}^{-1}$  for the fertilized and unfertilized EU, respectively.



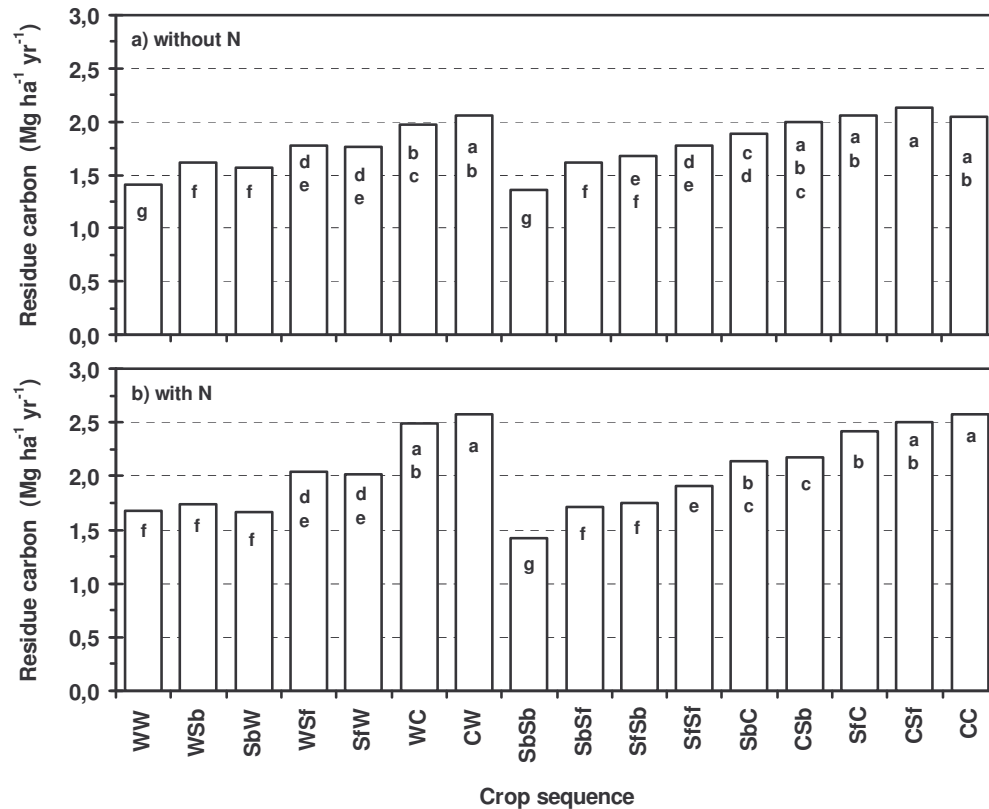
**Figure 4.1.** Arable layer soil organic C after 11 yr of conventional tillage under different crop sequences (a) without N and (b) with N applied at 3, 5, 7, 9, or 11 yr during the experiment. Crop sequences are described in Table 4.1. C = corn, Sb = soybean, Sf = sunflower, W = wheat. The same letters within columns indicate that the sequences do not differ according to Duncan ( $P < 0.05$ ).

For fertilized and unfertilized EU, the analysis of variance showed highly significant differences in SOC in 1995 ( $P < 0.01$ ) among treatments. Although the mean separation did not show sharp differences in cropping system effects on SOC,

some differences were apparent. Perhaps, the narrow range of SOC content between treatments (30.5-35.0 and 28.9-33.6 g kg<sup>-1</sup> for fertilized and unfertilized EU, respectively), prevented clear differentiation (Fig. 4.1). Independent of N fertilization, the lowest SOC level corresponded to wheat-wheat and soybean-soybean sequences and SOC increased as soybean was not present or corn was present in the sequences.

Two groups of sequences can be distinguished in Fig. 4.1. The first one (G1) comprises those sequences that include none or only one summer crop (corn, soybean or sunflower) every 3 yr (the first seven sequences on the left of Fig. 4.1, averaging 33.4 ± 1.4 and 32.0 ± 1.4 g SOC kg<sup>-1</sup> for fertilized and unfertilized EU, respectively). The second group (G2) includes the rest of the sequences, all of which have two summer crops every 3 yr (averaging 32.6 ± 1.1 and 31.5 ± 1.3 g SOC kg<sup>-1</sup> for fertilized and unfertilized EU, respectively).

The estimated RC through 1995 is shown in Fig. 4.2. For fertilized and unfertilized EU, the analysis of variance showed highly significant differences in RC in 1995 ( $P < 0.01$ ) among treatments. Average RC returned to the soil increased if soybean was not present or corn was present in the sequences. Fertilized and unfertilized wheat in rotation returned an average of 2.1 ± 0.7 and 1.6 ± 0.5 Mg C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively, and corn returned an average of 3.2 ± 0.5 and 2.8 ± 0.6 Mg C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively. Soybean and sunflower returned 1.2 ± 0.5 and 2.0 ± 0.6 Mg C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively, without difference due to fertilization background. The presence of soybean and corn in the sequence decreased and increased RC, respectively, and this trend was more clear if N fertilization had occurred. On the other hand, sequences of G1 restored 2.0 ± 0.4 and 1.7 ± 0.2 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> in the fertilized and unfertilized EU, respectively, and the sequences in G2 restored 2.1 ± 0.4 and 1.8 ± 0.2 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively.

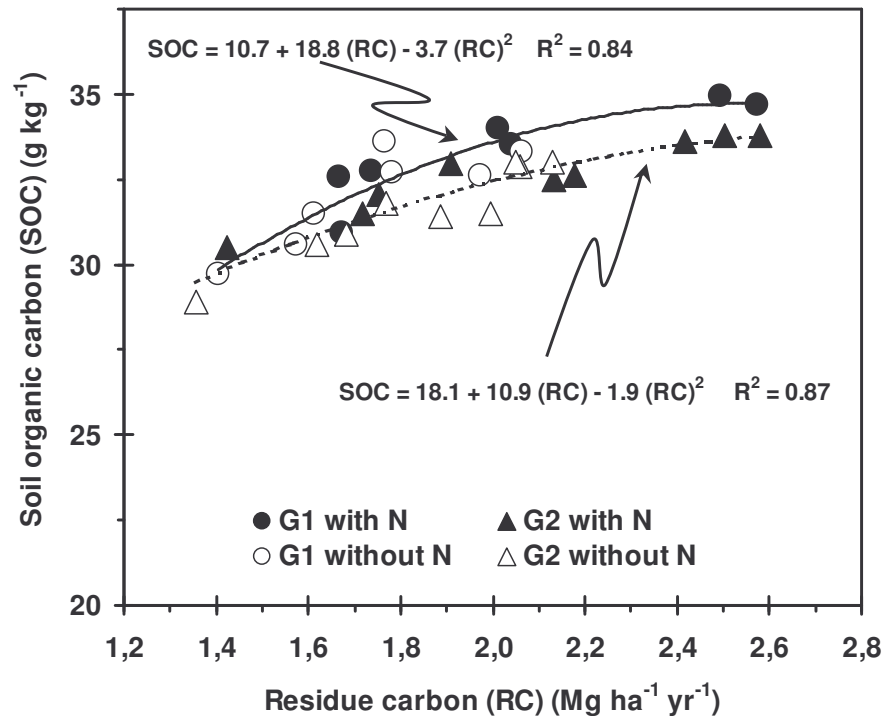


**Figure 4.2.** Mean annual aboveground residue C returned to the soil after 11 yr of conventional tillage by different crop sequences (a) without N and (b) with N applied at 3, 5, 7, 9, or 11 yr during the experiment. Crop sequences are described in Table 4.1. C = corn, Sb = soybean, Sf = sunflower, W = wheat. The same letters within columns indicate that the sequences do not differ according to Duncan ( $P < 0.05$ ).

In the WW sequence, fertilized and unfertilized continuous wheat returned an average of  $1.7 \pm 0.6$  and  $1.4 \pm 0.4$  Mg C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively (Fig. 4.2). Monocultured wheat was affected by Take-All [*Gaeumannomyces graminis* (Sacc.) Arx & D. Olivier var. *tritici* J. Walker] several years at random (data not shown). At Balcarce, Take-All effects occur after anthesis (A. Melegari, 1998, personal communication) just when the aboveground biomass (excluding grain) finishes its growth and grain formation starts, and, consequently, grain yield and harvest index fall. Therefore, the method employed underestimated the amount of C restored by the WW sequence, since an average normal harvest index was employed. This may have also happened, to a lesser extent,

with the estimation of RC for the rest of the sequences that include wheat, since all of them comprise two continuous wheat crops in each rotation cycle (Table 4.1). In the latter case, the frequency of appearance and severity of Take-All were much lower than in the former (data not shown). This means that the material that is returned to the field as residue (stem, leaves and chaff) must have been present on it after harvest, despite the low grain yield due to the disease.

The similarity of trends shown in Fig. 4.1 and 4.2 suggest a close relationship between RC and SOC level in 1995. A highly significant correlation coefficient between both variables ( $r = 0.84$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 32$ ) confirm what some other authors have already reported (Larson *et al.*, 1978; Barber, 1979; Havlin *et al.*, 1990; Varvel, 1994). However, the correlation coefficients were higher when the relationship between RC and SOC was analyzed separately for G1 ( $r = 0.87$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 14$ ) and G2 ( $r = 0.91$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 18$ ) (Fig. 4.3). Figure 4.3 shows that, at the same amount of RC restored, different SOC levels were reached by each sequence group. On the other hand, the equations in Fig. 4.3 show that the maximum SOC that each sequence group could have reached in 1995 would have been  $34.7 \text{ g kg}^{-1}$  (at  $2.6 \text{ Mg RC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) and  $34.0 \text{ g kg}^{-1}$  (at  $2.9 \text{ Mg RC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) for G1 and G2, respectively. The data shown in Fig. 4.3 suggests that (i) N fertilization, even when it has not been continuous, augmented RC (Fig. 4.2) and, therefore, helped maintaining SOC with respect to the initial level (Fig. 4.1); (ii) differences observed between sequence groups indicate that residue amount is the main factor in defining SOC, but that its effect is conditioned by other factors regarding crop combination; (iii) G2 would not have reached as high a maximum as that G1 could have reached, even if the amount of RC returned by G2 had been increased by almost 12%; and (iv) conventionally tilled cropping caused a decrease in SOC and, even though some sequences had had higher RC levels, it could



**Figure 4.3.** Arable layer soil organic C after 11 yr of conventional tillage as a function of mean annual residue carbon returned by different crop sequences arranged in two groups: G1, none or only one summer crop every 3 yr; G2, two summer crops every 3 yr. With N = received N fertilizer 3, 5, 7, 9, or 11 years during the experiment (Table 4.1); Without N = never received N fertilizer.

never maintain the initial SOC levels. The latter statement disagrees with Barber (1979) and Varvel (1994) who reported that increasing the amount of residue returned to the soil, it might be possible to increase SOC even under conventional tillage, probably because they started their studies at a low SOC level.

Considering that the initial SOC level was the same for all the sequences and that they presented different levels of SOC after 11 yr of conventional cropping, the dynamics of SOC variation must also have been different. Table 4.2 shows the parameters estimated for Eq. [1] and Fig. 4.4 shows the resulting curves. The general shape of these curves has already been shown by several authors when describing the

variation of SOC as a function of time under conventional cropping (Campbell, 1978; Lamb *et al.*, 1985; Dalal and Mayer, 1986; Studdert *et al.*, 1997). Dalal and Mayer (1986) reported different curve shapes according to the type of soils and the kind of natural vegetation present before cropping start, whereas Lamb *et al.* (1985) showed different curve shapes in relation to tillage systems. In this study curve shapes differ among sequences and between N fertilization status.

Table 4.2 shows that, in most cases and excluding WW, one or two soybean crops every 3 yr in the sequence, reduced  $SOC_e$  and  $r$  ( $29.6 \pm 3.0$  vs.  $33.0 \pm 1.5$  g kg<sup>-1</sup> and  $0.171 \pm 0.083$  vs.  $0.327 \pm 0.262$  yr<sup>-1</sup> when soybean was present or not, respectively). Figure 4.4 shows that whenever a soybean crop is present in the sequence, the corresponding curves are below the rest, with the exception of Fig. 4.4a and 4.4b where curves representing SOC variation under WW were below the rest of the curves. Likewise, when one (Fig. 4.4a-4.4d) or two (Fig. 4.4e and 4.4f) corn crops were included every 3 yr in the sequence, resulting curves are above the rest. On the other hand, when N was applied,  $SOC_e$  and  $r$  are higher than when no N was applied ( $32.5 \pm 2.7$  and  $30.2 \pm 2.5$  g kg<sup>-1</sup>, and  $0.352 \pm 0.273$  and  $0.182 \pm 0.065$  yr<sup>-1</sup>, respectively). When a soil is put under cropping, its SOC tends to a new equilibrium in relation to the conditions of cropping (Barber, 1979; Robinson *et al.*, 1994). Estimated parameters of Eq. [1] allow to characterize how the sequences tend to the equilibrium if management conditions were kept constant. Higher  $SOC_e$  values indicate a reduction in the total SOC decrease expected to occur, whereas higher  $r$  values mean that such decline occurs in a shorter period. The latter can be seen in half-life data in Table 4.2. Half life is lower when there were no soybean crops in the sequence ( $2.8 \pm 1.3$  yr), when at least one corn crop was present ( $3.1 \pm 1.3$  yr), and when N fertilizer was applied ( $3.3 \pm 2.8$  yr) than when at least one soybean crop was included in the

**Table 4.2. Results of fitting Bartholomew and Kirkham (1960) model to soil organic C (SOC) as a function of cropping years for different crop sequences.**

Crop Sequence Group <sup>†</sup>	Crop Sequence <sup>‡</sup>	Without N				With N§			
		Model parameters¶		R <sup>2</sup>	Half life#	Model parameters¶		R <sup>2</sup>	Half life#
		SOC <sub>e</sub>	r			SOC <sub>e</sub>	r		
		g kg <sup>-1</sup>	yr <sup>-1</sup>		yr	g kg <sup>-1</sup>	yr <sup>-1</sup>		yr
G1	WW	29.7	0.332	0.65	2.1	32.0	0.588	0.37	1.2
	WSb	30.3	0.238	0.63	2.9	32.5	0.326	0.46	2.1
	SbW	30.1	0.206	0.75	3.4	33.0	0.315	0.41	2.2
	WSf	32.0	0.190	0.54	3.0	33.9	0.357	0.20	1.9
	SfW	32.7	0.234	0.50	3.6	34.4	0.533	0.17	1.3
	WC	32.6	0.225	0.67	3.1	34.7	0.803	0.22	0.9
	CW	32.9	0.213	0.49	3.2	35.1	1.073	0.08	0.7
G2	SbSb	24.0	0.084	0.79	8.2	24.1	0.059	0.69	11.8
	SbSf	26.8	0.090	0.75	7.7	29.2	0.103	0.72	6.7
	SfSb	28.3	0.125	0.77	5.5	31.5	0.154	0.62	4.5
	SfSf	29.2	0.120	0.73	5.8	31.6	0.142	0.66	4.9
	SbC	29.1	0.138	0.83	5.0	32.4	0.216	0.63	3.2
	CSb	29.6	0.134	0.71	5.2	32.9	0.205	0.50	3.4
	SfC	32.4	0.223	0.76	3.1	34.1	0.299	0.39	2.3
	CSf	31.8	0.176	0.67	3.9	33.8	0.233	0.42	3.0
	CC	32.3	0.192	0.85	3.6	34.4	0.220	0.36	3.1

<sup>†</sup> G1: sequences that include none or only one summer crop (Sb, Sf, or C) every three years; G2: sequences that include two summer crops (Sb, Sf, or C) every three years

<sup>‡</sup> W: wheat, Sb: soybean, Sf: sunflower, C: corn (see Table 4.1).

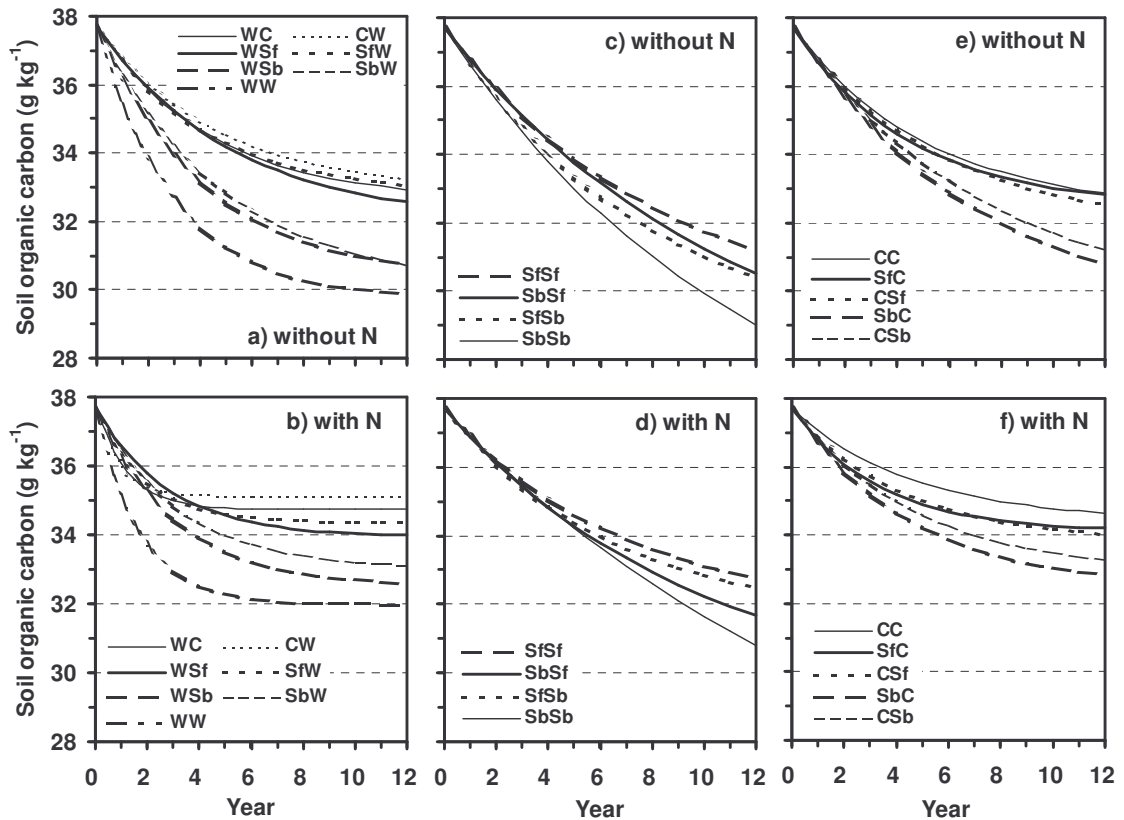
<sup>§</sup> experimental units that received N fertilizer 3, 5, 7, 9, or 11 years along the experiment.

<sup>¶</sup> SOC<sub>e</sub>: soil organic carbon at equilibrium; r: exponential rate of variation.

<sup>#</sup> Half life: estimated elapsed time between cropping start and the decrease of half of the total estimated decrease = 0.693 r<sup>-1</sup>

sequence, no corn crop was included, and N fertilizer was not applied ( $5.1 \pm 2.7$ ,  $4.4 \pm 2.8$ , and  $4.3 \pm 1.8$  yr, respectively). These results agree with those reported by others with respect to the effect of soybean and corn crops in the sequence (Barber, 1979; Havlin *et al.*, 1990; Varvel, 1994; Eghball *et al.*, 1994; Huggins *et al.*, 1998) and N fertilization (Barber, 1979; Varvel, 1994) on SOC level.

Table 4.2 also shows that G1 sequences result in higher SOC<sub>e</sub> and r than G2 sequences ( $32.6 \pm 1.7$  and  $30.4 \pm 3.1$  g kg<sup>-1</sup>, and  $0.402 \pm 0.261$  and  $0.162 \pm 0.063$

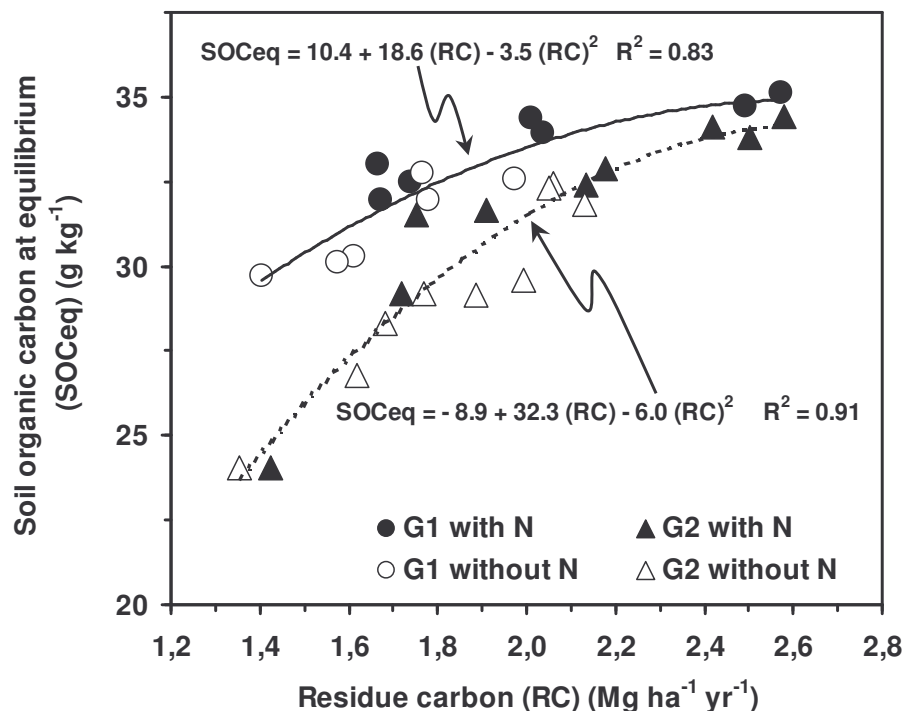


**Figure 4.4.** Change in soil organic C as a function of time under conventional cropping for different crop sequences. Curves result from fitting a model proposed by Bartholomew and Kirkham (1960). Crop sequence description and model parameters can be seen in Tables 4.1 and 4.2, respectively. With N = received N fertilizer 3, 5, 7, 9, or 11 years during the experiment (Table 4.1); Without N = never received N fertilizer.

$\text{yr}^{-1}$ , respectively). Figure 4.5 shows the relationship between  $\text{SOC}_e$  and the amount of RC returned by each sequence until 1995. Similarly to what was shown in Fig. 4.3, at the same level of RC, G1 sequences tend to a higher  $\text{SOC}_e$  than G2 sequences. This difference is larger when RCs are lower either due to sequences including poor residue-return crops or to lack of fertilization (Fig. 4.2, Table 4.2). Likewise, there were highly significant correlations between annual RC return through 1995 and parameter  $r$  for G1 ( $r = 0.74$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 14$ ) and G2 ( $r = 0.90$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 18$ ) sequences. It is worth pointing out that quadratic equations that explain the relationship between RC and either SOC or  $\text{SOC}_e$  for G1 sequences in Fig. 4.3 and 4.5, respectively, are almost



the same. This means that G1 sequences almost reached  $SOC_e$  in 11 yr of conventional cropping. On the other hand, while high-RC-returning G2 sequences approached equilibrium in the same period (SOC for these sequences in Fig. 4.1 is almost the same as  $SOC_e$  in Table 4.2), SOC levels of lower-RC-returning G2 sequences would continue falling for longer time (SOC for these sequences in Fig. 4.1 is higher than  $SOC_e$  in Table 4.2) if management conditions were kept constant. Since overall explored range RC was almost the same for G1 and G2, differences between them in the relationship between RC and SOC and  $SOC_e$  shown in Fig. 4.3 and 4.5, respectively, could be attributed to the way tillage operations were done.



**Figure 4.5.** Arable layer soil organic C at equilibrium according to the model proposed by Bartholomew and Kirkham (1960) as a function of mean annual residue C returned by different crop sequences arranged in two groups: G1, none or only one summer crop every 3 yr; G2, two summer crops, every 3 yr. With N = received N fertilizer 3, 5, 7, 9, or 11 years during the experiment (Table 4.1); Without N = never received N fertilizer.

Conventional tillage affects C dynamics in the soil through its effect on crop residue decomposition and on soil aeration and through provoking the exposure of SOC fractions protected within the aggregates (Doran and Smith, 1987; Eghball *et al.*, 1994). Tillage opportunity and frequency alter those effects since they also are related to temperature and soil water content. Tillage operations for summer crops, either for seed bed preparation or weed control, were done mainly during spring and early summer, when temperatures were higher. Sequences in G2 comprised eight summer crops out of eleven crops through the experiment. This could be associated to faster residue decomposition and greater SOC mineralization, and explains differences shown in Fig. 4.3 and 4.5. Similarly, this relationship between tillage opportunity and SOC dynamics can also explain the particular results observed under the WW sequence.

As stated before, it should be assumed that RC returned by WW was underestimated. However, the discussed relationships of SOC in 1995,  $SOC_e$  (Fig. 4.3 and 4.5, respectively) and  $r$  with RC appear to apply also to WW (Fig. 4.2, Table 4.2). Since in reality RC was higher than the estimated, the only explanation for those relationships could be how tillage was done. Tillage operations for seedbed preparation for wheat were started as soon as the preceding crop was harvested. This cropping strategy when wheat was sown after wheat, means that the most aggressive tillage operations had to be done during the summer and early fall, which could have provoked more intense SOC mineralization, despite the supposedly higher RC restored.

It has been demonstrated that SOC dynamics could be managed through the selection of the crops included in the rotation. Higher frequency of low aboveground biomass-producing crops, such as soybean, produce greater decreases of SOC. On the contrary, the amount of residues to be returned to the soil may be increased through the inclusion in the rotation of high aboveground biomass-producing crops and through

fertilization, thus attenuating SOC decrease. However, the decision about the crops to include in the rotation according to the amount of residues produced has to be coupled with awareness of the tillage intensity and opportunity associated with each of them. The relationship between the amount of residues restored to the soil and SOC dynamics under conventional tillage may be greatly altered by the way and the moment tillage operations are done. The high SOC content characteristic of the soils of the area under study could be preserved through a careful choice of the crops to include in the rotation and complementing this with other management practices such as alternation of cropping and pasture periods to restore SOC levels (Studdert *et al.*, 1997) and use of conservation tillage to diminish the SOC decrease (Lamb *et al.*, 1985; Havlin *et al.*, 1990; Eghball *et al.*, 1994).

#### **4.5. ACKNOWLEDGEMENTS**

This study was made possible thanks to the long-term crop rotation experiment at Balcarce, Argentina, conducted since 1984 in the Unidad Integrada Balcarce (UIB) with financial support of the Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. We want to express our gratitude to the scientists who have participated and have been in charge of the conduct of the experiment during different periods, to the field personnel who have helped with most of the field work, and to the personnel of the Soil, Plant, and Water Analysis Laboratory of the UIB who ran a great part of the soil analyses. We also want to express our appreciation to the Agencia Española de Cooperación Internacional that funded the staying of the senior author in Spain where most of this paper was written.

#### **4.6. REFERENCES**

Addiscott, T.M. 1995. Entropy and sustainability. *European J. Soil Sci.*, 46:161-168.

- 
- Barber, S.A. 1979. Corn residue management and soil organic matter. *Agron. J.*, 71:625-627.
- Bartholomew, W.V. and D. Kirkham. 1960. Mathematical descriptions and interpretations of culture induced soil nitrogen changes. p. 471-477. In *Soil Biology. Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci. Vol. II Comm. III, Int. Soc. Soil Sci.*, Madison, WI, 1960.
- Bullock, D.G. 1992. Crop rotation. *Critical Rev. Plan Sci.*, 11(4):309-326.
- Campbell, C.A. 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. p. 173-271. In M. Schnitzer and S.U. Khan (eds.) *Soil organic matter. Developments in Soil Science 8*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, Netherlands.
- Campbell, C.A. and R.P. Zentner. 1993. Soil. organic matter as influenced by crop rotations and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1034-1040.
- Collins, H.P., P.E. Rasmussen, and C.L. Douglas, Jr. 1992. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:783-788.
- Dalal, R.C. and R.J. Mayer. 1986. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland: I. Total organic carbon and rate of loss from the soil profile. *Aust. J. Soil Res.*, 24:281-282.
- Darwich, N.A. 1991. Estado actual y manejo de los recursos naturales en la región pampeana húmeda sur. p. 51-62. In *Seminario Juicio a Nuestra Agricultura. Hacia el desarrollo de una agricultura sostenible. Actas Seminario Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina, 14-15 Nov. 1991. Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.*
- Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. pp. 3-21. In J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek and B.A. Stewart (eds.) *Defining soil*

- quality for a sustainable environment. SSSA Sp. Pub. N° 35. Soil Sci. Soc. Am., Inc.; Am. Soc. Agron., Inc.; Madison, WI.
- Doran, J.W. and M.S. Smith. 1987. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients. pp. 53-72. In R.F. Follett, J.W.B., and C.V. Cole (eds.) Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. SSSA Sp. Pub. N° 19. Soil Sci. Soc. Am., Inc.; Am. Soc. Agron., Inc.; Madison, WI.
- Echeverría, H.E. and J. Ferrari. 1993. Relevamiento de algunas características de los suelos agrícolas del sudeste bonaerense. INTA, Ce.R.B.A.S., E.E.A. Balcarce, Boletín Técnico N° 112.
- Eghball, B., L.N. Mielke, D.L. McCallister, and J.W. Doran. 1994. distribution of organic carbon and inorganic nitrogen in a soil under various tillage and crop sequences. J. Soil Water Cons., 49:201-205.
- Havlin, J.L., D.E. Kissel, L.D. Maddux, M.M. Claasen, and J.H. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:448-452.
- Huggins, D.R., C.E. Clapp, R.R. Allmaras, J.A. Lamb, and M.F. Layese. 1998. Carbon dynamics in corn-soybean sequences as estimated from natural carbon-13 abundance. Soil Sci. Soc. Am. J., 62:195-203
- Kanal, A. and R. Kölli. 1996. Influence of cropping on the content, composition, and dynamics of organic residue in the soil of the plough layer. Biol. Fert. Soils, 23:153-160.
- Lamb, J.A., G.A. Peterson, and C.R. Cole. 1985. Wheat fallow tillage systems' effects on a newly cultivated grassland soils' nitrogen budget. Soil Sci. Soc. Am. J., 49:352-356.

- Larson, W.E., R.F. Holt, and C.W. Carlson. 1978. Residues for soil conservation. pp. 1-15. In W.R. Oschwald (ed.) Crop residue management systems. ASA Sp. Pub. N° 31. Am. Soc. Agron.; Crop Sci. Soc. Am.; Soil Sci. Soc. Am.; Madison, WI.
- Little, T.M. and F.J. Hills. 1978. Agricultural experimentation. Design and analysis. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Lueking, M.A. and J.S. Schepers. 1985. Changes in soil carbon and nitrogen due to irrigation development in Nebraska's Sandhill soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:626-630.
- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 539-579. In A.L. Page *et al.* (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Robinson, C.A., R.M. Cruse, and K.A. Kohler. 1994. Soil management. pp. 109-134. In J.L. Hatfield and D.L. Karlen (eds.) *Sustainable agriculture systems*. Lewis Pub., Boca Ratón, FL.
- Studdert, G.A., H.E. Echeverría, and E.M. Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1466-1472.
- Varvel, G.E. 1994. Rotation and nitrogen fertilization effects on changes in soil carbon and nitrogen. *Agron J.* 86:316-325.

# **5. CAPÍTULO III**

## 5. CAPÍTULO III

### **ESTIMACIÓN DEL NITRÓGENO MINERALIZADO PARA UN CULTIVO DE TRIGO EN DISTINTAS SECUENCIAS DE CULTIVOS**

**Guillermo A. Studdert, Laura S. Carabaca, Hernán E. Echeverría**

Unidad Integrada Fac. Ciencias Agrarias (UNMP)- EEA INTA Balcarce, C.C. 276, (7620)

Balcarce, Argentina. E-mail: gastudde@mdp.edu.ar

Recibido 9 de febrero de 2000, aceptado 26 de mayo de 2000

### **ESTIMATION OF SOIL NITROGEN MINERALIZATION FOR SPRING WHEAT IN DIFFERENT CROP SEQUENCES**

#### **5.1. ABSTRACT**

Nitrogen fertilization diagnosis for wheat should include not only the evaluation of available nitrogen at sowing but also the nitrogen to be mineralized during the crop growing season. Soil nitrogen availability dynamics depends on the size of soil potentially mineralizable nitrogen ( $N_0$ ), which in turn is dependent on long term soil management, and on the characteristics of the plant material returned to the soil, determined by the preceding crop. It has been hypothesized that a model based on  $N_0$  to estimate nitrogen mineralization, would not be effective since  $N_0$  does not take into account the material returned to the soil. In a field experiment at Balcarce, nitrogen nutrition and yield of wheat sown after four preceding crops (soybean, wheat, sunflower, and maize) within four long term crop sequences with a high frequency of each of them was studied. In a laboratory experiment soil organic carbon,  $N_0$  and mineralization constant ( $k$ ) were determined. Grain yield, aboveground dry matter and



nitrogen accumulation and other nitrogen nutrition indicators showed the following order as a function of the preceding crop: soybean>wheat> sunflower>maize. Soil organic carbon,  $N_0$  and mineralized soil nitrogen estimated with the model showed the opposite order due to the long term effect of the sequences. Soybean residues decomposition released nitrogen and maize residues provoked nitrogen immobilization that altered wheat nitrogen nutrition and were not taken into account by the model. Nitrogen mineralization estimation should include the short term effect of preceding crops in the sequence.

**Key words:** wheat, nitrogen mineralization, prediction, preceding crops

## 5.2. INTRODUCCIÓN

La deficiencia de nitrógeno en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L., T) puede reducir el rendimiento, como resultado de la disminución del área foliar y de la intercepción de la radiación, y, consecuentemente, de la eficiencia de conversión de la radiación en materia seca. (Abbate *et al.* 1994; Lázaro 1996). Para realizar un buen diagnóstico de la necesidad de fertilización nitrogenada en trigo se debería considerar no sólo el nitrógeno mineral en el suelo a la siembra, sino también el que se mineralizaría durante la estación de crecimiento del cultivo (Rice, Havlin 1994; Echeverría *et al.* 1994). La estimación de esta última fracción es muy compleja ya que se ve afectada por muchos factores que tienen efecto sobre la dinámica del carbono y del nitrógeno del suelo, y están muy relacionados con los procesos de inmovilización y mineralización que alteran la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo (Loiseau *et al.* 1994).

La mineralización de nitrógeno del suelo responde a una cinética de primer orden (Rice, Havlin 1994) ya que la cantidad neta que se obtiene por incubación de muestras

en condiciones adecuadas para la actividad microbiológica, es directamente proporcional al tamaño del pool de nitrógeno mineralizable (Stanford, Smith 1972). La incubación de muestras de suelo por largos períodos en esas condiciones permite determinar la fracción del nitrógeno orgánico susceptible de ser mineralizado (nitrógeno potencialmente mineralizable,  $N_o$ ) y la constante de mineralización ( $k$ ). No obstante, la  $k$  se ve afectada por la temperatura (Echeverría *et al.* 1994) y el contenido de agua (Navarro *et al.* 1991) del suelo. Por ello, para estimar la mineralización a campo, se requiere corregir la  $k$  por las condiciones hídricas y térmicas del período a evaluar (Echeverría *et al.* 1994).

Cada suelo tiene una determinada capacidad relativa de suministro de nitrógeno en función del manejo a que ha sido sometido. Ciclos agrícolas prolongados provocan menores rendimientos de trigo sin el agregado de nitrógeno (Studdert, Rizzalli 1994), debido a una disminución del contenido de materia orgánica (Casanovas *et al.* 1995) y, consecuentemente, del  $N_o$  (Echeverría *et al.* 1994). Studdert y Echeverría (2000) han demostrado que, dentro de los ciclos agrícolas, las secuencias de cultivos que aportan mayor cantidad de rastrojos se asocian a mayores contenidos de materia orgánica y posiblemente a más elevada capacidad de suministrar nitrógeno, que se podría identificar a través de la determinación del  $N_o$ . El conocimiento del  $N_o$  permitiría evaluar el efecto de prácticas de manejo o uso del suelo sobre la capacidad relativa del suelo de suministrar nitrógeno a los cultivos y podría ser utilizado en modelos de simulación para predecir los posibles aportes de nitrógeno (Echeverría *et al.* 1994; Rice, Havlin 1994).

Por otro lado, el cultivo antecesor altera el proceso de mineralización-inmovilización de nitrógeno tanto por el tipo de residuo que deja, como por el período de barbecho que permite realizar. Para el Sudeste de la Provincia de Buenos Aires se

ha encontrado que, sin el agregado de N, los antecesores soja (*Glycine max* L. Merr., S) y girasol (*Helianthus annuus* L., G) (relación C/N baja a media) generaron rendimientos de trigo similares, mientras que sobre maíz (*Zea mays* L., M) (relación C/N alta) la producción de T fue inferior debido a la inmovilización provocada por sus rastrojos (Lázaro 1996). Tales diferencias no existieron cuando se aplicó fertilizante nitrogenado. Badaruddin y Meyer (1994) también observaron diferencias entre antecesores, y encontraron mayor rendimiento de grano y más nitrógeno inicial en suelo y en planta cuando el antecesor era S que cuando era T, lo que fue atribuido al aporte por mineralización del nitrógeno en los rastrojos de S. El efecto de los residuos de los antecesores sobre el proceso de mineralización-inmovilización puede persistir durante el ciclo del cultivo de T influenciando la capacidad del suelo para proveer nitrógeno. Los menores rendimientos de T observados por Lázaro (1996) cuando el antecesor era M respecto a los asociados al antecesor S, se contraponen con los mayores y menores contenidos de materia orgánica observados cuando la secuencia presentaba una alta frecuencia de uno y otro cultivo, respectivamente (Studdert, Echeverría 2000)

La estimación de la mineralización de nitrógeno no sólo debería incluir el mineralizado a partir de la materia orgánica del suelo y otras fuentes de nitrógeno orgánico, sino también el liberado a partir de los residuos de los cultivos antecesores (Rice, Havlin 1994). El método de Stanford y Smith (1972) para estimación del  $N_o$ , no contempla esto último, ya que los residuos presentes en el suelo son eliminados. Esto impide tanto lograr una estimación exacta de la mineralización potencial en el sistema suelo-cultivo, como conocer el efecto de los residuos sobre el nitrógeno liberado por la mineralización de la fracción orgánica del suelo.

Se ha propuesto un modelo simple para estimar la mineralización de nitrógeno durante el ciclo de los cultivos basado en el  $N_0$  y en la corrección de la  $k$  por las condiciones térmicas e hídricas del período de estimación (Echeverría *et al.* 1994). Este modelo no ha sido validado en condiciones de campo y, debido a que se basa exclusivamente en el  $N_0$ , se hipotetiza que su capacidad para predecir la disponibilidad de nitrógeno para un cultivo de T sobre distintos antecesores es limitada. Los objetivos del presente trabajo fueron: i) determinar el  $N_0$  de suelos sometidos a distintas secuencias agrícolas por muchos años, ii) evaluar el efecto de tales secuencias sobre la nutrición nitrogenada y la productividad de un cultivo de T y sobre la variación del nitrógeno mineral en el suelo durante su ciclo y, iii) comparar estas variables medidas con los resultados de la predicción de mineralización a través del modelo desarrollado por Echeverría *et al.* (1994).

### **5.3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **5.3.1. Ensayo de campo**

Este ensayo se llevó a cabo durante la campaña 1995/96 en la Unidad Integrada Balcarce (UIB) (37° 45' S, 58° 18' W, 138 m.s.n.m.), sobre un complejo de suelos Argiudol Típico fino, mixto, térmico y Paleudol Petrocálcico fino, ilítico, térmico sin limitaciones físicas para el cultivo de T. Se seleccionaron las subparcelas testigo (sin el agregado de nitrógeno) de las secuencias soja-soja-trigo (SST), girasol-girasol-trigo (GGT), girasol-trigo-trigo (GTT) y maíz-maíz-trigo (MMT) de un ensayo de larga duración conducido desde 1984. Este trabajo se realizó sobre el cultivo de T del último año de cada una de ellas, o sea, realizado sobre cuatro antecesores inmediatos: S, G, T y M. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con tres repeticiones. Los trabajos de preparación del suelo fueron con arado de rejas y rastras de disco y

dientes. Los barbechos fueron iniciados inmediatamente después de la cosecha de los cultivos antecesores y tuvieron una duración de 219, 52, 121 y 107 días cuando los antecesores fueron T, S, G y M, respectivamente. Se utilizó la variedad de trigo pan Pro INTA Oasis, que se sembró el 18/8/95 con un espaciamiento entre líneas de 17.5 cm y una densidad de siembra de 400 semillas m<sup>-2</sup>. Se aplicaron 25 kg P ha<sup>-1</sup> como superfosfato triple de calcio en la línea de siembra y se controlaron las malezas según las recomendaciones para la zona.

Se tomaron muestras de suelo de las capas 0-20, 20-40, 40-70 y 70-100 cm en cinco momentos del ciclo del cultivo [pre-siembra (PS, 31/07/95), espiguilla terminal (ET, 19/10/95), pre-antesis (PA, 13/11/95), antesis (A, 21/11/95) y madurez fisiológica (MF, 18/12/95)] para determinar los contenidos de nitrógeno inorgánico (Nin) (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y de agua. Las muestras de las dos primeras capas se tomaron en todas las unidades experimentales, y las de las dos capas siguientes, se tomaron en una sola de las repeticiones. El contenido de agua fue determinado por el método gravimétrico y el contenido de Nin, por microdestilación por arrastre con vapor (Bremner, Keeney 1985) sobre extractos realizados con K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a partir de las muestras secadas al aire.

En ET, PA, A y MF se cortaron al ras del suelo las plantas de 3 tramos de surco al azar de 1 m de longitud, para determinar la acumulación de materia seca (MS, kg ha<sup>-1</sup>) y de nitrógeno total (Nt, kg N ha<sup>-1</sup>) en la parte aérea del cultivo. Las muestras se llevaron a estufa (con circulación forzada de aire a 60 °C) hasta peso constante y luego fueron molidas hasta pasar por tamiz de 1 mm. Se determinó el contenido de nitrógeno por micro-Kjeldahl (Bremner, Mulvaney 1982) y se calculó el Nt. En MF las muestras de plantas fueron fraccionadas en grano y resto de la planta y se hicieron las determinaciones por separado. La cosecha se realizó el 3/1/96 y los rendimientos fueron expresados en kg ha<sup>-1</sup> corregidos a 14% de humedad. De las muestras de grano

obtenidas en MF, se pesaron 3 grupos de 100 granos para calcular el peso de 1000 granos y el número de granos por m<sup>2</sup>.

Con los valores de  $N_{in}$ , y los de  $N_t$ , se realizó un balance simple de nitrógeno (Meisinger 1984) según:

$$N_{min} - N_{per} = N_{in(f)} + N_t - N_{in(i)} \quad (1)$$

donde  $N_{min}$  es el nitrógeno mineralizado,  $N_{per}$  es el nitrógeno perdido,  $N_{in(f)}$  es el  $N_{in}$  hasta 100 cm y  $N_t$  es el N acumulado en la parte aérea, para el estadio fenológico considerado, y  $N_{in(i)}$  es el  $N_{in}$  hasta 100 cm a la siembra del cultivo. Todos los términos se expresaron en kg N ha<sup>-1</sup>.

### 5.3.2. Ensayo de laboratorio

En PS se tomaron muestras compuestas de la capa 0-20 cm del suelo de cada unidad experimental y se tamizaron con tamiz de 4.8 mm a fin de separar todo el material vegetal. Posteriormente, fueron secadas al aire y molidas hasta pasar por tamiz de 2.0 mm y se les determinó el contenido de carbono orgánico mediante combustión húmeda (Nelson, Sommers 1982) y de nitrógeno orgánico por micro-Kjeldahl (Bremner, Mulvaney 1982).

Para la determinación de  $N_0$  y  $k$  se utilizó la metodología propuesta por Stanford y Smith (1972). En tubos de ensayo perforados en su base se colocó una mezcla de 10 g de suelo seco al aire y libre de restos vegetales mezclados con 30 g de arena fina. Además, se colocaron capas de arena gruesa por debajo y por encima de la mezcla suelo-arena separadas por discos de fibra de vidrio. Toda la arena utilizada había sido previamente lavada con HCl e NaOH. Los tubos fueron incubados a 35 °C con un contenido de agua equivalente a la capacidad de campo (0.033 MPa) durante 224 días. Se hicieron un lavado inicial, uno cada 14 días hasta los 28 días y uno cada 28 días hasta el final de la incubación, con 100 mL de CaCl<sub>2</sub> 0,01N y las determinaciones se

hicieron por microdestilación por arrastre con vapor (Bremner, Keeney 1985). Para la estimación de  $N_o$  y  $k$ , los valores obtenidos de nitrógeno mineralizado acumulado se ajustaron por regresión no lineal (algoritmo de Marquardt), a un modelo exponencial de un compartimiento (Stanford, Smith 1972).

### 5.3.3. Estimación del nitrógeno mineralizado

Para la estimación del N mineralizado durante el ciclo del cultivo de trigo se empleó el modelo simple propuesto por Echeverría *et al.* (1994) con un paso de cálculo diario:

$$N_{\min(t)} = \Sigma [(N_{oi} - N_{\min(p)}) * k_T * Y * 2,34] \quad (2)$$

donde  $N_{\min(t)}$  es el Nmin (kg N ha<sup>-1</sup>) hasta el día t,  $\Sigma$  es la sumatoria desde el día de la extracción de las muestras hasta el día t,  $N_{oi}$  es el  $N_o$  remanente (mg N kg<sup>-1</sup>),  $N_{\min(p)}$  es el Nmin (mg N kg<sup>-1</sup>) el día anterior,  $k_T$  es la  $k$  corregida por la temperatura del suelo a 10 cm de profundidad (d<sup>-1</sup>) para el día considerado, Y es la mineralización relativa de nitrógeno (sin unidades) en función del contenido de agua del suelo estimado a 20 cm de profundidad para el día considerado, y 2.34 es el factor de conversión de mg N kg<sup>-1</sup> a kg N ha<sup>-1</sup> (densidad aparente de 1.17 Mg m<sup>-3</sup>). Para la estimación del  $N_{\min(t)}$  hasta los 100 cm de profundidad se asumió que el resto del perfil (20 a 100 cm) mineralizó un 40 % de lo mineralizado de 0-20 cm (H. Echeverría, comunicación personal). El modelo descrito por la ecuación 2, fue aplicado a partir del día de la extracción de las muestras de suelo. Por tanto, para la estimación del Nmin durante el ciclo del cultivo, el estimado desde aquel momento hasta la siembra, fue restado al resultado de la ecuación 2 y sumado al  $N_{in(i)}$  en la ecuación 1.

La corrección de la  $k$  por temperatura y el factor Y de la ecuación 2 fueron calculados según lo descrito por Echeverría *et al.* (1994). La temperatura absoluta media diaria del suelo a 10 cm de profundidad fue estimada a partir de la temperatura

del aire con las fórmulas propuestas por Navarro Duymovich *et. al.* (1985). Para ello se recurrió a las temperaturas medias diarias del aire registradas en la Estación Meteorológica de la UIB. Los valores de contenido de agua en el suelo óptimo para la mineralización de nitrógeno (-0.01 MPa) y aquél en que el proceso se detendría por completo (-4.00 MPa), se estimaron según Travasso y Suero (1994). Los valores de contenido de agua en los primeros 20 cm del perfil fueron estimados con un paso de cálculo diario a través de un balance hídrico sencillo. Para ello se utilizaron las precipitaciones y la evapotranspiración potencial diarias (Estación Meteorológica de la UIB) y el coeficiente de evapotranspiración del cultivo y la proporción de agua consumida por el cultivo de los primeros 20 cm de perfil (A. Irigoyen, comunicación personal).

#### **5.3.4. Relación entre la estimación de la mineralización y el ensayo de campo**

El trigo no sufrió déficits de agua que pudieran haber comprometido su rendimiento a pesar de la sequía ocurrida durante el invierno de 1995 (datos no mostrados). La forma en que fueron realizados los laboreos y las precipitaciones ocurridas durante el período crítico del cultivo (aproximadamente desde 15 días antes de A hasta 15 días después, Abbate *et al.* 1994), permitieron que el contenido de agua del perfil fuera igual o superior al 40% de agua útil durante la mayor parte del ciclo. En estas condiciones, es factible asumir que las pérdidas gaseosas de nitrógeno fueron despreciables (Videla *et al.* 1996; Picone, Videla 1998) y que aquéllas por lavado también lo fueron cuando el cultivo estaba absorbiendo nitrógeno activamente. Por lo tanto, se pudo asumir que  $N_{per}$  (ecuación 1) fue 0, lo que permitió hacer la comparación entre el  $N_{min}$  estimado por el modelo (ecuación 2) y el calculado con el balance a lo largo del ciclo del trigo (ecuación 1).

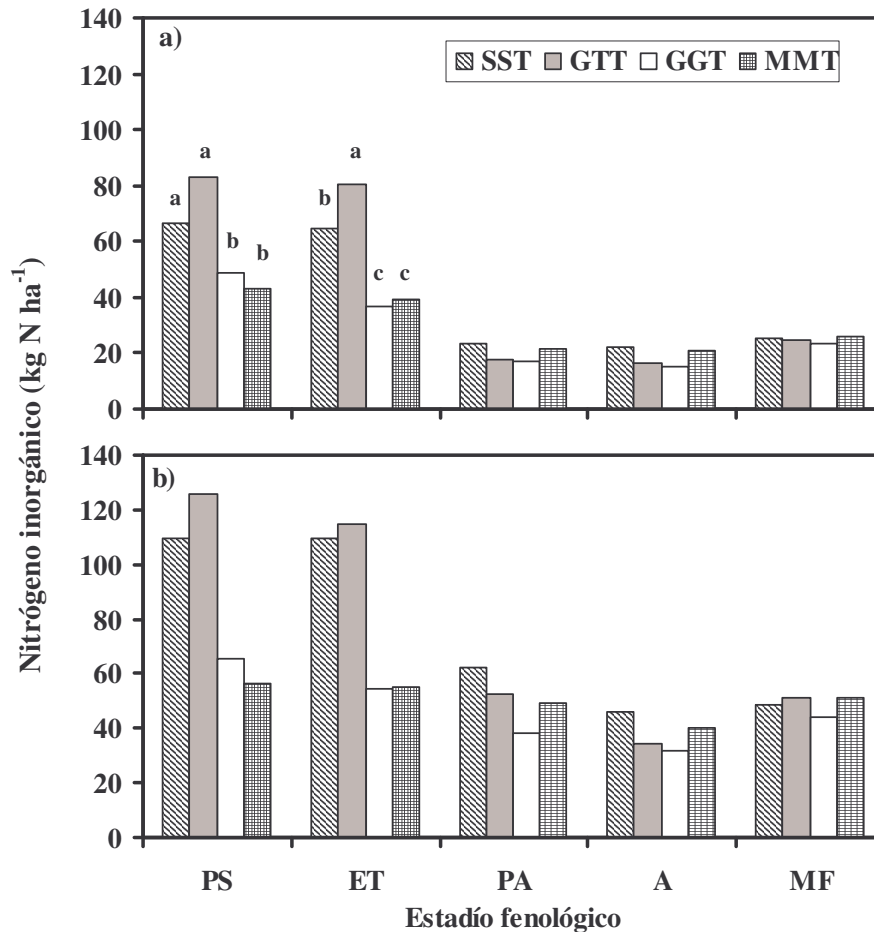


## 5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.4.1. Ensayo de Campo

Las secuencias GGT y MMT (antecesores G y M, respectivamente) presentaron significativamente ( $P < 0,05$ ) menores contenidos de  $N_{in}$  en los primeros 40 cm del perfil en los momentos PS y ET (Figura 5.1a) que las secuencias GTT y SST. La duración del barbecho cuando el antecesor fue T y la calidad del rastrojo del antecesor cuando éste fue S podrían asociarse a una mayor mineralización de nitrógeno lo que, junto con la mayor inmovilización provocada por la relación C/N más elevada de los rastrojos de G y de M (Lázaro 1996; Sánchez *et al.* 1998), serían las causas de tales resultados. Las tendencias también fueron así al considerar el  $N_{in}$  en el perfil de 100 cm (Figura 5.1b). Luego de ET los contenidos de  $N_{in}$  del suelo disminuyeron en todos los tratamientos debido al comienzo del período de más intenso consumo de nitrógeno por parte del T (Abbate *et al.* 1994).

En la Figura 5.2 se presenta la acumulación de MS y de Nt en la parte aérea del cultivo. Cuando el antecesor fue M, la acumulación de MS y de Nt fue significativamente menor ( $P < 0,05$ ) que en el resto de los tratamientos en todos los momentos de muestreo. La acumulación de MS en los otros tratamientos difirió significativamente ( $P < 0,05$ ) entre ellos sólo en MF ( $SST > GTT > GGT$ ) aunque ese ordenamiento se observó también en el resto de los momentos. La acumulación de Nt en SST, GTT y GGT siguió tendencias similares a la de acumulación de MS, pero las diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre ellos comenzaron a manifestarse a partir de PA. Estos resultados coinciden con los reportados por Lázaro (1996) para otras parcelas testigo de ese ensayo quien encontró que con antecesor M, la tasa de crecimiento del cultivo de trigo durante el período de crecimiento de las espigas, había

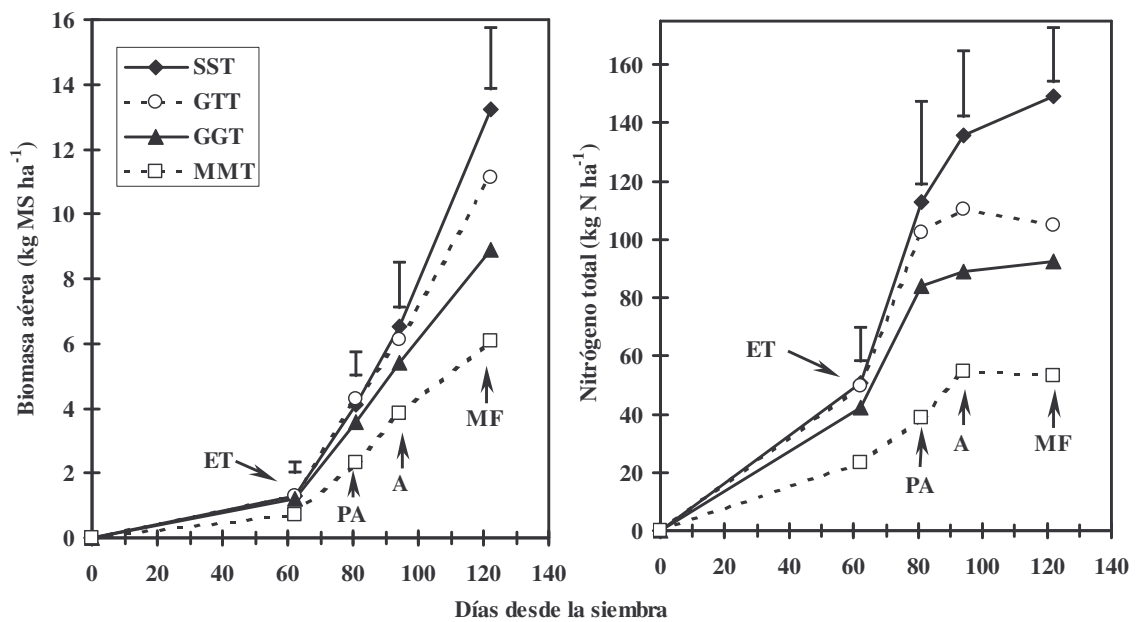


**Figura 5.1.** Contenido de nitrógeno inorgánico en los primeros 40 cm de suelo (a) y hasta 100 cm de profundidad (b) en pre-siembra (PS), espiguilla terminal (ET), pre-anthesis (PA), anthesis (A), madurez fisiológica (MF) del trigo con distintos antecesores (soja (SST), trigo (GTT), girasol (GGT), maíz (MMT)). Las barras acompañadas por la misma letra no difieren significativamente ( $P < 0.05$ ).

Figure 5.1. Inorganic nitrogen content in the surface 40 cm of soil profile (a) and up to 100 cm depth (b) at pre-sowing (PS), terminal spikelet (ET), pre-anthesis (PA), anthesis (A), physiological maturity (MF) of wheat after different preceding crops (soybean (SST), wheat (GTT), sunflower (GGT), maize (MMT)). The columns accompanied by the same letter are not significantly different ( $P < 0.05$ ).

sido 48, 34 y 24% menor que cuando los antecesores habían sido T, S y G, respectivamente. Las diferencias en acumulación de MS provocaron diferencias en la interceptación de radiación fotosintéticamente activa y en la eficiencia de su utilización. Estos resultados fueron atribuidos al efecto de los antecesores sobre la dinámica de

nitrógeno en el suelo, ya que el agregado de fertilizante nitrogenado redujo las diferencias entre tratamientos. Resultados similares fueron informados por Debaeke *et al.* (1996).



**Figura 5.2. Acumulación de materia seca (MS) (a) y de nitrógeno (b) en la biomasa aérea hasta la madurez fisiológica del trigo con distintos antecesores (soja (SST), trigo (GTT), girasol (GGT), maíz (MMT)). ET= espiguilla terminal, PA= pre-anthesis; A= anthesis; MF= madurez fisiológica. Las barras indican diferencia mínima significativa ( $P < 0.05$ ).**

Figure 5.2. Dry matter (MS) (a) and nitrogen (b) accumulation in the aboveground biomass until physiological maturity of wheat after different preceding crops (soybean (SST), wheat (GTT), sunflower (GGT), maize (MMT)). ET=terminal spikelet, PA=pre-anthesis, A=anthesis, MF=physiological maturity. The bars indicate the least significant difference ( $P < 0.05$ ).

Todos los tratamientos difirieron significativamente ( $P < 0.05$ ) entre sí en rendimiento (5602, 4361, 3649 y 2429 kg ha<sup>-1</sup> para SST, GTT, GGT y MMT, respectivamente). El orden de los tratamientos en rendimiento fue igual al observado en acumulación de MS y de N total en la biomasa aérea (Figura 5.2), confirmando a través del rendimiento en grano el efecto de los antecesores sobre la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo (Lázaro 1996).

Cabe aclarar que, a pesar de los mayores contenidos de  $N_{in}$  en las capas superiores del suelo (Figura 5.1a), el T sobre T presentó menores valores que sobre S de MS y Nt y de rendimiento. La elevada frecuencia de T en la secuencia puede hacer que perduren propágulos de *Gaeumannomyces graminis tritici*, elevando el riesgo de ocurrencia del "pietín", enfermedad que en estadios tempranos del cultivo podría limitar la capacidad del cultivo para absorber agua y nutrientes (A. Melegari, comunicación personal).

#### 5.4.2. Ensayo de laboratorio y estimación de mineralización

No hubo diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre secuencias en contenido de nitrógeno orgánico ( $2.4 \pm 0.1 \text{ g kg}^{-1}$ ), pero sí las hubo ( $P < 0.05$ ) en contenido de carbono orgánico. La secuencia MMT presentó los valores significativamente más altos ( $35.6 \text{ g kg}^{-1}$ ), mientras que las secuencias GTT y GGT no difirieron entre sí ( $31.8$  y  $32.3 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente), pero si lo hicieron de SST ( $28.8 \text{ g kg}^{-1}$ ). Estos resultados coinciden con los reportados por Studdert y Echeverría (2000). Cabe destacar que el orden de los tratamientos de acuerdo con el contenido de carbono orgánico (MMT > GGT > GTT > SST) es inverso al mencionado para las variables de cultivo.

Hubo diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre secuencias en  $N_0$  y en  $k$  (Tabla 5.1). Sólo la  $k$  de la secuencia GTT fue significativamente ( $P < 0.05$ ) menor que la del resto de las secuencias, posiblemente debido a una intensa mineralización de las fracciones más lábiles de la materia orgánica durante el prolongado barbecho (219 días). Los valores de  $k$  obtenidos en esta experiencia fueron similares a los reportados por Rizzalli *et al.* (1984) y Echeverría *et al.* (1994) para suelos del mismo tipo. Por otro lado, el orden de los  $N_0$  de las secuencias de cultivos fue muy similar al de los contenidos de carbono orgánico (MMT > GGT  $\approx$  GTT > SST), siendo el  $N_0$  de la secuencia MMT significativamente ( $P < 0.05$ ) mayor que el de la secuencia SST. Mayores

**Tabla 5.1. Resultados del ajuste no lineal de la ecuación  $N_m = N_o' (1 - e^{-kt})$  (Stanford, Smith 1972).  $N_m$ = nitrógeno mineralizado al tiempo  $t$ ,  $N_o'$ = nitrógeno potencialmente mineralizable (sin considerar Extramin.),  $k$ = constante de mineralización,  $t$ = tiempo de incubación (d), Extramin.=  $N_m$  durante los primeros 14 d de incubación,  $N_o = N_o'$  más Extramin., S= soja, T= trigo, G= girasol, M= maíz.**

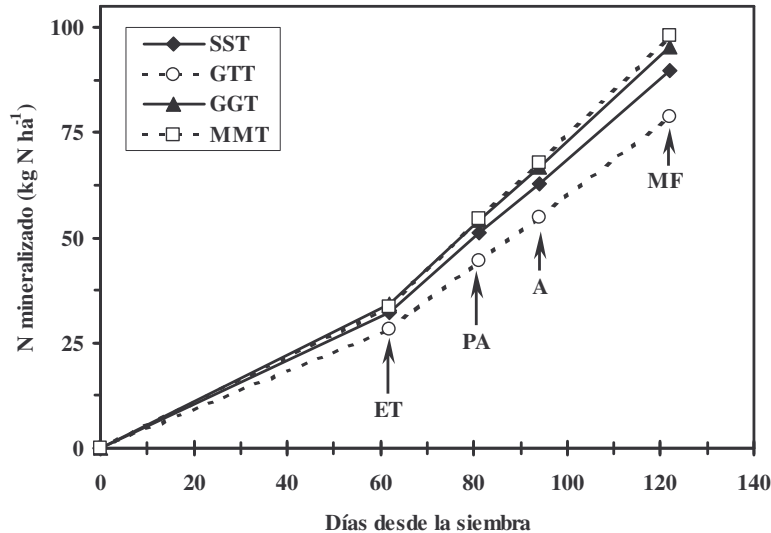
*Table 5.1. Results of the non-linear fitting of the equation  $N_m = N_o' (1 - e^{-kt})$  (Stanford, Smith 1972).  $N_m$ = mineralized nitrogen at time  $t$ ,  $N_o'$ = potentially mineralizable nitrogen (excluding Extramin.),  $k$ = mineralization constant,  $t$ = incubation time (d), Extramin.=  $N_m$  during the first 14 d of incubation,  $N_o = N_o'$  plus Extramin., S=soybean; T=wheat; G=sunflower; M=maize.*

Secuencia	$N_o'$ mg N kg <sup>-1</sup>	k d <sup>-1</sup>	Extramin. ----- mg N kg <sup>-1</sup> -----	$N_o$ -----	R <sup>2</sup>
SST	116.5	0.0071	28.6	145.0	0.99
GTT	130.6	0.0056	28.0	158.6	0.99
GGT	123.6	0.0069	34.0	157.6	0.99
MMT	137.8	0.0066	34.0	171.7	0.99
CV (%)*	6.7	5.4	14.7	6.5	-
DMS <sub>0,05</sub> *	NS*	0.0007	NS*	20.5	-

\* CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa; NS: no significativo.

contenidos de carbono orgánico total se asocian, por lo general, a mayores contenidos de carbono orgánico lábil (Casanovas *et al.* 1995), que presentan una tasa de reciclo más elevada y se asocian a mayores potenciales de mineralización (Curtin, Wen 1999). Zielke y Christenson (1986) encontraron una relación lineal entre el contenido de carbono orgánico de suelos bajo diferentes rotaciones y su potencial de mineralización. Asimismo, aquellos autores encontraron que la mayor frecuencia de M en la secuencia, se relacionaba con mayores contenidos de carbono orgánico y, por lo tanto, con mayores potenciales de mineralización, tal como se observó en este ensayo (Tabla 5.1).

En la Figura 5.3 se presentan los resultados de la aplicación del modelo descrito por la ecuación 2. El orden de las secuencias de cultivos en lo que respecta a



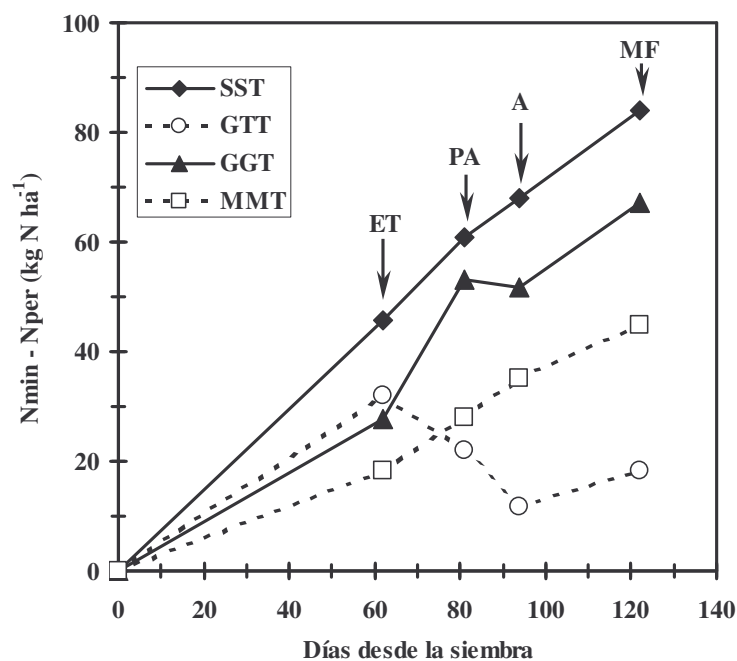
**Figura 5.3.** Nitrógeno mineralizado a partir del suelo bajo distintas condiciones de manejo (secuencias de cultivo) acumulado hasta distintos estadios fenológicos del cultivo de trigo, estimado con el modelo propuesto por Echeverría *et al.* (1994). Secuencias SST= soja-soja-trigo; GTT= girasol-trigo-trigo; GGT= girasol-girasol-trigo; MMT= maíz-maíz-trigo; ET= espiguilla terminal; PA= pre-antesis; A= antesis; MF= madurez fisiológica.

Figure 5.3. Mineralized nitrogen from soil under different crop sequences, accumulated until different stages of wheat, estimated with the model proposed by Echeverría *et al.* (1994). SST= soybean-soybean-wheat sequence; GTT= sunflower-wheat-wheat sequence; GGT= sunflower-sunflower-wheat sequence; MMT= maize-maize-wheat sequence; ET= terminal spikelet, PA= pre-anthesis, A= anthesis, MF= physiological maturity.

mineralización de nitrógeno estimada (MMT>GGT>SST>GTT) fue igual al observado para el producto ( $k^*N_0$ ) (1.13; 1.09; 1.03 y 0.89 mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para MMT, GGT, SST y GTT, respectivamente, Tabla 5.1) que, según Mary y Remy (1979), es un mejor indicador del potencial de mineralización de un suelo para poder comparar entre distintas situaciones. Los valores de nitrógeno mineralizado durante el ciclo del cultivo de T hasta los 100 cm de profundidad fueron 98.1; 95.4; 89.7y 78.9 kg N ha<sup>-1</sup> para MMT, GGT, SST y GTT, respectivamente.

### 5.4.3. Relación entre la estimación de la mineralización y el ensayo de campo

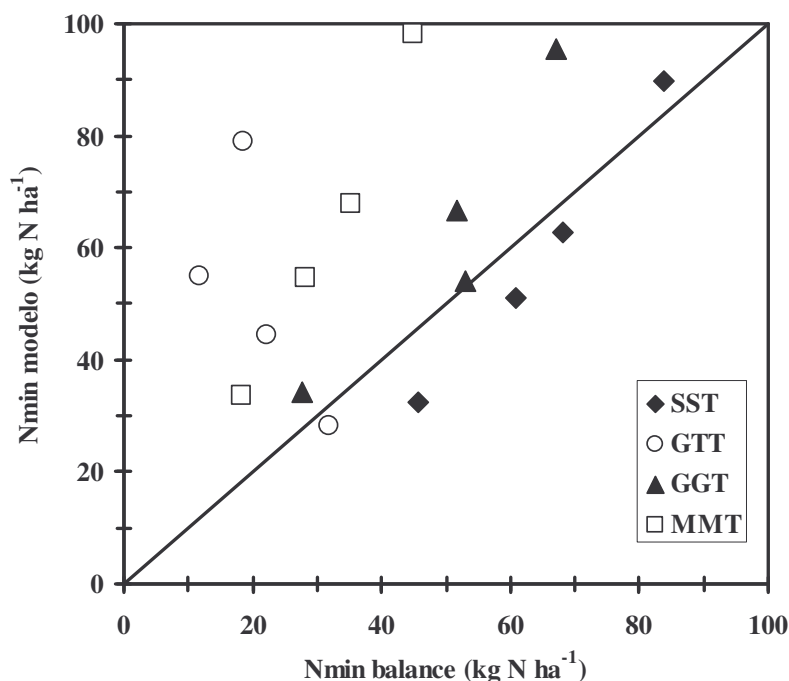
Cuando los antecesores fueron S, G, y M, los resultados del balance de nitrógeno ( $N_{min}-N_{per}$ , ecuación 1) en todos los momentos de muestreo respondieron al orden  $SST > GGT > MMT$  (Figura 5.4). Dicho orden es el mismo que se verificara para



**Figura 5.4. Resultados del balance de nitrógeno en el sistema suelo-planta hasta los 100 cm de profundidad para distintos estadios fenológicos del cultivo de trigo con distintos antecesores (soja (SST), trigo (GTT), girasol (GGT) y maíz (MMT)).  $N_{min}$ =M mineralizado;  $N_{per}$ =N perdido; ET=espiguilla terminal; PA=pre-anthesis; A=anthesis; MF=madurez fisiológica.**

*Figure 5.4. Results of the nitrogen budget in the soil-crop system up to the first 100 cm of the soil profile for different stages of wheat after different preceding crops (soybean (SST), wheat (GTT), sunflower (GGT), maize (MMT)). ET=terminal spikelet, PA=pre-anthesis, A=anthesis, MF=physiological maturity.*

acumulación de MS y de  $N_t$  en la parte aérea (Figura 5.2) y rendimiento en grano. Por otro lado, el mencionado orden es opuesto al observado para  $N_o$ , para el producto ( $k \cdot N_o$ ) y, consecuentemente, para el nitrógeno mineralizado estimado según el modelo utilizado (ecuación 2, Figura 5.3). En la Figura 5.5 se presenta la comparación entre



**Figura 5.5. Comparación del nitrógeno mineralizado a partir del suelo (Nmin) estimado con el modelo propuesto por Echeverría *et al.* (1994) con el calculado por balance durante el ciclo del cultivo de trigo bajo distintas secuencias de cultivo. SST= secuencia soja-soja-trigo; GTT= secuencia girasol-trigo-trigo; GGT= secuencia girasol-girasol-trigo; MMT= secuencia maíz-maíz-trigo. La recta indica la relación 1:1.**

*Figure 5.5. Comparison of mineralized soil nitrogen (Nmin) estimated with the model proposed by Echeverría *et al.* (1994) with the mineralized soil nitrogen calculated through a nitrogen budget during wheat growing season under different crop sequences. SST= soybean-soybean-wheat sequence; GTT= sunflower-wheat-wheat sequence; GGT= sunflower-sunflower-wheat sequence; MMT= maize-maize-wheat sequence. The line indicates the relation 1:1.*

esta última variable y el Nmin calculado con el balance a lo largo del ciclo del T. Los puntos ubicados a la derecha de la línea 1:1 indican que el modelo subestima el Nmin, ya que en las fracciones evaluadas se recuperó más nitrógeno que el que teóricamente habría estado disponible para el cultivo. Por otro lado, los puntos ubicados a la izquierda de la línea denotan que según el modelo debería haberse recuperado más nitrógeno que el que efectivamente se recuperó, lo que posiblemente se deba a que el nitrógeno mineralizado durante el ciclo del cultivo se encontrara en fracciones no



evaluadas en este estudio (p.e. inmovilizado en la biomasa microbiana o en alguna otra fracción orgánica transitoria).

Durante todo el período, el antecesor M se asoció a mayores cantidades de nitrógeno que no fue recuperado en ninguna de las fracciones evaluadas (Figura 5.5), lo que podría deberse a la relación C/N de sus residuos, que provoca una mineralización lenta y una intensa inmovilización del nitrógeno por los microorganismos del suelo (Sánchez *et al.* 1998). El antecesor G tuvo un comportamiento similar al anterior, aunque de menor magnitud que el antecesor M. Por su parte, el antecesor S provocó puntos hacia la derecha de la relación 1:1 durante una buena parte del ciclo del cultivo (Figura 5.5). Esto estaría poniendo de manifiesto la existencia de alguna fuente adicional de nitrógeno mineralizado no contemplada en la ecuación 1. Tales fuentes podrían ser, por un lado, los residuos de S que se habrían descompuesto rápidamente debido a su baja relación C/N (Sánchez *et al.* 1998) y, por el otro, la extramineralización de la materia orgánica del suelo que podría asociarse con la incorporación de material de las características de los residuos de S en el suelo.

El antecesor T presentó puntos hacia la izquierda de la relación 1:1 durante la mayor parte del ciclo del T (Figura 5.5). La existencia de esta relación entre el  $N_{min}$  estimado y el calculado podría estar indicando también que se produjeron pérdidas de nitrógeno más elevadas que las esperadas. En el caso del antecesor T, esto podría haberse debido a pérdidas por lavado del nitrógeno disponible ( $N_{in} + N_{min}$ ) ya que su absorción habría estado limitada por el pietín, que afecta la capacidad del cultivo para absorber agua y nutrientes.

### **5.5. CONCLUSIONES**

Se puso de manifiesto un antagonismo entre los efectos de corto plazo (provocados por los residuos del antecesor inmediato) y los de largo plazo (provocados por la secuencia en el tiempo), ya que el antecesor S, que se asoció con el mejor comportamiento del T, formó parte de la secuencia que produjo los menores potenciales de mineralización de nitrógeno a partir del suelo y, con ello, la estimación más baja de Nmin. Con el antecesor M y la secuencia en que intervenía este cultivo sucedió lo contrario. Estas relaciones estarían poniendo de manifiesto que el modelo propuesto por Echeverría *et al.* (1994), si bien de cierta utilidad para realizar estimaciones de la cantidad de nitrógeno que sería capaz de mineralizar un suelo a partir de su *pool* mineralizable, presenta dificultades para ser usado independientemente de otras variables que influyen sobre la dinámica del nitrógeno en el suelo para predecir la cantidad de ese nutriente que estaría efectivamente disponible para un cultivo de T. El logro de una mejor capacidad predictiva del modelo requeriría de la predicción del efecto de corto plazo de la presencia en el sistema de material vegetal en descomposición en función de su calidad, cantidad y forma física.

### **5.6. AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento al personal de campo y de laboratorio de la UIB por la ayuda prestada para la realización de este trabajo. Trabajo financiado por el Proyecto de Investigación Estratégica del INTA 80-033, el Proyecto de Investigación de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNMP) 15/A060 y el Proyecto PICT-97 08-00089.

### **5.7. BIBLIOGRAFÍA**

- 
- Abbate P E, Andrade F, Culot J P. 1994. Determinación del rendimiento en trigo. Boletín técnico N°133. EEA INTA Balcarce. 17pp.
- Badaruddin M, Meyer D W. 1994. Grain legume effects on soil nitrogen, grain yield, and nitrogen nutrition of wheat. *Crop Sci.*, 34:1304-1309.
- Bremner J, Keneey D. 1985. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrite, and nitrate. *Annal. Chem. Acta*, 32:485-495.
- Bremner J M, Mulvaney C. 1982. Nitrogen total. In: Page A L *et al.* (eds.) *Methods of soil analysis. Part 2 Agron. Monog 9 ASA and SSSA*, Madison, Wisconsin, EEUU. pp. 595-624.
- Casanovas E M, Studdert G A, Echeverría H E. 1995. Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. II. Efecto de los ciclos de agricultura y pastura. *Ciencia del Suelo* 13:21-27.
- Curtin D, Wen G. 1999. Organic matter fractions contributing to soil nitrogen mineralization potential. *Soil Sci. Soc. Am.* 63:410-415.
- Debaeke Ph, Aussenac Th, Fabre J L, Hilaire A, Pujol B, Thuries L. 1996. Grain nitrogen content of winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) as related to crop management and to the previous crop. *European J. Agron.*, 5:273- 286.
- Echeverría H, Bergonzi R, Ferrari J. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 12:56-62.
- Keeney D R, Nelson D W. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page A L *et al.* (eds.) *Methods of soil analysis. Part 2 Agron. Monog 9 ASA and SSSA*, Madison, Wisconsin, EEUU. pp. 643-698.
- Lázaro L. 1996. Determinación del rendimiento de trigo ante cambios en la disponibilidad de nitrógeno generados por distintos cultivos antecesores. Tesis

- 
- de *Magister Scientiae*. Curso de Post-Grado en Producción Vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires. 41 pp.
- Loiseau P, Chaussod R, Delpy R. 1994. Soil microbial biomass and in situ nitrogen mineralization after 20 years of different nitrogen fertilization and forage cropping systems. *European J. Agron.*, 3:327-332.
- Mary B, Remy J C. 1979. Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande culture. 1 Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique humifiée. *Ann. Agron.* 30:513-527.
- Meisinger J J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. In: Hauck R D (ed.) *Nitrogen in crop production*. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, EEUU. pp.391-416.
- Navarro C, Echeverría H, Fonalleras M, Manavella, F. 1991. Efecto de los contenidos de humedad sobre la mineralización del nitrógeno en suelos del Sudeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 9:13-19.
- Navarro Duymovich M, Della Maggiora A, Vidal N. 1985. Estimación de la temperatura media mensual del suelo en función de parámetros climáticos para Balcarce (provincia de Buenos Aires). Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias- Estación Experimental Agropecuaria Balcarce. 14 pp.
- Nelson D W, Sommers L E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page A L *et al.* (eds.) *Methods of soil analysis*. Part 2 Agron. Monog 9 ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, EEUU. pp.539-579.
- Picone L I, Videla C. 1998. Relaciones entre la tasa de desnitrificación y el contenido de nitratos, humedad y carbono orgánico soluble del suelo en un cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo*, 16:77-82.

- Rice C W, Havlin J L. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. In: Havlin J L, Jacobsen, J S (eds) Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations. SSSA Sp. Pub. 40. Soil Sci. Soc. Am., Madison Wisconsin, EEUU. pp. 1-13.
- Rizzalli R H, Navarro C A, Echeverría H E. 1984. Efecto del manejo y estación del año sobre la capacidad de mineralización y biomasa total en un Argiudol típico del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 2:61-67.
- Sánchez S R, Studdert G A, Echeverría H E. 1998. Dinámica de la mineralización del nitrógeno de residuos en descomposición en un Argiudol típico. *Ciencia del Suelo*, 16:1-6.
- Stanford G, Smith S J. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36:465-472.
- Studdert G A, Echeverría H E. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:en prensa.
- Studdert G A, Rizzalli R H. 1994. Rotaciones mixtas: efecto de los años de agricultura sobre el rendimiento del trigo. In: Actas "III Congreso Nacional de Trigo y Primer Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño Invernal", Bahía Blanca, Buenos Aires, 26-28 de octubre de 1994. pp. 93-94.
- Travasso M I, Suero E E. 1994. Estimación de la capacidad de almacenaje de agua en suelos del sudeste bonaerense. *Boletín técnico N°125*. EEA INTA Balcarce, 9 pp.
- Videla, C; Ferrari, J; Echeverria, H E y Travaso, M I. 1996. Transformación del nitrógeno en un cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo* 14: 1-6.
- Zielke R C, Christenson D R. 1986. Organic carbon and nitrogen changes in soil under selected cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am.* 50:363-367.

# 6. CAPÍTULO IV

## 6. CAPÍTULO IV

### RELACIÓN ENTRE EL CULTIVO ANTECESOR Y LA DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO PARA EL TRIGO EN LA ROTACIÓN

### RELATIONSHIP BETWEEN THE PRECEDING CROP AND NITROGEN AVAILABILITY FOR WHEAT IN THE ROTATION

**Guillermo Alberto Studdert\*, Hernán Eduardo Echeverría**

Unidad Integrada Facultad Ciencias Agrarias (UNMP) - EEA INTA Balcarce, C.C. 276, (7620) Balcarce, Argentina. \*Correo electrónico: gstuddert@balcarce.inta.gov.ar

Recibido 12 de septiembre de 2005

**Keywords:** *Triticum aestivum*; preceding crops; nitrogen nutrition; organic matter; crop rotations.

#### 6.1. RESUMEN

El efecto de las características de los residuos de los antecesores sobre la disponibilidad de N para el trigo (*Triticum aestivum* L.) puede enmascarar los cambios en la capacidad del suelo para proveerlo debidas al manejo y debería ser tenido en cuenta para el diagnóstico de la fertilidad nitrogenada. El objetivo de este trabajo fue evaluar la evolución en el tiempo de los rendimientos (RR) y de la acumulación de MS (MSR) y de N (NR) en la biomasa aérea relativos del trigo sobre distintos antecesores. En dos ensayos de rotaciones de larga duración en Balcarce se analizó la variación de los RR, MSR y NR a lo largo de los años de agricultura con labranza convencional sobre papa (*Solanum tuberosum* L.), soja (*Glycine max* L. Merr.), trigo, girasol (*Helianthus annuus* L.) y maíz (*Zea mays* L.). Las tres variables mostraron una reducción con los

años de agricultura hasta niveles diferentes según cuál hubiera sido el antecesor. Las características de los residuos y/o la forma en que éstos fueron manejados hicieron que los RR, MSR y NR sobre soja, papa y trigo, fueran los más elevados y sobre maíz, los más bajos. Tal variación en las tres variables no se asoció, en general, con los cambios en la materia orgánica del suelo debidos al manejo. El efecto de corto plazo de los residuos y su manejo sobre el ciclo inmovilización-mineralización de N determinó la disponibilidad de N para el trigo, independientemente de cómo la rotación afectó la capacidad del suelo para proveerlo.

**Palabras clave:** *Triticum aestivum*; antecesores; nutrición nitrogenada, materia orgánica; rotaciones.

## 6.2. ABSTRACT

The effect of preceding crop residue characteristics on N availability for wheat (*Triticum aestivum* L.) may mask the changes in soil capability to provide N due to management. Preceding crop effects should be taken into account to diagnose N fertility. The aim of this work was to evaluate wheat relative yields (RR) and aboveground dry matter (MSR) and N accumulation (NR) in time after different preceding crops. In two long term crop rotation experiments at Balcarce (on a complex of Typic Argiudoll and Petrocalcic Paleudoll) the variation of RR, MSR and VR along years under cropping with conventional tillage, was analyzed. The preceding crops were potato (*Solanum tuberosum* L.), soybean (*Glycine max* L. Merr.), wheat, sunflower (*Helianthus annuus* L.) and maize (*Zea mays* L.). All three variables showed a decrease along cropping years, but up to different levels according to which had been the preceding crop. Residue characteristics and/or the way they had been managed before wheat seeding made that RR, MSR and NR after soybean, potato and wheat



were higher .On the other hand, wheat RR, MSR, NR after maize were the lowest. These effects were associated with the role of residues on N mineralization-immobilization cycle. In general, the variation in wheat RR, MSR and NR along cropping years was not associated with changes in soil organic matter due to soil management under cropping. The short term effect of preceding crop residues and of its management on N dynamics defined the amount and timing of the availability of N for wheat. This was independently of the effect of the rotation on the capability of the soil to mineralize N due to how the residues intervene on the cycle mineralization-immobilization.

**Keywords:** *Triticum aestivum*; preceding crops; nitrogen nutrition; organic matter; crop rotations.

### 6.3. INTRODUCCIÓN

El éxito, la eficiencia y la seguridad ambiental de la fertilización nitrogenada son altamente dependientes de la predicción que pueda hacerse de la cantidad de nitrógeno (N) que aporte el suelo y de la sincronía entre éste y los requerimientos de los cultivos (Willson *et al.* 2001). Sin embargo, las recomendaciones de fertilización son hechas a menudo sobre la base de información insuficiente acerca del suministro de N a partir de distintas fuentes (tejidos vegetales, materia orgánica) en el suelo (Meisinger 1984). La evaluación de la disponibilidad de N para los cultivos, además de tener en cuenta el N mineral disponible a la siembra (González Montaner *et al.* 1991; Calviño *et al.* 2002), debería cuantificar la capacidad del suelo de ir proveyéndolo a lo largo de su estación de crecimiento (Rice & Havlin 1994; Echeverría *et al.* 1994; Walley *et al.* 2002) en concordancia con la demanda del cultivo.

Tanto la disponibilidad inicial como el aporte posterior de N responden a complejas relaciones entre los factores que afectan la mineralización del N orgánico y

la inmovilización del N mineral (Loiseau *et al.* 1994, Walley *et al.* 2002). El sentido, la magnitud y el resultado final de tales relaciones son determinados por las condiciones ambientales y son definitivamente definidos por la influencia de las decisiones de manejo tales como, entre otras, las labranzas, la cantidad y la calidad de los residuos devueltos al suelo y la duración de los períodos de barbecho (Echeverría *et al.* 1992; Berardo 1994; Studdert & Rizzalli 1994; Heenan 1995; Studdert & Echeverría 2000; Studdert *et al.* 2000; Calviño *et al.* 2002).

Los suelos presentan distinta capacidad potencial de proveer N a las plantas a partir de la mineralización de su materia orgánica y ésta puede ser caracterizada por el N potencialmente mineralizable ( $N_0$ ) (Echeverría *et al.* 1994). La determinación del  $N_0$  por incubación del suelo incluye indirectamente una medida de la inmovilización dado que expresa la mineralización neta potencial (Walley *et al.* 2002), aunque no tiene en cuenta elementos que en el suelo alteran dichos procesos. El  $N_0$  de un suelo refleja el efecto de las prácticas de manejo sobre su capacidad relativa para suministrar nitrógeno (Studdert & Echeverría 2000; Studdert *et al.* 2000) y puede ser utilizado para predecir el N que será mineralizado para los cultivos a través de modelos sencillos (Echeverría *et al.* 1994). Sin embargo, tales modelos pueden no cumplir plenamente con su objetivo si no tienen en cuenta otras variables que influyen sobre la dinámica del N en el suelo, tales como las características de los residuos de los cultivos antecesores (Studdert *et al.* 2000). La calidad, la cantidad y la forma física de los residuos vegetales incorporados al suelo influyen sobre la dinámica del N. Residuos con relación carbono (C)/N (C:N) elevada provocan una intensa inmovilización del N mineral del suelo y por lo general se descomponen lentamente, lo que mantiene por más tiempo la situación de inmovilización. Por otro lado, con residuos con baja relación C:N, ocurre lo contrario (Sánchez *et al.* 1998).

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es uno de los cultivos más sensibles a los cambios producidos por las prácticas de manejo sobre la dinámica del N en el suelo (Echeverría *et al.* 1992; Berardo 1994, Lázaro 1996). Studdert & Rizzalli (1994) demostraron que los rendimientos relativos de trigo disminuyeron con los años de agricultura con labranza convencional luego de una pastura, asociando tal disminución con la caída de materia orgánica del suelo que ello provocaba (Studdert *et al.* 1997). No obstante, se ha identificado al cultivo antecesor como uno de los factores que condiciona los rendimientos del trigo en la Región Pampeana argentina (Sain & Jáuregui 1993; Álvarez 2004). El antecesor influencia el momento y la cantidad de mineralización del N, como así también la cantidad y el momento de absorción del nutriente por el trigo siguiente (Debaeke *et al.* 1996). Echeverría *et al.* (1992) y Lázaro (1996) concluyeron que en Balcarce la mayor parte del efecto de los antecesores sobre el rendimiento y el crecimiento del cultivo, se debió a cambios en la disponibilidad de N. Echeverría *et al.* (1992) comprobaron, además, que tal efecto era sólo del antecesor inmediato ya que los previos a éste no tuvieron efecto sobre el rendimiento del trigo. Studdert *et al.* (2000) demostraron que el efecto de los residuos de los cultivos antecesores al trigo sobre la disponibilidad de N hizo que el N<sub>0</sub> resultante de distintas rotaciones no se reflejara en la nutrición del cultivo. Se pone así de manifiesto que el N disponible para los cultivos puede estar determinado por las reacciones de corto plazo provocadas por las características de los residuos de los antecesores, pudiendo enmascarar los cambios en la capacidad para proveer N a que esté sometido el suelo como consecuencia del manejo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la evolución de los rendimientos y de la acumulación de MS y de N en la biomasa aérea del cultivo de trigo sobre distintos antecesores a lo largo de rotaciones agrícolas y mixtas. Se analizará además la relación

de aquellas variables con la evolución del contenido de materia orgánica en la capa arable del suelo.

## **6.4. MÉTODOS**

Se evaluó la variación de los rendimientos y de la acumulación de materia seca (MS) y de N en la biomasa aérea de trigo en función de diferentes antecesores durante dos experimentos de larga duración en condiciones de secano. Estos experimentos fueron conducidos en Balcarce, (37° 45' S, 58° 18' W, 130 m sobre el nivel del mar) sobre un complejo de Argiudol Típico fino, mixto, térmico y de Paleudol Petrocálcico fino, ilítico, térmico (el horizonte petrocálcico estuvo por debajo de los 0.7 m) con 2% de pendiente (sin erosión). El horizonte superficial del complejo tiene textura franca y al comienzo de los experimentos presentaba pH (1:2.5 in agua), capacidad de intercambio catiónico, contenidos de P Bray y Kurtz y de carbono orgánico del suelo (COS) de 6, 33.1 cmol kg<sup>-1</sup>, 5.0 mg kg<sup>-1</sup> y 37.7 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

### **6.4.1. Experimento 1: Rotación cultivos-pastura**

Este experimento comenzó en 1976y ha sido descrito en Studdert *et al.* (1997). Brevemente, el experimento fue conducido con un diseño experimental en bloques completos aleatorizados con un arreglo de tratamientos en parcelas divididas, tres repeticiones y unidades experimentales de 10 x 35 m. Los tratamientos asignados a las parcelas principales fueron las rotaciones que comprendían agricultura continua y distintas combinaciones de períodos bajo agricultura y de períodos bajo pastura. A las subparcelas se asignaron niveles de fertilización nitrogenada (0 y 90 kg N ha<sup>-1</sup>). Las rotaciones cultivo-pastura incluían combinaciones de aproximadamente 50%-50% y 75%-25% del tiempo bajo agricultura y pastura, respectivamente. Los cultivos agrícolas incluídos fueron trigo, papa (*Solanum tuberosum* L.), maíz (*Zea mays* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.), y avena (*Avena sativa* L.) o avena + vicia (*Vicia sativa*

L.) como abono verde. Las pasturas incluían gramíneas y leguminosas normalmente utilizadas en la zona (*Dactylis glomerata* L., *Phalaris tuberosa* L., *Festuca arundinacea* Schreb., *Lolium perenne* L., *Trifolium repens* L., *Trifolium pratense* L., *Medicago sativa* L.) a las densidades recomendadas y con predominancia de gramíneas. Las pasturas no fueron pastoreadas pero, a manera de simulación de pastoreo, fueron periódicamente cortadas y el material fue retirado de las parcelas. De este ensayo sólo fueron analizados los rendimientos y la acumulación de MS y de N en la biomasa aérea del trigo con papa como cultivo antecesor entre 1983 y 1993.

#### **6.4.2. Experimento 2: Rotación de cultivos agrícolas**

Este experimento fue iniciado en 1984 y concluído en 1995 y ha sido descrito en Studdert & Echeverría (2000). Brevemente, el diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con un arreglo de tratamientos en bloques divididos (split-block) (Little & Hills 1978) y cuatro repeticiones. El experimento se inició en un lote que había estado bajo pastura por al menos 4 años. Trigo, soja (*Glycine max* L. Merr.), girasol y maíz fueron sembrados en franjas de 25 x 100 m durante el primer año de un ciclo de tres. En el segundo año los mismos cultivos fueron sembrados en franjas de 25 x 100 m perpendiculares a las del primer año. Esto definió 16 secuencias de cultivos diferentes en parcelas de 25 x 25 m. Durante el tercer año del ciclo, todo el experimento fue sembrado con trigo. Este ciclo de rotación de tres años fue repetido cuatro veces (hasta 1995). Por lo tanto, el trigo fue sembrado luego de cuatro cultivos antecesores diferentes: trigo, soja, girasol y maíz. Asimismo, el antecesor del trigo sembrado en 1984 fue la pastura previa al inicio del ensayo. Las parcelas definidas fueron divididas en dos unidades experimentales (UE) de 12,5 x 25 m y siempre que correspondiera sembrar trigo en la parcela, una de las UE fue fertilizada con N (60 kg N

ha<sup>-1</sup> en 1984 y 1985, 90 kg N ha<sup>-1</sup> en 1986 y 1987, y 120 kg N ha<sup>-1</sup> hasta el fin del experimento).

### **6.4.3. Manejo general de los experimentos**

El suelo fue laboreado convencionalmente (arado de rejas, rastra de discos, rastra de dientes o vibrocultivador y labores culturales en los cultivos de escarda). Las operaciones de laboreo para la preparación de la cama de siembra se iniciaron no menos de tres meses antes de la fecha de siembra de los cultivos de escarda o las pasturas. Para el trigo, los laboreos comenzaron inmediatamente después de la cosecha del cultivo antecesor. En todos los casos, la oportunidad y la intensidad de laboreo fueron las necesarias para lograr una cama de siembra libre de malezas y no excesivamente refinada. Todos los cultivos fueron fertilizados con superfosfato triple de calcio en bandas a la siembra los cultivos agrícolas y al voleo las re-fertilizaciones de las pasturas, con dosis de acuerdo con el análisis de suelo. Las malezas fueron controladas tanto mecánica como químicamente según lo recomendado para la zona. La fertilización nitrogenada del trigo se hizo con urea al voleo o a la siembra o al macollaje. Las variedades de trigo utilizadas fueron de ciclo intermedio a corto: San Agustín INTA (entre 1983 y 1987 y en 1989), Pionero INTA (en 1987 y 1988), Pro INTA Azul (entre 1990 y 1991), Pro INTA Federal (en 1992 y 1993) y Pro INTA Oasis (en 1994 y 1995).

En algunos años y no en todas las unidades experimentales se cortó la parte aérea de plantas de trigo de tres sectores de 1 m lineal de surco al estadio de madurez fisiológica del trigo. Las muestras fueron pesadas, secadas en estufa o cámara de secado con circulación forzada de aire hasta peso constante para determinación de acumulación de MS y molidas para la determinación del contenido de N total por micro Kjeldahl (Bremner & Mulvaney 1982). Para la estimación de los rendimientos de trigo

se cosechó una parte de cada UE con una cosechadora automotriz de parcelas y los rendimientos fueron ajustados a 14% de humedad. Los rendimientos en grano y la acumulación de MS y de N total en la biomasa aérea fueron estandarizados dividiéndolos por el máximo rendimiento o acumulación de MS o de N, respectivamente, obtenidos en el correspondiente experimento y año (Dahnke & Olson 1990) y fueron referidos como rendimiento relativo (RR), MS relativa (MSR) y N total relativo (NR), respectivamente. Los datos del año 1989 no fueron incluidos en los análisis debido a las pérdidas de rendimiento ocasionadas por una severa sequía durante la estación de crecimiento del cultivo.

#### 6.4.4. Análisis de los datos

La relación entre RR, MSR y NR y los años bajo agricultura fue descrita a través del siguiente modelo matemático:

$$VR_t = VR_e + (1 - VR_e) \exp(-k t) \quad [1]$$

donde  $VR_t$  es el valor de RR, MSR o NR ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) al tiempo  $t$ ;  $VR_e$  es el valor de R, MSR o NR al equilibrio ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $k$  es la tasa exponencial de variación ( $\text{año}^{-1}$ ) y  $t$  son los años bajo agricultura (año). El tiempo requerido para que se produzca la mitad de la variación total descrita por el modelo (vida media,  $t_{1/2}$ ) se calculó según:

$$t_{1/2} = 0.693 / k \quad [2]$$

El modelo descrito en la ecuación [1] fue ajustado a RR, MSR y NR mediante regresión no lineal (Steel & Torrie 1980). Se realizaron también análisis de regresión y correlación (Steel & Torrie 1980).

### 6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 6.1 se presentan los parámetros estimados por regresión no lineal para ajustar la ecuación [1] a los RR, MSR y NR del trigo observados en las unidades experimentales sin fertilización nitrogenada. Tanto los RR como MSR y NR del trigo sin

N mostraron reducciones ( $P < 0.01$ ) a lo largo de los años bajo agricultura (Figuras 6.1, 6.2 y 6.3, respectivamente). Esto es coincidente con lo informado por Studdert & Rizzalli (1994) para los RR de trigo en el Experimento 1 sin distinguir entre antecesores y por Berardo (1994) para los rendimientos de trigo en distintas zonas agroecológicas. No obstante, en las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se puede ver que las reducciones de RR, MSR y NR fueron diferentes según cuál hubiera sido el antecesor del trigo. En todos los casos, el antecesor maíz se asoció a las mayores reducciones, mientras que el antecesor soja generó las menores reducciones en las tres variables. Por otro lado, el trigo sobre papa y sobre trigo mostró comportamientos similares a los observados con el antecesor soja. Los RR de trigo sin agricultura previa (antecesor pastura) promediaron  $0.93 \text{ kg kg}^{-1}$  (Figura 6.1).

La calidad de los residuos (C:N) es un factor de suma importancia en la regulación de la disponibilidad de N para el cultivo de trigo (Echeverría *et al.* 1992; Debaeke *et al.* 1996; Lázaro 1996; Studdert *et al.* 2000), dada su intervención en el ciclo entre la inmovilización y la mineralización netas. El rastreo de soja presenta una relación C:N de entre 20 y 30 (Andrade *et al.* 1996) lo que provoca que el proceso de descomposición sea rápido, especialmente cuando es incorporado al suelo, y que, por lo tanto, se produzca mineralización neta en poco tiempo (Sánchez *et al.* 1998). Esto permite lograr una correcta sincronización entre la oferta de N y la demanda del cultivo (Echeverría *et al.* 1992; Lázaro 1996; Studdert *et al.* 2000) debido a la mineralización del N en el residuo junto con el mineralizado a partir de la materia

**Tabla 6.1. Resultados del ajuste no lineal a la Ecuación [1] de los rendimientos (RR) y de la acumulación de materia seca (MSR) y de nitrógeno total (NR) en**



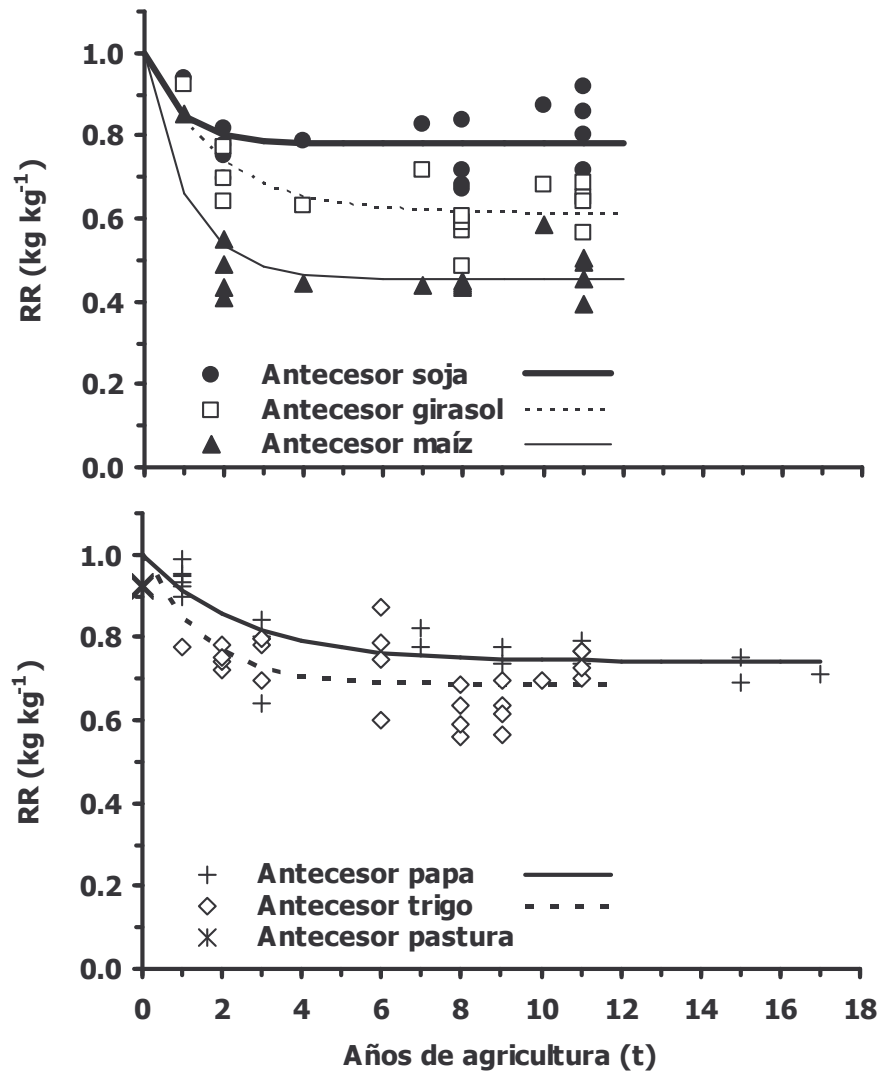
**la biomasa aérea relativos de trigo no fertilizado con N sobre varios antecesores.**

Table 6.1. Results of non linear fitting of Equation [1] to relative yields (RR) and aboveground dry matter (MSR) and nitrogen (NR) accumulation of non N-fertilized wheat after several preceding crops.

Antecesor	RR			MSR			NR		
	RR <sub>e</sub> *	k*	R <sup>2</sup>	MSR <sub>e</sub> *	k*	R <sup>2</sup>	NR <sub>e</sub> *	k*	R <sup>2</sup>
	kg kg <sup>-1</sup>	año <sup>-1</sup>		kg kg <sup>-1</sup>	año <sup>-1</sup>		kg kg <sup>-1</sup>	año <sup>-1</sup>	
Papa	0.74	0.41	0.70	0.67	0.50	0.80	0.53	0.55	0.81
Trigo	0.69	0.66	0.49	0.75	0.58	0.20	0.54	0.81	0.42
Soja	0.78	1.24	0.26	0.74	0.92	0.34	0.58	0.47	0.83
Girasol	0.61	0.57	0.77	0.70	0.58	0.51	0.45	0.41	0.80
Maíz	0.45	0.97	0.86	0.55	1.11	0.34	0.37	0.82	0.82

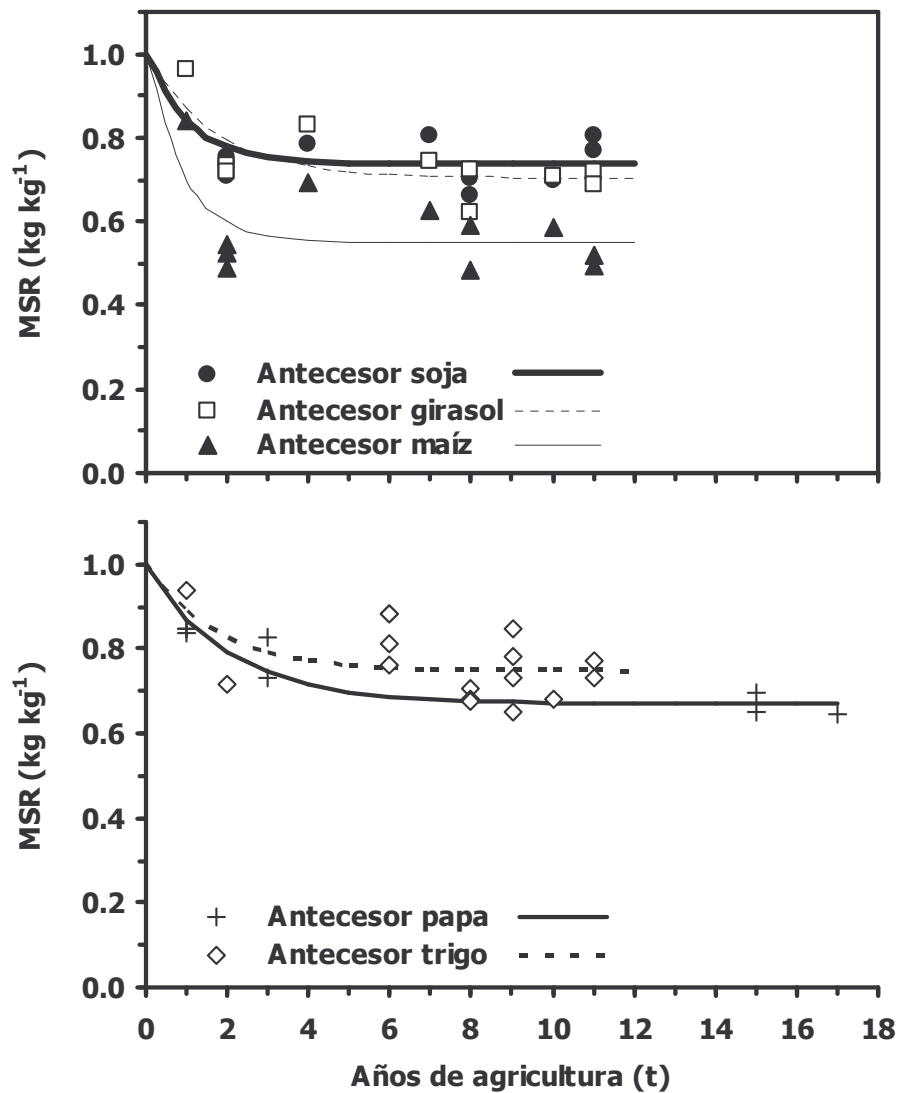
\* RR<sub>e</sub>, MSR<sub>e</sub>, NR<sub>e</sub>: RR, MSR y NR al equilibrio, respectivamente; k: tasa exponencial de variación

orgánica del suelo. Algo similar puede haber sucedido con el antecesor papa cuyos residuos tienen una relación C:N de entre 10 y 15 (Haverkort & MacKerron 2000). Por otro lado, el material dejado por el maíz presenta una relación C:N de entre 60 y 80 (Andrade *et al.* 1996) lo que genera una fuerte inmovilización de N mineral por un período prolongado (Sánchez *et al.* 1998) haciendo que el nutriente no esté disponible en cantidad suficiente en los momentos de mayor demanda del trigo (Abbate *et al.* 1994). Las reacciones descritas son magnificadas por la diferencia de volumen (Andrade *et al.* 1996) y de forma física del material devuelto al suelo por cada uno de los cultivos, ya que mayores volúmenes y formas del material menos accesibles para los microorganismos, como los que presentan los rastrojos de maíz, retardan aún más la descomposición (Echeverría *et al.* 1992, Sánchez *et al.* 1998). Coincidiendo con Echeverría *et al.* (1992), Lázaro (1996) y Studdert *et al.* (2000) el comportamiento del trigo sobre girasol, cuyos residuos presentan C:N de entre 40 y 50 y relativamente bajos volúmenes (Andrade *et al.* 1996), fue intermedio.



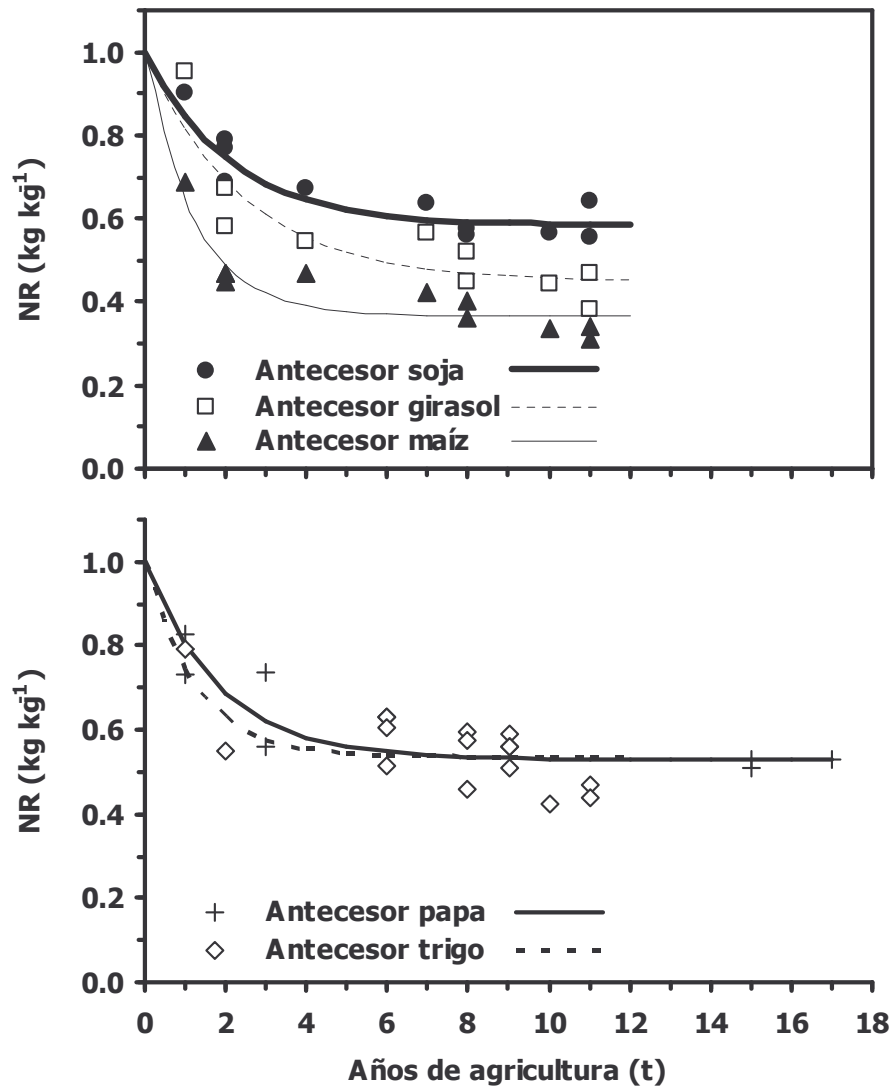
**Figura 6.1.** Rendimientos relativos (RR) de trigo no fertilizado con N sobre varios antecesores en función de los años de agricultura. Las curvas representan el resultado del ajuste de la Ecuación [1] (parámetros en la Tabla 6.1).

*Figure 6.1.* Relative yields (RR) of non N-fertilized wheat after several preceding crops as a function of years under cropping. The curves represent Equation [1] fitting (parameters in Table 6.1).



**Figura 6.2.** Acumulación de materia seca en la biomasa aérea relativa (MSR) de trigo no fertilizado con N sobre varios antecesores en función de los años de agricultura. Las curvas representan el resultado del ajuste de la Ecuación [1] (parámetros en la Tabla 6.1).

*Figure 6.2.* Relative aboveground dry matter accumulation (MSR) of non N-fertilized wheat after several preceding crops as a function of years under cropping. The curves represent Equation [1] fitting (parameters in Table 6.1).

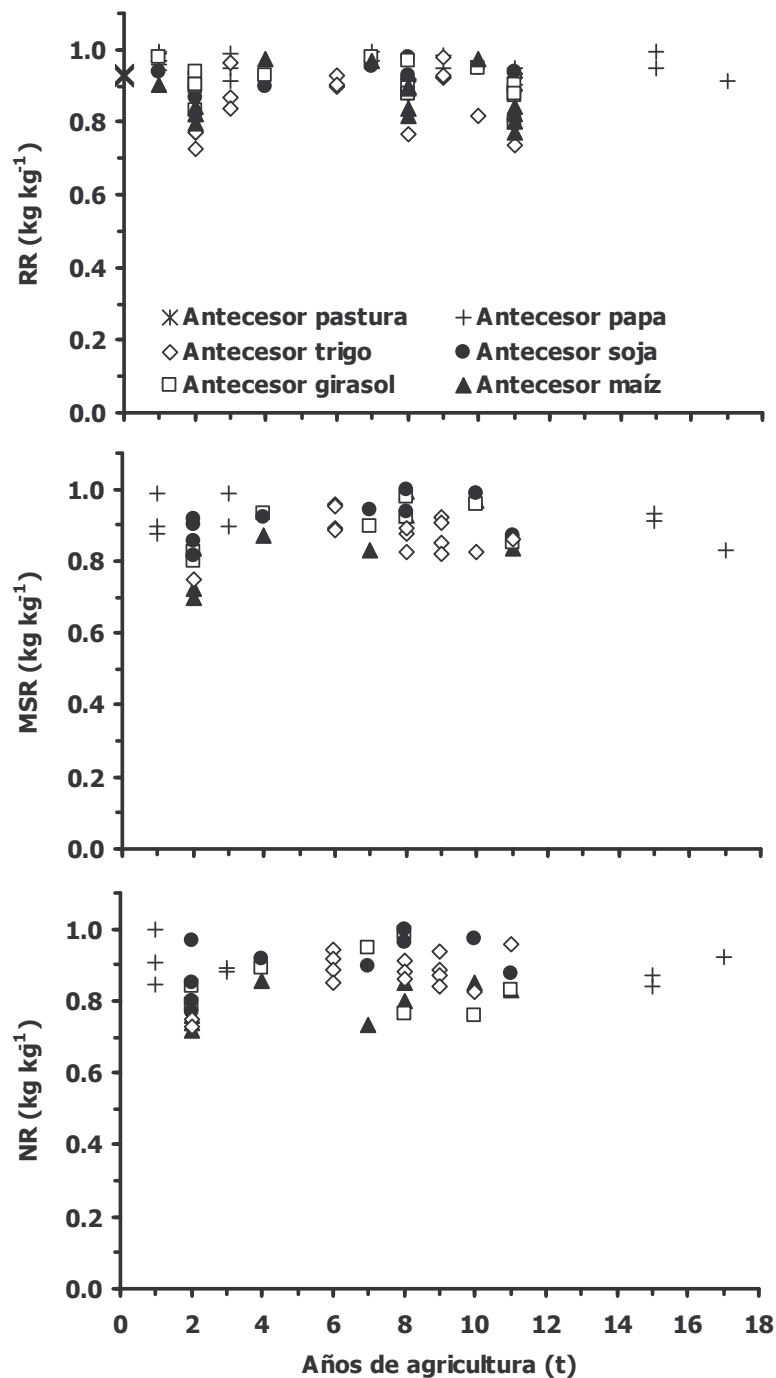


**Figura 6.3.** Acumulación de nitrógeno total en la biomasa aérea relativa (NR) de trigo no fertilizado con N sobre varios antecesores en función de los años de agricultura. Las curvas representan el resultado del ajuste de la Ecuación [1] (parámetros en la Tabla 6.1).

*Figure 6.3.* Relative aboveground nitrogen accumulation (NR) of non N-fertilized wheat after several preceding crops as a function of years under cropping. The curves represent Equation [1] fitting (parameters in Table 6.1).

Otro factor que influye sobre cómo las características de los residuos de los antecesores inciden sobre la dinámica del N para el trigo, es la duración del período de barbecho (Berardo 1994). Barbechos más largos permiten un mayor período de descomposición de los residuos, lo que adquiere mayor importancia para los rastros con relación C:N y volumen elevados. En el Experimento 2 el período de barbecho de trigo sobre trigo fue de aproximadamente 180 días. A pesar de que los residuos de trigo presentan una relación C:N de 80 y, por lo general, gran volumen (Echeverría *et al.* 1992), el largo período de barbecho habría permitido un grado de descomposición de los mismos que hiciera que al momento de mayor requerimiento del cultivo (Abbate *et al.* 1994) el sistema estuviera en condición de mineralización neta de N a partir del material incorporado y del oportunamente inmovilizado durante las etapas iniciales de la descomposición del residuo. Con ello los niveles de RR, MSR y NR fueron más similares a los logrados luego de soja o de papa que a los obtenidos luego de cultivos con residuos con relación C:N más elevada.

En la Figura 6.4 se presenta la evolución de RR, MSR y NR en función de los años de agricultura en las unidades experimentales en que el trigo había sido fertilizado con N. El agregado de N produjo una elevación de los valores de RR, MSR y NR lo que confirma que el efecto principal de los antecesores estuvo asociado con la dinámica del N disponible para el cultivo. Las tres variables oscilaron entre 1.00 kg kg<sup>-1</sup> y 0.72 (RR y NR) y 0.70 (MSR) kg kg<sup>-1</sup> ( $0.90 \pm 0.06$ ,  $0.86 \pm 0.08$  y  $0.89 \pm 0.07$  kg kg<sup>-1</sup>, respectivamente), sin mostrar relación con la variación de los años de agricultura ( $P > 0.05$ ), ni globalmente ni por antecesor. Studdert & Rizzalli (1994) habían observado el mismo efecto para los RR con los años luego de pastura. Por otro lado, Echeverría *et al.* (1992) y Lázaro (1996) reportaron que la fertilización nitrogenada tendía a anular el



**Figura 6.4. Rendimiento (RR) y acumulación de materia seca (MSR) y de nitrógeno total (NR) en la biomasa aérea relativos de trigo fertilizado con N sobre varios antecesores en función de los años de agricultura.**

*Figure 4. Relative yield (RR) and aboveground dry matter (MSR) and nitrogen (NR) accumulation of N-fertilized wheat after several preceding crops as a function of years under cropping.*

efecto de los antecesores soja, trigo, girasol y maíz sobre los rendimientos y la acumulación de MS y N total en la biomasa aérea de trigo.

La incidencia de las características de los residuos de los antecesores sobre la disponibilidad de N para el trigo fue tan marcada que la mitad de la disminución total ( $t_{1/2}$ ) en los valores relativos de todas las variables analizadas se produjo en 0.56 a 1.70 años de agricultura convencional desde la situación de origen. Luego de 1 año de agricultura los valores de RR, MSR y NR fueron  $0.91 \pm 0.06$ ,  $0.89 \pm 0.06$  y  $0.81 \pm 0.09$   $\text{kg kg}^{-1}$ , respectivamente, mientras que al segundo año se redujeron a  $0.68 \pm 0.13$ ,  $0.67 \pm 0.10$  y  $0.61 \pm 0.12$   $\text{kg kg}^{-1}$ , respectivamente (Figuras 6.1, 6.2 y 6.3). Durante el primer año, la elevada disponibilidad de N resultante de las pasturas previas (Echeverría *et al.* 1994; Studdert *et al.* 1997) hizo que hubiera suficiente N para satisfacer adecuadamente las demandas del cultivo y de la biomasa microbiana, mientras que en el segundo año y subsiguientes, no fue así. Esto es un indicio de que por el efecto de corto plazo de los residuos sobre el ciclo mineralización-inmovilización del N, la nutrición nitrogenada del trigo habría estado mayormente controlada por los residuos aportados y escasamente relacionada con la capacidad del suelo de proveer el nutriente.

Studdert *et al.* (1997) y Studdert & Echeverría (2000) demostraron que en los Experimentos 1 y 2, respectivamente, los contenidos de materia orgánica del suelo disminuyeron en función de los años de agricultura y que había diferencias en las tasas de variación según cuál fuera la secuencia de cultivos implementada (Studdert & Echeverría 2000). Por su parte, Echeverría *et al.* (1994) y Studdert *et al.* (2000) reportaron que las diferencias en contenido de materia orgánica se traducían en diferencias en  $N_o$ , lo que podía reflejarse en la nutrición nitrogenada de los cultivos (Berardo 1994; Studdert & Rizzalli; Álvarez 2004). En la Tabla 6.2 se muestran los

**Tabla 6.2. Resultados de la regresión lineal entre el contenido de carbono orgánico en la capa arable del suelo (Studdert *et al.* 1997; Studdert & Echeverría 2000) y los rendimientos (RR) y la acumulación de materia seca (MSR) y de nitrógeno total (NR) en la biomasa aérea relativos de trigo no fertilizado con N sobre varios antecesores.**

*Table 6.2. Results of linear regression between organic carbon content in soil arable layer (Studdert *et al.* 1997; Studdert & Echeverría 2000) and relative yields (RR) and aboveground dry matter (MSR) and nitrogen (NR) accumulation of non N-fertilized wheat after several preceding crops.*

Antecesor	RR		MSR		NR	
	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup>	P
Todos	0.02	0.23	0.001	0.82	0.17	< 0.01
Papa	0.49	< 0.01	0.48	0.06	0.53	0.04
Trigo	0.07	0.19	0.03	0.55	0.19	0.09
Soja	0.07	0.32	0.01	0.77	0.33	0.05
Girasol	0.08	0.30	0.22	0.17	0.55	0.01
Maíz	0.13	0.17	0.24	0.13	0.67	< 0.01

resultados de los análisis de regresión entre RR, MSR y NR de las unidades experimentales sin N y el contenido de C orgánico en la capa arable del suelo (Studdert *et al.* 1997; Studdert & Echeverría 2000). Sólo los RR y los MSR de trigo luego de papa mostraron una relación significativa ( $P < 0.01$  y  $P = 0.06$ , respectivamente) con el contenido de C orgánico, explicando éste casi el 50% de su variabilidad. El retorno de N al suelo a través de los residuos de papa es muy bajo dado el elevado índice de cosecha del nutriente (Haverkort & MacKerron 2000). Asimismo, sus características (muy baja C:N y muy escaso volumen) hicieron que su descomposición fuera extremadamente rápida y que, por lo tanto, su influencia directa sobre el ciclo mineralización-inmovilización de N desapareciera mucho antes del inicio del ciclo del trigo, quedando la nutrición del cultivo dependiendo en buena medida de la mineralización del N orgánico del suelo que fue disminuyendo con los años de agricultura (Studdert *et al.* 1997). Por otro lado, la inexistencia de relación entre los RR



y las MSR luego de soja y trigo puede estar asociada a que, por la dinámica de descomposición de sus residuos, el N para el trigo proviniera mayormente de la mineralización de los mismos, y se independizara de los menores contenidos de materia orgánica en el suelo asociados a su alta frecuencia en la secuencia (Studdert & Echeverría 2000). Luego de maíz y girasol, en cambio, el N para el trigo dependió más de la inmovilización que sus residuos provocaron durante su ciclo, a pesar de que altas frecuencias de aquellos cultivos en la secuencia se asociaron a menores caídas en los contenidos de materia orgánica (Studdert & Echeverría 2000) y por lo tanto a  $N_0$  comparativamente mayores que en otras secuencias (Studdert *et al.* 2000).

Los valores de  $NR_e$  (Tabla 6.1, Figura 6.3) fueron, en promedio, un 24 y un 28% más bajos que los correspondientes  $RR_e$  y  $MSR_e$  (Tabla 6.1, Figuras 6.1 y 6.2). Esto estaría indicando que la concentración de N en el tejido vegetal fue más sensible al efecto de los residuos sobre la disponibilidad del nutriente y que, como consecuencia, la calidad del grano (contenido de proteína) sufrió la mayor disminución. Ante cambios en la disponibilidad de N, las tasas de variación de los rendimientos y de la concentración de N en el tejido son diferentes, siendo mayores aquéllas a las menores disponibilidades (Echeverría *et al.* 1992, Abbate *et al.* 1994). En todos los casos de antecesores hubo relación ( $P < 0.05$  o  $P < 0.10$ ) entre los NR y el contenido de C orgánico del suelo de las unidades experimentales sin N (Tabla 6.2), aunque con coeficientes de determinación variables entre antecesores. Teniendo en cuenta el elevado grado de variación conjunta entre NR y RR y MSR ( $r = 0.76$  y  $r = 0.78$ , respectivamente) y la falta de relación de estas dos últimas variables con el C del suelo, no se cuenta con elementos que permitan explicar la relación significativa entre dicha variación y los NR.

Los resultados mostrados permiten concluir que para las condiciones en que se desarrollaron los ensayos, la prolongación de los ciclos agrícolas produjo una reducción en los RR de trigo y en MSR y NR. Sin embargo, tales reducciones variaron según cuál fuera el antecesor en función de la calidad de sus residuos y de la forma en que se había producido el proceso de su descomposición y sólo en algún caso se asociaron a la variación en la materia orgánica del suelo como consecuencia del manejo. El diagnóstico de la disponibilidad de N para el trigo debería tener en cuenta tales procesos y cómo influyen sobre la dinámica del N para permitir sincronizar la oferta del nutriente con la demanda del cultivo.

#### **6.6. AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue financiado parcialmente con fondos de los proyectos de investigación de la Universidad Nacional de Mar del Plata N° 15/A166 y PICTO ANPCyT-UNMDP N° 08-11352.

#### **6.7. BIBLIOGRAFÍA**

- Abbate, PE; FH Andrade & JP Culot. 1994. Determinación del rendimiento en trigo. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce. Boletín Técnico N° 133. 20 pp.
- Álvarez, R. 2004. Análisis del impacto de la fertilidad del suelo y el manejo sobre los rendimientos de trigo y maíz en la Pampa Ondulada. En: Actas de XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos, 23-25 de junio de 2004. En CD.

- 
- Andrade, FH; HE Echeverría; NS González; S Uhart & N Darwich. 1996. Requerimientos de nitrógeno y fósforo de los cultivos de maíz, girasol y soja. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce. Boletín técnico N° 134. 17 pp.
- Berardo, A. 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo de trigo en el área de influencia de la Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce. Boletín Técnico N° 128. 34 pp.
- Bremner, JM & YC Mulvaney. 1982. Nitrogen total. Pp. 595-624. En: AL Page *et al.* (eds.) Methods of soil analysis. Part 2. 2nd Ed. Agron. Monog. 9. Am. Soc. Agron. y Soil Sci. Soc. Am, Madison, Wisconsin, USA.
- Calviño, P; HE Echeverría & M Redolatti. 2002. Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo 20:36-42.
- Dahnke, WC & RA Olson. 1990. Soil test correlation, calibration, and recommendation. Pp. 45-71. En: RL Westerman (ed.), Soil Testing and Plant Analysis, 3rd edition. Soil Sci. Soc. Am. Book Series 3, Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.
- Debaeke, Ph; Th Aussenac, JL Fabre; A Hilaire; B Pujol & L Thuries. 1996. Grain nitrogen content of winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) as related to crop management and to the previous crop. European J. Agron., 5:273-286.
- Echeverría, HE; CA Navarro & FH Andrade. 1992. Nitrogen nutrition of wheat following different crops. J. Agric. Sci., Camb. 118:157-163.
- Echeverría, H; R Bergonzi & J Ferrari. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Ciencia del Suelo, 12:56-62.
- González Montaner, J; G Maddoni; N Mailland & M Posborg. 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un

- modelo de decisión para la Subregión IV (sudeste de la Provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo*, 9:41-51.
- Haverkort, AJ & DKL MacKerron. 2000. Management of nitrogen and water in potato production. Wageningen Pers, Wageningen, Holanda. 353 pp.
- Heenan, DP. 1995. Effects of broad-leaf crops and their sowing time on subsequent wheat production. *Field Crops Res.* 43:19-29.
- Lázaro, L. 1996. Determinación del rendimiento de trigo ante cambios en la disponibilidad de nitrógeno generada por distintos antecesores. Tesis Magister Scientiae en Producción Vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires. 41 pp.
- Little, TM & FJ Hills. 1978. Agricultural experimentation. Design and analysis. John Wiley & Sons, New York, New York, USA. 350 pp.
- Loiseau, P; R Chaussod & R Delpy. 1994. Soil microbial biomass and in situ nitrogen mineralization after 20 years of different nitrogen fertilization and forage cropping systems. *European J. Agron.*, 3:327-332.
- Meisinger, JJ. 1984. Evaluating plant available nitrogen in soil-crop systems. Pp. 391-416. En: RD Hauck (ed.) Nitrogen in crop production. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.
- Rice CW & JL Havlin. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. Pp. 1-13. En: JL Havlin & JS Jacobsen (eds) Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations. Soil Sci. Soc. Am. Sp. Pub. 40. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.
- Sain, GE & MA Jáuregui. 1993. Deriving fertilizer recommendations with a flexible functional form. *Agron. J.*, 85:934-937.

- Sánchez, SR; GA Studdert & HE Echeverría. 1998. Dinámica de la mineralización del nitrógeno de residuos de cosecha en descomposición en un Argiudol Típico. *Ciencia del Suelo* 16:1-6.
- Steel, GD & JH Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. Second Edition. McGraw-Hill Book Company, New York, New York, USA. 633 pp.
- Studdert, GA & HE Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503.
- Studdert, GA & RH Rizzalli. 1994. Rotaciones mixtas: efecto de los años de agricultura sobre el rendimiento del trigo. Pp 93-94. En: Actas III Congreso Nacional de Trigo y Primer Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño Invernal, Bahía Blanca, 26-28 de octubre de 1994.
- Studdert, GA; HE Echeverría & EM Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic argiudoll. *Soil Sci Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- Studdert, GA; LS Carabaca & HE Echeverría. 2000. Estimación del nitrógeno mineralizado para un cultivo de trigo en distintas secuencias de cultivos. *Ciencia del Suelo* 18:17-27.
- Walley, F; T Yates; JW van Groenigen & C van Kessel. 2002. Relationship between soil nitrogen availability indices, yield, and nitrogen accumulation of wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1549-1561.
- Willson, TC; EA Paul & RR Harwood. 2001. Biologically active soil organic matter fractions in sustainable cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 16:63-76.

## **7. DISCUSIÓN GENERAL**

## 7. DISCUSIÓN GENERAL

El conocimiento de las relaciones entre los componentes del sistema y de los procesos involucrados en su funcionamiento y en la determinación de sus capacidades y limitaciones, así como de qué manera son alterados por el uso, es requisito para el logro de una *agricultura sostenible*. Pasar de una agricultura tradicional, basada casi exclusivamente en tecnología de insumos, hacia una *agricultura sostenible* supone el cambio hacia una tecnología de procesos basada en el manejo de las interacciones entre los componentes del sistema (Luna y House, 1990) que permita utilizar los servicios que puede brindar el agroecosistema dentro de sus capacidades y hacer un uso más racional y seguro de los insumos necesarios. La tendencia de un sistema de producción hacia la degradación o hacia la sostenibilidad depende de las decisiones de los protagonistas de la producción y está directamente ligada a lo que suceda en el suelo. Un sistema de producción que pretenda ser sostenible debe contemplar las acciones necesarias para que el suelo pueda mantener o mejorar su condición y, con ello, la capacidad de permitir el desarrollo de los cultivos con el menor efecto sobre el resto del sistema (Studdert y Echeverría, 2002).

A través de la combinación de prácticas de manejo se busca regular, inhibir, potenciar u orientar algunos de los procesos que ocurren dentro y fuera del suelo que determinan su condición y se traducen en una respuesta de producción. Las distintas prácticas de manejo intervienen sobre el ambiente edáfico alterando las condiciones que regulan la actividad de los microorganismos y de las raíces a través de la modificación de las condiciones abióticas (disponibilidad de agua y de aire, temperatura, compactación, porosidad, exposición a la erosión, etc.) y bióticas (disponibilidad y accesibilidad de sustrato) (Power, 1994). La rotación de cultivos ejerce una marcada influencia tanto sobre el funcionamiento del suelo como sobre el

comportamiento de los cultivos, condicionando las relaciones suelo-planta, como así también la decisión de aplicación de otras prácticas (fertilización, riego, control de plagas, malas hierbas y enfermedades) (Studdert y Echeverría, 2002). El *efecto rotación* se relaciona con la posibilidad de i) manejar la cantidad y la calidad del material vegetal (raíces y residuos de cosecha) que se devuelven al suelo; ii) incorporar cultivos que fijen nutrientes (p.e. leguminosas) o con distintos patrones de utilización de nutrientes y agua; iii) manejar las malas hierbas, las plagas y las enfermedades; iv) combinar sistemas de laboreo y de agroquímicos, permitiendo su utilización más eficiente; y v) manejar la cobertura del suelo y sus propiedades químicas, biológicas y físicas (Urbano Terrón, 1989).

La materia orgánica (MO) es un componente clave del sistema suelo dada su influencia sobre las propiedades biológicas, físicas y químicas que definen su productividad, su calidad y su salud (Doran y Parkin, 1994; Robinson *et al.*, 1994). Asimismo, la MO es uno de los componentes del suelo más alterados por las prácticas de manejo y la variación en su contenido se asocia a la alteración de importantes propiedades del suelo (fertilidad, resistencia a la erosión, etc.) (Allmaras *et al.*, 2000) y de su capacidad para reorganizarse ante el efecto del uso (Kanal y Kölli, 1996), como así también a la emisión o fijación de dióxido de carbono con el consecuente efecto sobre la atmósfera (Varvel, 1994).

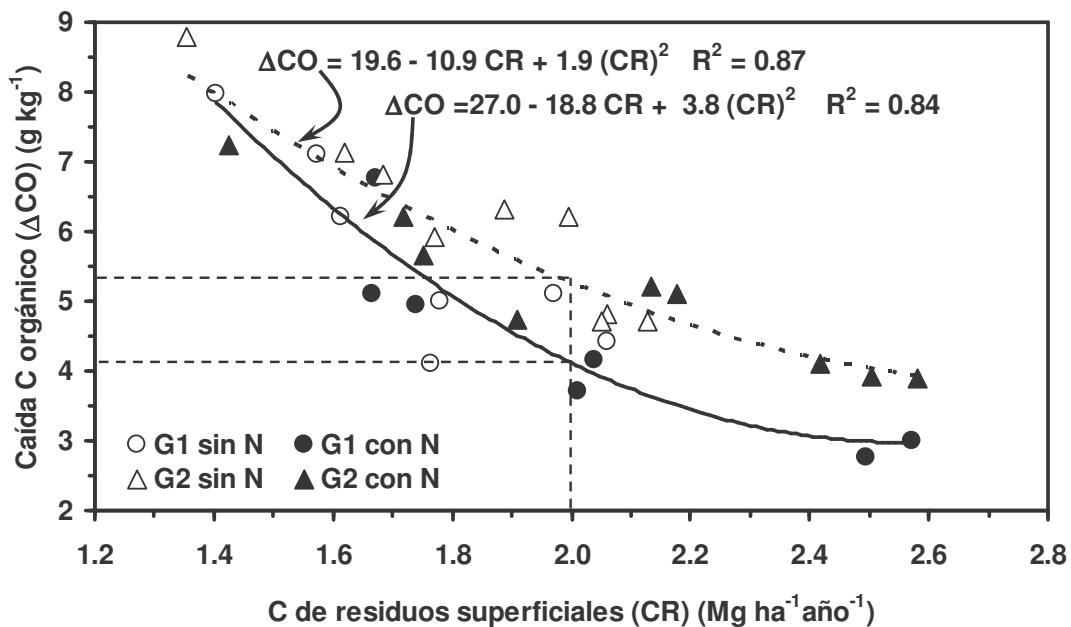
Los períodos bajo agricultura con labranza convencional (LC) produjeron caídas sostenidas del contenido de MO de la capa arable del suelo (Capítulos I y II). La disminución apareció como mucho más marcada cuando se analizó la variación en el contenido de componentes lábiles de la fracción orgánica del suelo, tales como el carbono (C) en la fracción liviana y el nitrógeno (N) en la biomasa microbiana (Capítulo I), que demostraron ser indicadores más sensibles de los cambios producidos por el



manejo. La labranza altera el ambiente del suelo provocando su sobre-oxigenación y la exposición de fracciones de la MO protegidas dentro de los agregados (Tisdall y Oades, 1982; Doran y Smith, 1987; Eghball *et al.*, 1994), lo que favorece la mineralización del C orgánico.

Las tasas de caída de la MO fueron diferentes según cuáles hubieran sido los cultivos incluídos en la secuencia (Capítulo II). Secuencias con alta frecuencia de cultivos con baja relación C/N (C:N) y bajo volumen produjeron disminuciones más marcadas que aquéllas con alta frecuencia de cultivos con alto volumen y C:N elevada. Asimismo, el incremento en el volumen de C repuesto al suelo debido a la fertilización nitrogenada de algunos de los cultivos en la secuencia, redujo también las tasas de caída de la MO (Capítulo II). Si bien en el Capítulo I no se determinaron diferencias significativas entre las unidades experimentales fertilizadas y las no fertilizadas con N, los niveles de MO en las primeras fueron levemente superiores que en las segundas (datos no mostrados en el Capítulo I). Los efectos de las características de los residuos aportados al suelo y de la fertilización nitrogenada fueron ampliamente coincidentes con la bibliografía (Doran y Smith, 1987, Havlin *et al.*, 1990; Varvel 1994; Huggins *et al.*, 1998).

La remoción del suelo a través de las labranzas, además de provocar los efectos antes mencionados sobre la MO humificada, altera la dinámica de la descomposición de los residuos (Sánchez, 1997) y se relaciona con otras propiedades del suelo tales como la temperatura y el contenido de agua. En la Figura 7.1 se presentan las caídas de MO en relación con el C aportado por los residuos de los cultivos respecto al contenido original. La magnitud de la caída se incrementó con la reducción de C aportado por los cultivos, pero también fue mayor para las secuencias que comprendían dos cultivos de verano cada tres años (G2). Como fue discutido en el

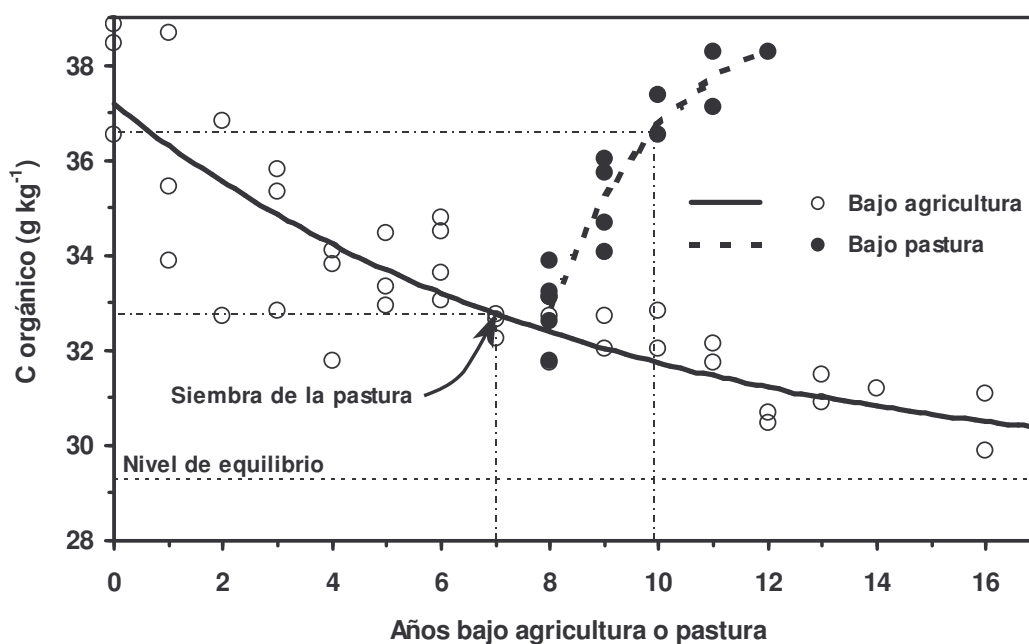


**Figura 7.1.** Caída del C orgánico de la capa arable en función de la cantidad de C aportada por los residuos para dos grupos de secuencias de cultivos sin y con fertilizante nitrogenado. G1: secuencias con un cultivo de verano cada tres años; G2: secuencias con dos cultivos de verano cada tres años (Adaptado de Figura 4.3, Capítulo II).

Capítulo II, al comparar ambos grupos de secuencias (G2 vs G1: comprenden sólo un cultivo de verano cada tres años) se puede ver que a iguales aportes de C de los residuos, las disminuciones de la MO fueron diferentes (Figura 7.1). La mayor frecuencia de ocurrencia de laboreos en épocas de temperaturas más elevadas en las secuencias G2, favorecieron la agilización de los procesos de mineralización del C orgánico del suelo, independientemente del nivel de aportes. Por ello, si bien los cambios en los contenidos de MO del suelo se asociaron estrechamente a la cantidad de C incorporado al sistema, su manejo no puede separarse de cómo a través de las labranzas se influye sobre los procesos involucrados. Lo expuesto pone de manifiesto que la variación en el contenido de MO es el resultado del balance entre los aportes de

residuos y su tasa de humificación y la tasa de mineralización del C orgánico (Campbell, 1978; Stevenson, 1986) favorecida por el laboreo.

Una alternativa de manejo con importantes efectos sobre la MO del suelo es la inclusión de pasturas en las rotaciones. La ausencia de disturbio, el constante aporte de material a lo largo del año y la acción física directa de los sistemas radicales generalmente densos de las pasturas, generan condiciones adecuadas para la acumulación de C en el suelo (Tisdall y Oades, 1982; Haynes y Francis, 1991). En el Capítulo I se demostró que la inclusión de una pastura de tres ó cuatro años con predominancia de gramíneas luego de un período agrícola de seis ó siete años bajo LC, permitía recomponer los niveles de MO de los que se había partido (Figura 7.2). El manejo tradicional del área de aptitud agrícola del sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Sudeste Bonaerense), incluía la alternancia de ciclos bajo agricultura con ciclos bajo pastura, a lo que, junto con las características agroecológicas de la

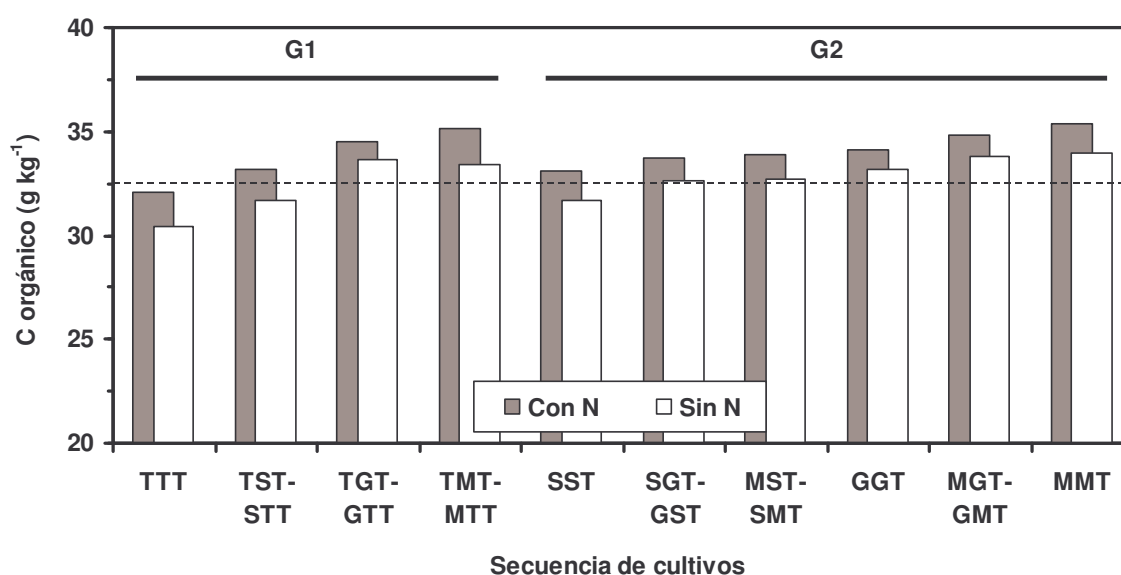


**Figura 7.2. Variación del C orgánico en la capa arable del suelo en rotaciones mixtas (adaptado de Figura 3.3, Capítulo I).**

región, se le atribuía la responsabilidad del mantenimiento de excelentes condiciones de suelo para la producción (Darwich, 1991). El incremento en el contenido de las fracciones orgánicas lábiles del suelo asociado a la inclusión de pasturas en la rotación, fue mucho más marcada que la variación de la MO total (Capítulo I).

De la información generada en los Capítulos I y II surge que, a través del manejo de las *rotaciones de cultivos*, se puede decidir cómo influir sobre la dinámica del C en el suelo a través de, por un lado, la cantidad y la calidad de los residuos a incorporar o devolver al sistema según los cultivos que se incorporen y, por otro, de la sincronización con la oportunidad e intensidad del laboreo para incidir sobre la velocidad de los procesos. Las disminuciones producidas durante los períodos agrícolas bajo LC pueden ser rápidamente revertidas mediante la incorporación de una pastura corta a la rotación lo que permitiría manejar las fluctuaciones siempre y cuando se mantengan dentro de ciertos límites. Se podría asumir que el nivel de MO umbral para poder lograr esa recomposición con una pastura de tres años, es el que surge de resolver la ecuación [1] del Capítulo I para siete años de agricultura. En la Figura 7.3. (Studdert y Echeverría, 2002) se presenta la comparación entre el nivel umbral calculado y el nivel de MO según la resolución de la ecuación [1] del Capítulo II para siete años de agricultura bajo las secuencias consideradas en ese Capítulo. Se pone de manifiesto que, según cuál haya sido la secuencia y según si se hubiera aplicado fertilizante nitrogenado o no, a los 7 años de agricultura algunas situaciones se hallaban por encima del nivel umbral y otras por debajo. Con ello se agrega la duración del período agrícola bajo LC como un elemento más a tener en cuenta al pretender manejar las fluctuaciones de la MO del suelo. La combinación de secuencia y oportunidad de laboreo que tiendan a reducir la disminución de la MO permitirían prolongar los ciclos agrícolas. Esto es válido para sistemas bajo LC (Varvel, 1994), pero

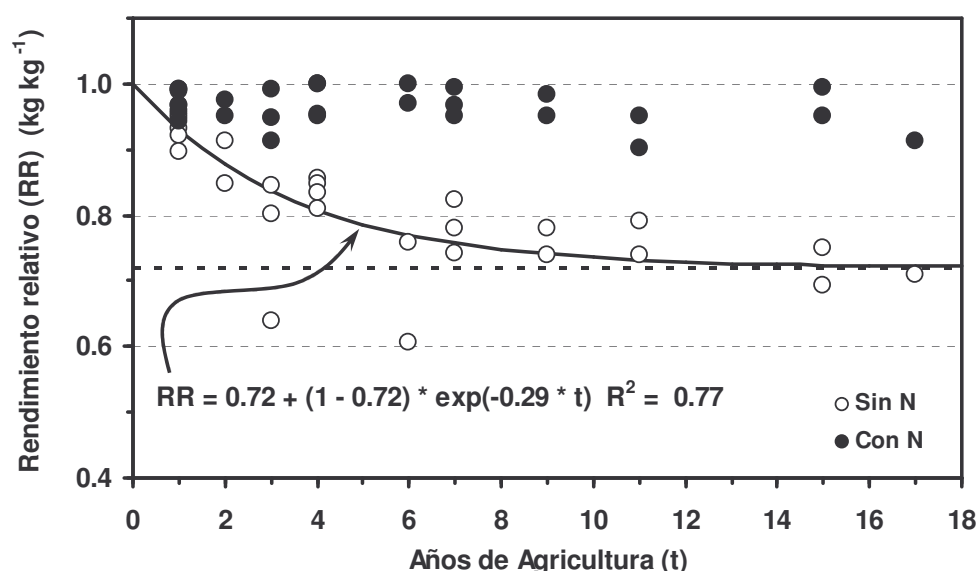
la reducción de la intensidad del laboreo podría ser una alternativa conducente a prolongar los ciclos bajo agricultura con menor afectación de la MO del suelo (Lamb *et al.*, 1985; Havlin *et al.*, 1990; Allmaras *et al.*, 2000).



**Figura 7.3. Estimación del contenido de C orgánico en la capa arable de un suelo a los 7 años de agricultura bajo labranza convencional (Ecuación [1], Capítulo II) para distintas secuencias de cultivos. La línea punteada indica el nivel a partir del cual una pastura corta permite recuperar el nivel original de C orgánico (Ecuación [1], Capítulo I). S: soja; M: maíz; G: girasol; T: trigo; G1: secuencias con un cultivo de verano cada tres años; G2: secuencias con dos cultivos de verano cada tres años (adaptado de Studdert y Echeverría, 2002).**

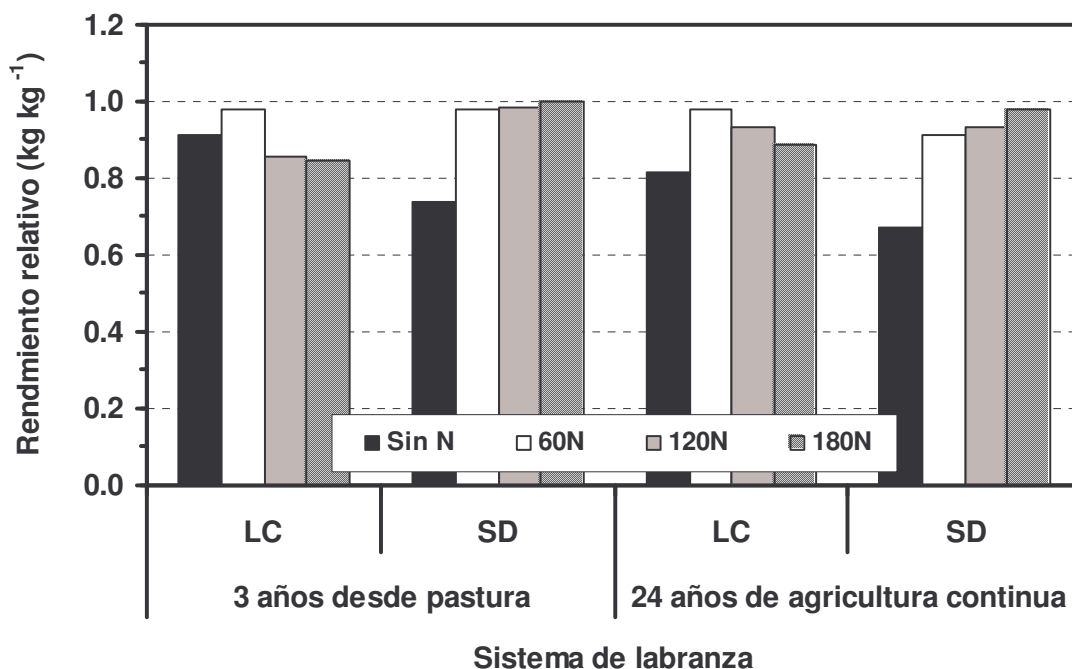
Uno de los principales efectos a largo plazo de las rotaciones tienen que ver con la capacidad del suelo de proveer N a los cultivos (Bullock, 1992). En el Sudeste Bonaerense, una de las consecuencias más importantes de los cambios en el contenido de MO ha sido sobre la dinámica del N y su disponibilidad. La disminución del N potencialmente mineralizable ( $N_0$ ) asociada a la agricultura continua bajo LC (Echeverría *et al.*, 1994a), se ha visto reflejada en cada vez más frecuentes deficiencias de N (Darwich, 1991) haciéndose necesaria la utilización de fertilizantes para el logro y mantenimiento de rendimientos elevados. Echeverría *et al.* (1994a) determinaron que suelos bajo rotación con pasturas presentaban mayor capacidad de mineralización de N

que suelos bajo agricultura continuada luego de varios años desde la última pastura. Esto se ve reflejado en los rendimientos de los cultivos y en las respuestas al agregado de N. Studdert y Rizzalli (1994) informaron una disminución de los rendimientos relativos de trigo sin fertilizar con N a lo largo de los años de agricultura luego de una pastura, mientras que al agregar fertilizante, aquéllos se mantuvieron en niveles elevados independientemente del período agrícola (Figura 7.4). La mineralización de las fracciones lábiles de la MO acelerada por las labranzas luego del período bajo pastura (Capítulo I) fue la causa principal de tal disminución.



**Figura 7.4. Variación del rendimiento relativo de trigo con y sin fertilizante nitrogenado en función de los años de agricultura luego de una pastura (adaptado de Studdert y Rizzalli, 1994).**

A través de la labranza se logra que haya una más activa mineralización del N de la MO. La reducción de la intensidad del laboreo si bien se asocia generalmente a mayor acumulación de MO (Havlin *et al.*, 1990; Allmaras *et al.*, 2000) y con ello de N orgánico (Campbel, 1978; Capítulo III), significa reducción en sus tasas de mineralización. Santamaría *et al.* (2004) demostraron que (Figura 7.5), sin el agregado de fertilizante nitrogenado, el trigo sembrado sin labranza (siembra directa, SD) sobre



**Figura 7.5. Rendimientos relativos de trigo con distintas dosis de fertilizante nitrogenado bajo distintos sistemas de cultivo. LC= labranza convencional, SD= siembra directa. 60N= 60 kg N ha<sup>-1</sup>; 120N= 120 kg N ha<sup>-1</sup>; 180N= 180 kg N ha<sup>-1</sup> (adaptado de Santamaría *et al.*, 2004). Nota: la agricultura continua bajo SD sólo cuenta con 6 años, anteriormente había sido agricultura continua bajo LC.**

suelos con pocos años de agricultura luego de pastura, rindió menos que cuando se lo sembró con LC en un suelo con una prolongada historia agrícola. El disturbio provocado por las labranzas expone necesariamente fracciones de la MO protegidas dentro de la estructura, aún luego de muchos años de uso continuo. El agregado de dosis crecientes de fertilizante tendió a equiparar los rendimientos, aunque inconvenientes con la economía del agua en el suelo bajo LC produjeron depresiones del rendimiento a dosis altas de fertilizante (Santamaría *et al.*, 2004).

Todo esto demuestra que, para las condiciones del Sudeste Bonaerense, la mineralización de la MO puede aportar una cantidad de N que contribuye a la economía y uso seguro de los fertilizantes. Los rendimientos potenciales crecientes de los cultivos y la intensificación del uso agrícola de los suelos requieren de un mayor uso de fertilizantes con lo que se incrementa el riesgo ambiental. Sería importante que a

través del manejo se pudiera hacer un uso más acabado de los servicios que el recurso suelo puede dar en este aspecto. No obstante, para ello es necesario laborearlo a fin de promover la mineralización y, si se pretende hacer un uso racional de la capacidad del suelo de proveer N, adquieren suma importancia las decisiones de manejo que permitan recomponer el reservorio del nutriente reducido por el uso (secuencia de cultivos, inclusión de pasturas, duración del período agrícola, fertilización). Por otro lado, las variaciones en el contenido de MO y la acción física directa de las labranzas tienen también efecto sobre otras propiedades del suelo que deberán ser tenidas en cuenta.

Así como las distintas secuencias promovieron tasas diferenciales de disminución de la MO del suelo, también lo hicieron con la capacidad del mismo de proveer N (Capítulo III). El  $N_0$  fue mayor en la capa arable del suelo bajo las secuencias con mayor frecuencia de cultivos con residuos de altos C:N y volumen. Si bien esto es un indicio de mayor capacidad de aporte de N para uso de los cultivos, las relaciones entre las variaciones en el contenido de MO y la disponibilidad de N no son siempre predecibles, constantes o directas y dependen, en gran medida, de los efectos de otros factores que actúan en el corto plazo sobre el proceso de mineralización/inmovilización con gran influencia sobre la disponibilidad de N en el suelo (Doran y Smith, 1987). La intensidad de este proceso varía en función de condiciones naturales (p.e. disponibilidad de agua, temperatura) o de alteraciones del ambiente edáfico provocado por prácticas de manejo (p.e. sistemas de laboreo, disposición de los residuos) (Power y Legg, 1978). No obstante, la cantidad y la calidad del sustrato (i.e. residuos de cosecha) disponible para los microorganismos, es un factor muy importante para el control de la tasa a la que el N puede estar disponible (Parr y Papendick, 1978). En el Capítulo III se demostró que la incidencia de las características de los residuos de los



cultivos desempeñó un rol fundamental en la definición de la disponibilidad de N para el trigo. Por las características del rastrojo del cultivo inmediatamente antecesor, la secuencia que reunía las condiciones para acumular la mayor cantidad de  $N_0$  era el que provocaba la más intensa inmovilización del N mineralizado a partir de la MO dejándolo indisponible para el cultivo. Así, los rendimientos y otros parámetros del cultivo se vieron fuertemente afectados por la reducción en la disponibilidad del nutriente. Se concluyó que no era posible o válido intentar predecir la disponibilidad del nutriente sin tener en cuenta estos procesos de corto plazo y los factores que los regulan, dado que sería poco verosímil y tendría escasa validez.

En el Capítulo IV, analizando la evolución de los rendimientos y de otras variables del cultivo de trigo a lo largo de los años sobre antecesores con residuos de distintas características, se confirmó la fuerte incidencia de éstos sobre la disponibilidad de N. Tanto los rendimientos como la acumulación de materia seca y de N en la biomasa aérea del cultivo mostraron una tendencia descendiente con los años de agricultura luego de una pastura tal como había sido observado por otros autores (Studdert y Rizzalli, 1994), pero la incidencia de los residuos estableció las tasas y la magnitud de tal descenso. El cultivo antecesor influencia tanto el momento y la cantidad de mineralización del N, y determina el momento y la cantidad que podrá absorber el cultivo (Debaeke *et al.*, 1996) debido a su participación directa en el comprometimiento de la biomasa microbiana del suelo respecto al balance inmovilización/mineralización. Esta influencia fue tan fuerte que enmascaró el efecto de largo plazo de las correspondientes secuencias de cultivos sobre el contenido de MO (Capítulo II) y con ellos de  $N_0$  (Capítulo III). Se demostró así un antagonismo entre los efectos de largo plazo de las secuencias de cultivo respecto al tamaño del reservorio lábil de N en el suelo y la dinámica de corto plazo para que el nutriente esté disponible para el cultivo

en el momento en que lo requiriera. Se puso también de manifiesto que la oportunidad de laboreo tuvo influencia sobre los procesos que determinan la descomposición del material y, con ello, sobre la sincronización del proceso con los requerimientos del cultivo. Todo lo expuesto refleja la complejidad de los procesos que regulan las dinámicas del C y del N en el suelo, pero que a través de *rotaciones de cultivos* y de laboreos pueden ser orientados para regular tanto su reserva en el suelo como la disponibilidad del N para los cultivos. Para las condiciones de los suelos estudiados, el laboreo permite lograr elevadas disponibilidades de N aún luego de un período agrícola prolongado (Santamaría *et al.*, 2004) y podría influir para reducir el efecto de los residuos del antecesor (p.e. a través de la agilización de la descomposición por mayor intensidad o por trozado del material). Sin embargo, la labranza afecta de manera directa otras propiedades del suelo que pueden condicionar su productividad.

Si bien la posición en el relieve de los suelos de los ensayos de larga duración analizados en este trabajo hace que el efecto de la erosión pueda ser considerado despreciable, la fisiografía de buena parte del Sudeste Bonaerense hace que la erosión hídrica sea un proceso de degradación de importancia (Costamagna *et al.*, 1984; Darwich, 1991). Con ello, la gravedad de las consecuencias de la erosión hace que su control o prevención deban ser necesariamente prioritarios en la planificación del manejo. La región impone cierta restricción a ese manejo ya que los suelos se hallan frecuentemente ubicados en posiciones del relieve que predisponen a la erosión. A través de las *rotaciones de cultivos* y del laboreo se podrá decidir el grado y la oportunidad de la cobertura, pero también se influirá sobre la condición física del suelo en superficie lo que definirá su resistencia a los agentes erosivos y el comportamiento del suelo frente a los excesos de agua provocados por las lluvias.

Las propiedades físicas del suelo también son afectadas por las rotaciones, generalmente debido a su efecto sobre la MO (Bullock, 1992) y a la acción diferencial de los sistemas radicales que se pueden combinar. El efecto de éstos se asocia a la producción de sustancias ligantes de las partículas del suelo y a su acción física directa que influye sobre la agregación y la porosidad (Tisdall y Oades, 1982; Haynes *et al.*, 1991; Bullock, 1992; Haynes y Francis, 1993; Robinson *et al.*, 1994). Sin embargo, el laboreo es la práctica de manejo que más influye sobre las propiedades físicas del suelo (Robinson *et al.*, 1994), no sólo porque afecta a la MO y al crecimiento de las raíces, sino también porque disturba de manera directa a la estructura del suelo.

La estabilidad de los agregados es una propiedad física del suelo indicadora de cuál será la reacción de los agregados y de la porosidad ante la ocurrencia de fenómenos ambientales (i.e. precipitaciones, ciclos de secado-humedecimiento) y es fuertemente afectada por el manejo. El índice de estabilidad de agregados (IEA) sufrió caídas muy abruptas al ingresar en un período agrícola convencional luego de una pastura (Capítulo I). En el ensayo que dio origen al Capítulo II se observó (Figura 7.6) un comportamiento similar del IEA a lo largo de los años de agricultura para distintas secuencias de cultivos bajo LC (Studdert y Echeverría, 2002). En ambos casos, a los seis años de agricultura se alcanzaron niveles de IEA de aproximadamente 30 con escasa diferencia entre secuencias de cultivos, lo que significa una muy importante reducción respecto a un suelo en condición inalterada. Por otro lado, coincidiendo con la bibliografía (Oades, 1984; Kay *et al.*, 1988; Bullock, 1992), la inclusión de una pastura en la rotación recompuso rápidamente la estabilidad alterada durante el período agrícola (Capítulo I) (Figura 7.7).

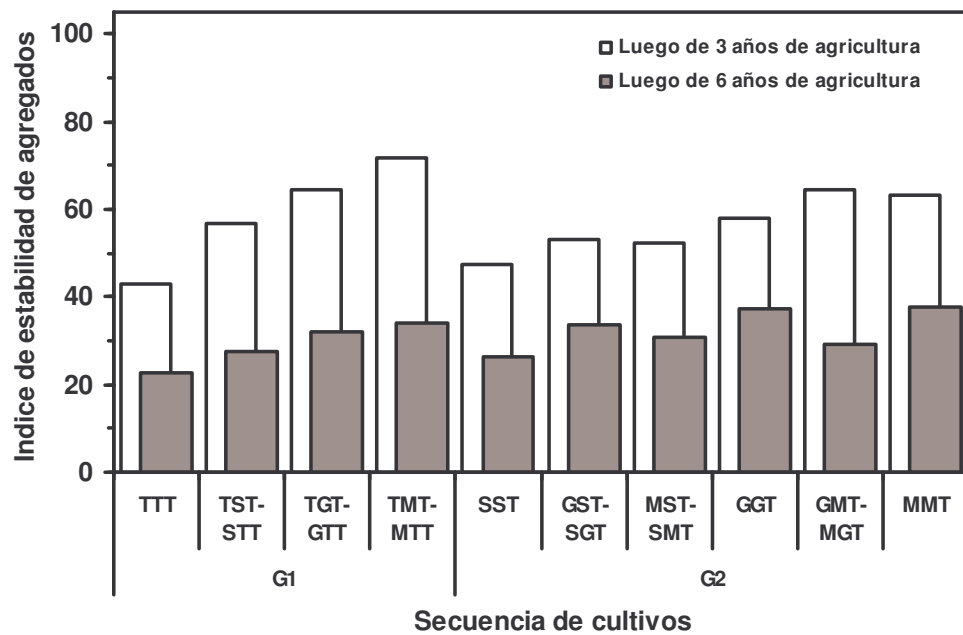


Figura 7.6. Índice de estabilidad de agregados en la capa arable luego de tres y seis años de agricultura con labranza convencional bajo distintas secuencias de cultivos. S: soja; M: maíz; G: girasol; T: trigo; G1: secuencias con un cultivo de verano cada tres años; G2: secuencias con dos cultivos de verano cada tres años (adaptado de Studdert y Echeverría, 2002).

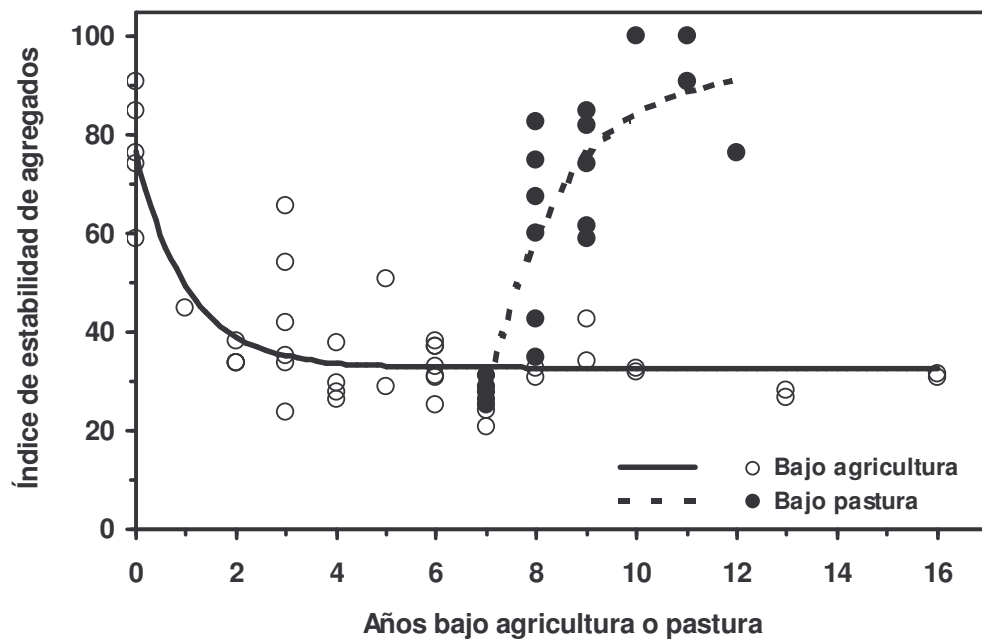
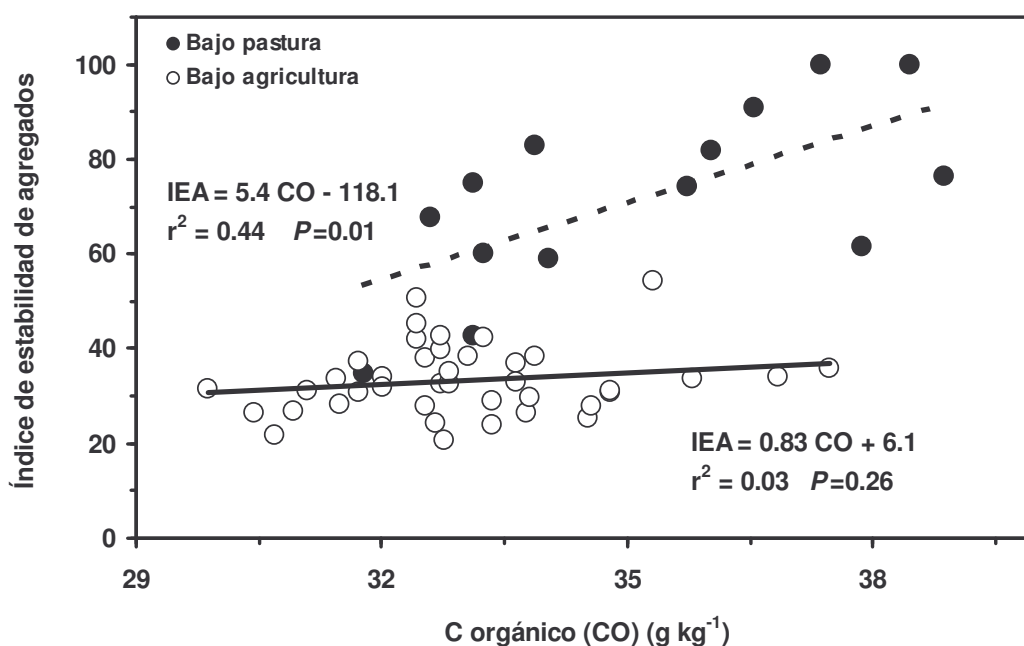


Figura 7.7. Variación del índice de estabilidad de agregados en la capa arable del suelo en rotaciones mixtas (adaptado de Tabla 3.2 y datos no publicados, Capítulo I).

Si bien parecerían estar estrechamente relacionadas, la variación en estabilidad estructural no fue explicada adecuadamente por la variación en MO (Figura 7.8, Capítulo I) ya que dicha relación no siempre es clara y está influenciada por otros factores (Oades, 1984). En la Figura 7.8 se puede ver que mientras bajo agricultura el IEA se mantuvo relativamente constante y a niveles bajos, independientemente del contenido de MO, bajo pastura hubo una relación directa y significativa entre ambas variables. La disrupción producida por el laboreo frecuente y la estacionalidad del aporte de residuos por parte de los cultivos agrícolas fueron citados como posibles causas de la falta de relación entre ambas variables durante el período agrícola. Por otro lado, la ausencia de disturbio, el constante aporte de material a través de las raíces de las pasturas y la acción física directa de las mismas, hicieron que a medida que se incrementaba la MO del suelo bajo pastura, se incrementara también la estabilidad de agregados.



**Figura 7.8.** Relación entre el índice de estabilidad de agregados en la capa arable y el contenido de C orgánico bajo pastura y bajo agricultura (adaptado de Capítulo I).

La estabilidad de los agregados se relaciona más estrechamente con el contenido de fracciones lábiles de la MO del suelo dado que éstas intervienen directamente en la estabilización de los macroagregados (Tisdall y Oades, 1982; Cambardella y Elliott, 1994). En el Capítulo I se demostró que el contenido de una fracción lábil de la MO, como la "fracción liviana", fue fuertemente alterado por la alternancia de agricultura-pastura y se mostraron algunas evidencias de que para los suelos bajo estudio la variación de esta fracción se habría relacionado con la del IEA.

Si bien Studdert y Rizzalli (1994) sugirieron que la leve caída que observaban en los rendimientos de trigo fertilizado con N (Figura 7.4) podría atribuirse a incipientes problemas físicos en el suelo, los resultados de Santamaría *et al.* (2004) demostraron que para los suelos bajo estudio, esto no fue así. No obstante, la intensa influencia de la LC sobre la estabilidad de los agregados y la ausencia de cobertura asociada a este sistema de labranza puede tener serias consecuencias sobre suelos ubicados en pendientes predisponentes a la erosión hídrica y, con ello, para la sostenibilidad del sistema.

## **8. CONCLUSIONES GENERALES**

## 8. CONCLUSIONES GENERALES

Para las condiciones edafoclimáticas del Sudeste Bonaerense, sobre suelos con escaso riesgo de erosión hídrica, no hubo suficientes evidencias para rechazar que:

- la inclusión de períodos bajo pastura en la *rotación de cultivos* permite recomponer las propiedades del suelo afectadas por la agricultura bajo LC,
- es posible definir un período mínimo bajo pastura y uno máximo bajo agricultura con LC para mantener el contenido de MO dentro de límites de variación compatibles con la sostenibilidad del sistema,
- la variación del contenido de MO del suelo durante el período agrícola puede ser manejado mediante la elección de los cultivos a incluir en la rotación y la fertilización nitrogenada, lo que influirá sobre la definición de la duración del mismo en sistemas con alternancia de agricultura-pastura,
- la prolongación de los ciclos agrícolas bajo LC produce una depresión en los rendimientos del cultivo de trigo asociada a los cambios en el contenido de MO y la capacidad del suelo de proveer N al cultivo, pero la disponibilidad de N para el cultivo es controlada por el cultivo antecesor y por lo tanto puede ser manejada a través de la elección del mismo.

Si bien no hubo suficientes evidencias para rechazar que, para las condiciones bajo estudio, la rotación de cultivos sea una herramienta idónea para mantener la sostenibilidad agrícola aún con el empleo de LC, sí existieron evidencias de que la prolongación de los ciclos agrícolas bajo ese sistema de labranza podría tener consecuencias de importancia en suelos con condiciones predisponentes para la degradación por erosión hídrica.



## **9. BIBLIOGRAFÍA GENERAL**

## 9. BIBLIOGRAFIA GENERAL

- Addiscott, T.M. 1995. Entropy and sustainability. *Eur. J. Soil Sci.*, 46:161-168.
- Allmaras, R.R., H.H. Schomberg, C.L. Douglas, Jr., and T.H. Dao. 2000. Soil organic carbon. Sequestration potential of adopting conservation tillage in U.S. croplands. *J. Soil Water Cons.* 55:365-373.
- Altieri, M.S. 1987. The agroecosystem: determinants, resources and processes. p. 29-45. *In: M.A. Altieri (ed.) Agroecology. The scientific basis of alternative agriculture.* Westview Press, Boulder, Colorado, E.E.U.U.
- Badaruddin, M. and D.W. Meyer. 1994. Grain legume effects on soil nitrogen, grain yield, and nitrogen nutrition of wheat. *Crop Sci.* 34:1304-1309.
- Baldock, J.O., R.L. Higgs, W.H. Paulson, J.A. Jackobs, and W.D. Shrader. 1981. Legume and mineral N effects on crop yields in several crop sequences in the upper Mississippi Valley. *Agron. J.* 73:885-890.
- Berardo, A. 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo del trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA Balcarce. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce. Boletín Técnico 128.
- Bullock, D.G. 1992. Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 11(4):309-326.
- Cambardella, C.A. and E.T. Elliott. 1994. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:123-130.
- Campbell, C.A. 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. p. 173-271. *In: M. Schnitzer and S.U. Khan (eds.) Soil organic matter. Developments in Soil Science 8.* Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, Holanda.

- Campbell, C.A., B.G. McConkey, R.P. Zentner, F. Selles, and D. Curtin. 1996. Tillage and crop rotation effects on soil organic C and N in a coarse-textured Typic Haploboroll in southwestern Saskatchewan. *Soil Tillage Res.*, 37:3-14.
- Campbell, C.A. and R.P. Zentner. 1993. Soil. organic matter as influenced by crop rotations and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1034-1040.
- C.F.A. 1995. El deterioro de las tierras en la República Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Consejo Federal Agropecuario, Buenos Aires, Argentina.
- Chan, K.Y. and D.P. Heenan. 1996. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. *Soil Tillage Res.*, 37:113-125.
- Collins, H.P., P.E. Rasmussen, and C.L. Douglas, Jr. 1992. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:783-788.
- Cook, R.J. 1993. Alternative disease management strategies. p. 129-134. *In: International Crop Science I.* Crop Science Society of America, Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Costamagna, O.A., A.T. Gualati, y P. Godz. 1984. Erosión de suelos en el área de influencia de la E.E.R.A. Balcarce. INTA, E.E.R.A. Balcarce, Boletín Técnico Nº 95.
- Crookston, R.K. and J.E. Kurle. 1989. Corn residue effect on the yield of corn and soybean grown in rotation. *Agron. J.*, 82:229-232.
- Crookston, R.K., J.E. Kurle, and P.J. Copeland. 1988. Relative ability of soybean, fallow, and triacontanol to alleviate yield reductions associated with growing corn continuously. *Crop Sci.*, 28:145-157.

- 
- Crookston, R.K., J.E. Kurle, P.J. Copeland, J.H. Ford, and W.E. Lueschen. 1991. Rotational cropping sequence affects yield of corn and soybean. *Agron. J.*, 83:108-113.
- Darwich, N.A. 1991. Estado actual y manejo de los recursos naturales en la región pampeana húmeda sur. p. 51-62. *In: Seminario Juicio a Nuestra Agricultura. Hacia el desarrollo de una agricultura sostenible. Actas Seminario Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina, 14-15 Nov. 1991. Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.*
- Darwich, N.A., M. Landi, C. Puricelli, y C. Rebella. 1985. Delimitación de áreas ecológicas homogéneas para el proyecto: "Sistemas de producción e incorporación de tecnología en áreas agrícolas-ganaderas (SPITAG)". Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce, Boletín Técnico 5, Documento SPITAG Nº 2.
- Debaeke, Ph., Th. Aussenac, J.L. Fabre, A. Hilaire, B. Pujol, and L. Thuries. 1996. Grain nitrogen content of winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) as related to crop management and to the previous crop. *Europ. J. Agron.*, 5:273- 286.
- Díaz Rossello, R. 1992a. Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agropecuarias*, 1(1):27-35.
- Díaz Rossello, R. 1992b. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agropecuarias*, 1(1):103-110.
- Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. p. 3-21. *In: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek and B.A. Stewart (eds.) Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Sp. Pub. Nº 35. Special Publication Nº 35. Soil Science Society of America, Inc.; American Society of Agronomy, Inc.; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.*

- Doran, J.W. and M.S. Smith. 1987. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients. p. 53-72. *In*: R.F. Follett *et al.* (eds.) Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. SSSA Special Publication Nº 19. Soil Science Society of America, Inc.; American Society of Agronomy, Inc.; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Echeverría, H.E. y J.L. Ferrari. 1993. Relevamiento de algunas características de los suelos agrícolas del sudeste bonaerense. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce, Boletín Técnico 112.
- Echeverría, H.E., C.A. Navarro, and F.H. Andrade. 1992. Nitrogen nutrition of wheat following different crops. *J. Agric. Sci. Cambridge*, 118:157-163.
- Echeverría, H.E., R. Bergonzi, y J. Ferrari. 1993. Carbono y nitrógeno de la biomasa microbial de suelos del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 10-11:36-41.
- Echeverría, H.E., R. Bergonzi, y J. Ferrari. 1994a. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 12:56-62.
- Echeverría, H.E., G.A. Studdert, H. Sarlangue, y J. Elverdín. 1994b. Siembra directa de trigo en el sudeste bonaerense. *Visión Rural*, III(11):33-38.
- Einhelling, F.A. 1996. Interactions involving allelopathy in cropping systems. *Agron. J.*, 88:886-893.
- Elliott, E.T. and C.V. Cole. 1989. A perspective on agroecosystem science. *Ecology*, 70:1597-1602.
- Entry, J.A., C.C. Mitchell, and C.B. Backman. 1996. Influence of management practices on soil organic matter, microbial biomass and cotton yield in Alabama's "Old Rotation". *Biol. Fertility Soils*, 23:353-358.

- Follett, R.F., S.C. Gupta, and P.G. Hunt. 1987. Conservation practices: relation to the management of plant nutrients for crop production. p. 19-51. *In*: R.F. Follett *et al.* (eds.) Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. SSSA Special Publication N° 19. Soil Science Society of America, Inc.; American Society of Agronomy, Inc.; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Francis, C.A. 1986. Introduction: Distribution and importance of multiple cropping. p. 1-19. *In*: C.A. Francis (de.) Multiple cropping systems. Macmillan Publishing Co., New York, New York, E.E.U.U.
- Francis, C.A. and M.D. Clegg. 1990. Crop rotations in sustainable agricultural systems. p. 107-122. *In*: C. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. Miller, and G. House (eds.) Sustainable agricultural systems. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, E.E.U.U.
- Fraser, P.M., R.J. Haynes, and P.H. Williams. 1994. Effects of pasture improvement and intensive cultivation on microbial biomass, enzyme activities, and composition and size of earthworm population. *Biol. Fertility Soils*, 17:185-190.
- Harwood, R. 1990. A history of sustainable agriculture. p. 3-19. *In*: C. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. Miller, and G. House (eds.) Sustainable agricultural systems. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, E.E.U.U.
- Havlin, J.L., D.E. Kisel, L.D. Maddux, M.M. Claasen, and J.H. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:448-452.
- Haynes, R.J. and G.S. Francis. 1993. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *J. Soil Sci.*, 44:665-675.

- 
- Haynes, R.J., R.S. Swift, and R.C. Stephen. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil Tillage Res.*, 19:77-87.
- Hesterman, O.B. 1988. Exploiting forage legumes for nitrogen contribution in cropping systems. p. 155-166. *In*: W.L. Hargrove (ed.) *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. ASA Special Publication N° 51. American Society of Agronomy, Inc.; Crop Science Society of America, Inc.; Soil Science Society of America, Inc.; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Hesterman, O.B., M.P. Ruselle, C.C. Sheaffer, and G.H. Heichel. 1987. Nitrogen utilization from fertilizer and legume residues in legume-corn rotations. *Agron. J.*, 79:726-731.
- Huggins, D.R., C.E. Clapp, R.R. Allmaras, J.A. Lamb, and M.F. Layese. 1998. Carbon dynamics in corn-soybean sequences as estimated from natural carbon-13 abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:195-203
- Ikerd, J.E. 1990. Agriculture's search for sustainability and profitability. *J. Soil Water Cons.*, 45:18-23.
- Kanal, A. and R. Kölli. 1996. Influence of cropping on the content, composition, and dynamics of organic residue in the soil of the plough layer. *Biol. Fertility Soils*, 23:153-160.
- Karlen, D.L. and A.N. Sharpley. 1994. Management strategies for sustainable soil fertility. p. 47-108. *In*: J.L. Hatfield and D.L. Karlen (eds.) *Sustainable agriculture systems*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, E.E.U.U.
- Kay, B.D., D.A. Angers, P.H. Groenevelt, and J.A. Baldock. 1988. Quantifying the influence of cropping history on soil structure. *Can. J. Soil Sci.*, 68:359-368.

- Knowles, T.C., B.W. Hipp, P.S. Graff, and D.S. Marshall. 1993. Nitrogen nutrition of rainfed winter wheat in tilled and no-till sorghum and wheat residues. *Agron. J.*, 85:886-893.
- Kurtz, L.T., L.V. Boone, T.R. Peck, and R.G. Hoelt. 1984. Crop rotations of efficient nitrogen use. p. 295-306. *In*: R.D. Hauck (ed.) Nitrogen in crop production. American Society of Agronomy, Inc.; Crop Science Society of America, Inc.; Soil Science Society of America, Inc.; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Lal, R. 1993. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil Tillage Res.*, 27:1-8.
- Lal, R. and F.J. Pierce. 1991. The vanishing resource. p. 1-15. *In*: R. Lal and F.J. Pierce (eds.) Soil management for sustainability. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, E.E.U.U.
- Lal, R. and B.A. Stewart. 1992. Need for land restoration. *Adv. Soil Sci.*, 17:1-11.
- Lamb, J.A., G.A. Peterson, and C.R. Cole. 1985. Wheat fallow tillage systems' effects on a newly cultivated grassland soils' nitrogen budget. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:352-356.
- Larson, W.E., R.F. Holt, and C.W. Carlson. 1978. Residues for soil conservation. p. 1-15. *In*: W.R. Oschwald (ed.) Crop residue management systems. ASA Special Publication N° 31. American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Lázaro, L. 1996. Determinación del rendimiento de trigo ante cambios en la disponibilidad de nitrógeno generada por distintos antecesores. Tesis *Magister Scientiae*. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.



- 
- Leighty, C.E. 1938. Crop rotation. p. 406-430. *In*: USDA Yearbook 1938. United States Department of Agriculture, Washington, DC, E.E.U.U.
- Liebman, M. 1987. Polyculture cropping systems. p. 115-125. *In*: M.A. Altieri (ed.) Agroecology. The scientific basis of alternative agriculture. Westview Press, Boulder, Colorado, E.E.U.U.
- Liebman, M. and R.R. Janke. 1994. Sustainable weed management practices. p. 111-143. *In*: J.L. Hatfield and D.L. Karlen (eds.) Sustainable agriculture systems. Lewis Publishers, Boca Ratón, Florida, E.E.U.U.
- Lory, J.A., G.W. Randall, and M.P. Russelle. 1995. Crop sequence effects on response of corn and soil inorganic nitrogen to fertilizer and manure nitrogen. *Agron. J.*, 87:876-883.
- Lovett, J.V. and R.S. Jessop. 1982. Effects of residues of crop plants on germination and early growth of wheat. *Aust. J. Agric. Res.*, 33:909-916.
- Luna, J.M. and G.J. House. 1990. Pest management in sustainable agricultural systems. p. 157-173. *In*: C. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. Miller, and G. House (eds.) Sustainable agricultural systems. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, E.E.U.U.
- Meadows, D.H., D.L. Meadows, and J. Randers. 1993. Más allá de los límites del crecimiento. Ediciones El País S.A./Aguilar S.E. de Ediciones, Madrid, España.
- Miller, D.A. 1996. Allelopathy in forage crop systems. *Agron. J.*, 88:854-859.
- Morris, P.J. and D.J. Parrish. 1992. Effects of sunflower residues and tillage on winter wheat. *Field Crops Res.*, 29:317-327.
- National Research Council. 1989. Alternative Agriculture. National Academy Press, Washington, D.C., E.E.U.U.

- 
- Norse, D., C. James, B.J. Skinner, and Q. Zhao. 1992. Agriculture, land use and degradation. p. 79-89. *In*: J.C.I. Doodge, G.T. Goodman, J.W.N. la Riviere, J. Marton-Lefevre, T. O'Riordan, F. Praderie (eds.) An agenda of science for environment and development into the 21<sup>st</sup> century. Conferencia en Vienna, Austria, Noviembre de 1991. Cambridge University Press, London, Reino Unido.
- Oades, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil*, 76:319-337.
- Parr, J.F. and R.I. Papendick. 1978. Factors affecting the decomposition of crop residues by microorganisms. p. 101-129. *In*: W.R. Oschwald (ed.) Crop residue management systems. ASA Special Publication Nº 31. American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Pedigo, L.P. 1991. Entomology and pest management. Macmillan Publishing Co., New York, New York, E.E.U.U.
- Pesek, J. 1994. Historical perspective. p. 1-19. *In*: J.L. Hadfield and D.L. Karlen (eds.) Sustainable agriculture systems, Lewis Publishers, Boca Ratón, Florida, E.E.U.U.
- Peterson, T.A. and G.E. Varvel. 1989a. Crop yield as affected by rotation and nitrogen rate. I. Soybean. *Agron. J.*, 81:727-731.
- Peterson, T.A. and G.E. Varvel. 1989b. Crop yield as affected by rotation and nitrogen rate. II. Grain sorghum. *Agron. J.*, 81:731-734.
- Peterson, T.A. and G.E. Varvel. 1989c. Crop yield as affected by rotation and nitrogen rate. III. Corn. *Agron. J.*, 81:7335-738.
- Peterson, G.A., D.G. Westfall, and C.V. Cole. 1993. Agroecosystem approach to soil and crop management research. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1354-1360.

- Pierce, F.J. and C.W. Rice. 1988. Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use. p. 21-42. *In*: W.L. Hargrove (de.) Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. ASA Special Publication N° 51. American Society of Agronomy, Inc.; Crop Science Society of America, Inc.; Soil Science Society of America, Inc.; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Power, J.F. 1990. Legumes in crop rotations. p. 178-204. *In*: C.A. Francis, C.B. Flora, and L.D. King (eds.) Sustainable agriculture in temperate zones. John Wiley and Sons, New York, New York, E.E.U.U.
- Power, J.F. 1994. Understanding the nutrient cycling process. *J. Soil Water Cons.*, 49 (suplemento del n° 2): 16-23
- Power, J.F. and J.W. Doran. 1988. Role of crop residue management in nitrogen cycling and use. p. 101-113. *In*: Hargrove, W.L. (ed.). Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. ASA Special Publication N° 51. American Society of Agronomy, Inc.; Crop Science Society of America, Inc.; Soil Science Society of America, Inc.; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Power, J.F. and R.F. Follett. 1987. Monoculture. *Scientific American*, 256 (3): 56-64.
- Power, J.F. and J.O. Legg. 1978. Effect of crop residues on the soil chemical environment and nutrient availability. p.85-100. *In*: W.R. Oschwald (ed.) Crop residue management systems. ASA Special Publication N° 31. American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America; Madison, Wisconsin, E.E.U.U.
- Putnam, A.R. 1988. Allelopathy: problems and opportunities in weed management. p. 77-88. *In*: M.A. Altieri and M. Liebman (eds.) Weed management in agroecosystems: ecological approaches. CRC Pres, Boca Raton, Florida, E.E.U.U.

- Raimbault, B.A. and T.J. Vyn. 1991. Crop rotation and tillage effects on corn growth and soil structural stability. *Agron. J.*, 83:979-985.
- Rearte, D.H. 1996. La integración de la ganadería argentina. SAGPyA, INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Reganold, J.P., R.P. Papendick, and J.F. Parr. 1990. Sustainable agriculture. *Scientific American*, 262(6):112-120.
- Reigner, E.E. and R.R. Janke. 1990. Evolving Strategies for managing weeds. p. 174-202. *In*: C. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. Miller, and G. House (eds.) Sustainable agricultural systems. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, E.E.U.U.
- Richter, D.D., L.I. Babbar, M.A. Huston, and M. Jaeger. 1990. Effects of annual tillage on organic carbon in a fine-textured udalf: the importance of root dynamics to soil carbon storage. *Soil Sci.*, 149:78-83
- Robinson, C.A., R.M. Cruse, and K.A. Kohler. 1994. Soil management. p. 109-134. *In*: J.L. Hatfield and D.L. Karlen (eds.) Sustainable agriculture systems. Lewis Publishers, Boca Ratón, Florida, E.E.U.U.
- Roder, W., S.C. Mason, M.D. Clegg, J.W. Doran, and K.R. Kniep. 1988. Plant and microbial responses to sorghum-soybean cropping systems and fertility management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1337-1342.
- S.A.G.P.yA. 2005. Cultivos de la Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. [www.sagpya.mecon.gov.ar](http://www.sagpya.mecon.gov.ar).
- Sánchez, S.R. 1997. Descomposición de residuos de cosecha y mineralización de nitrógeno en un Argiudol típico. Tesis *Magister Scientiae*. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.

- Santamaría, S.M., G.A. Studdert, y H.E. Echeverría. 2004. Sistemas de labranza y fertilización nitrogenada en trigo bajo distintas historias agrícolas. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 33(3):51-71.
- Shrader, W.D., W.A. Fuller, and F.B. Cady. 1966. Estimation of a common nitrogen response function for corn (*Zea mays*) in different crop rotations. *Agron. J.*, 58:397-401.
- Smettem, K.R. J., A.D. Rovira, S.A. Wace, B.R. Wilson, and A. Simon. 1992. Effect of tillage and crop rotation on the surface stability and chemical properties of a red-brown earth (Alfisol) under wheat. *Soil Tillage Res.*, 22:27-40.
- Sparling, G.P., T.G. Shepherd, and H.A. Kettles. 1992. Changes in soil organic C, microbial C, and aggregate stability under continuous maize and cereal cropping, and after restoration to pasture in soils from Manawatu region, New Zealand. *Soil Tillage Res.*, 24:225-241.
- Stecker, J. A., D.D. Buchholz, R.G. Hanson, N.C. Wollenhaupt, and K.A. McVay. 1995. Tillage and rotation effects on corn yield response to fertilizer nitrogen in Aqualf soils. *Agron. J.*, 87:409-415.
- Stenholm, C.W. and D.B. Waggener. 1990. Low-input sustainable agriculture: myth or method?. *J. Soil Water Cons.*, 45:13-17.
- Stevenson, F.J. 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur and micronutrients. John Willey and Sons Inc., New York, New York, E.E.U.U.
- Stewart, B.A., R. Lal, and S.A. El-Swaify. 1991. Sustaining the resource base of an expanding world agriculture. p. 125-144. *In*: R. Lal and F.J. Pierce (eds.). *Soil management for sustainability*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, E.E.U.U.

- Studdert, G.A. y H.E. Echeverría. 2002. Soja, girasol y maíz en los sistemas de cultivo del sudeste bonaerense. p. 413-443. En: F.H. Andrade y V. Sadras (eds.) Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja (2ª Edición). INTA – Facultad de Ciencias Agrarias (UNMP). Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- Studdert, G.A. y R.H. Rizzalli. 1994. Rotaciones mixtas: efecto de los años de agricultura sobre el rendimiento del trigo. p. 93-94. En: Actas "III Congreso Nacional de Trigo y Primer Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño Invernal", Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. 26-28 de octubre de 1994.
- Tisdale, S.L., W. L.Nelson, J.D. Beaton, and J.L. Havlin. 1993. Soil Fertility and Fertilizers. Fifth Edition. Macmillan Publishing Co., New York, New York, E.E.U.U.
- Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33:141-163.
- Tivy, J. 1990. Agricultural ecology. Logman Scientific and Technical, Essex, England, Reino Unido.
- Urbano Terrón, P. 1989. Tratado de fitotecnia general. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Vanotti, M.B. and L.G. Bundy. 1995. Soybean effects on soil nitrogen availability in crop rotations. *Agron. J.*, 87:676-680.
- Varvel, G.E. 1994. Rotation and nitrogen fertilization effects on changes in soil carbon and nitrogen. *Agron. J.*, 86:319-325.
- Varvel, G.E. and T.A. Peterson. 1990a. Nitrogen fertilizer recovery by corn in monoculture and rotation systems. *Agron. J.*, 82:935-938.
- Varvel, G.E. and T.A. Peterson. 1990b. Residual soil nitrogen as affected by continuous, two-year, and four-year crop rotation systems. *Agron. J.*, 82:958-962.

- Viglizzo, E.F. 1989. La interacción sistema-ambiente en condiciones extensivas de producción. *Revista Argentina de Producción Animal*, 9(4):279-294.
- Wani, S.P., W.B. Mc Gill, K.L. Haugen-Kozyra, and N.G. Juma. 1994. Increased proportion of active soil N in Breton loam under cropping systems with forages and green manures. *Can. J. Soil Sci.*, 74:67-74.
- Whiting, K.R. and R.K. Crookston. 1993. Host-specific pathogens do not account for the corn-soybean rotation effect. *Crop Sci.*, 33:539-543.
- Wood, C.W., D.G. Westfall, G.A. Peterson, and I.C. Burke. 1990. Impacts of cropping intensity and nitrogen mineralization under no-till dryland ecosystems. *Agron. J.*, 82:1115-1120.
- Wood, C.W., D.G. Westfall, and G.A. Peterson. 1991. Soil carbon and nitrogen changes upon initiation of no-till cropping systems in the West Central Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 470-476.
- Zadocks, J.C. and R.D. Schein. 1979. *Epidemiology and plant disease management*. Oxford University Press Inc., New York, New York, E.E.U.U.

# **ANEXO I**

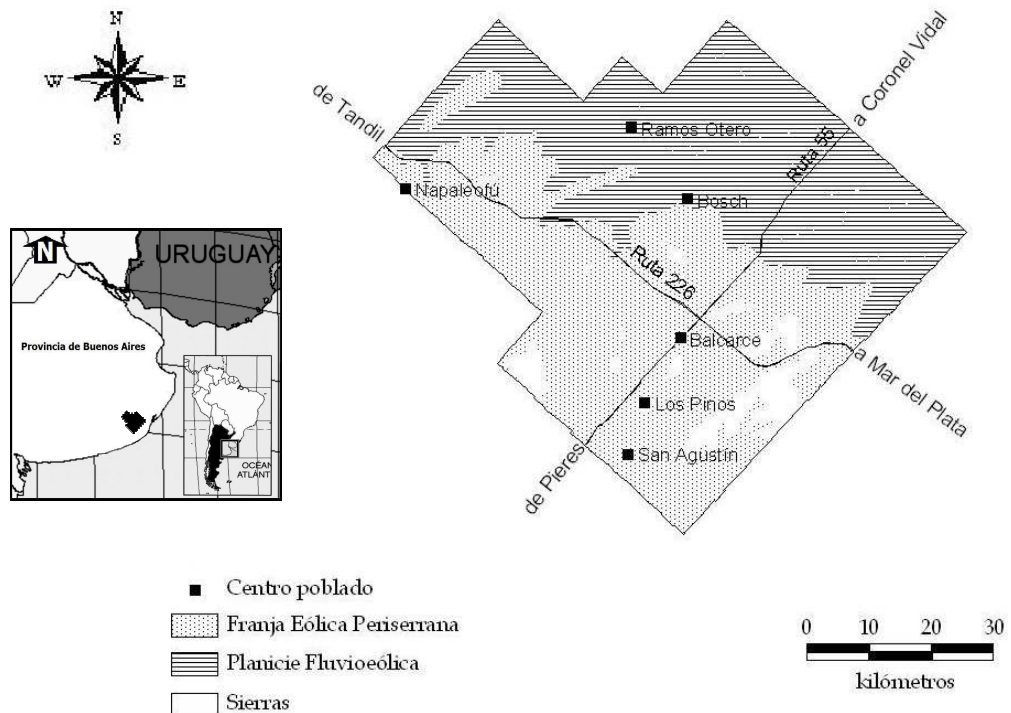


## ANEXO I

### CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS UTILIZADOS

#### I.1. Relación suelo-paisaje en el Partido de Balcarce (Adaptado de CGCC (2004) y F. Cabria, com. personal, 2005)

En el Partido de Balcarce se reconocen tres ambientes geomórficos principales: **Sierras**, **Franja Eólica Periserrana** y **Planicie Fluvioeólica** (Figura I.1). Las **Sierras** se presentan aisladas entre si y separadas por amplios valles que han sido cubiertos por depósitos eólicos, esencialmente limosos (loess) que forman un paisaje de colinas (**Franja Eólica Periserrana**). Hacia el norte este relieve de colinas pasa transicionalmente a una llanura de muy bajo gradiente (**Planicie Fluvioeólica**). La altitud máxima de las **Sierras** es de 383 m sobre el nivel medio del mar (msnm), mientras que en la **Planicie Fluvioeólica** se registra la menor altura del partido (35 msnm).



**Figura I.1. Ambientes geomórficos del Partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) (F. Cabria, com. personal, 2005).**

El ambiente de **Sierras** está constituido por el Sistema de Tandilia o Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires. Consiste en una serie de cerros alargados de cumbres chatas en forma de mesa, que son el producto del fallamiento y erosión de los mantos subhorizontales de ortocuarcitas de la Formación Balcarce (Paleozoico inferior). Dada su forma amesetada las Sierras de Balcarce han sido incluidas en la geoforma "Cumbres Planas" (Figura I.2). Las cumbres planas están generalmente cubiertas por depósitos eólicos del Pleistoceno Tardío-Holoceno, siendo en algunos casos lo suficientemente espesos como para el desarrollo de suelos que pueden ser utilizados para actividades agrícolas. En la parte central de las mesetas se ubican preferentemente asociaciones de Argiudoles Líticos y Paleudoles Petrocálculos, mientras que en los afloramientos rocosos al borde de aquéllas se encuentran Hapludoles Líticos. Ocasionalmente, cuando el espesor del depósito de loess supera 1 m de profundidad, se pueden encontrar Argiudoles Típicos. En el ambiente geomórfico de **Sierras**, los afloramientos y fragmentos rocosos, la tosca en superficie y la escasa profundidad efectiva de los suelos, son las principales limitantes para el uso agrícola de los suelos.

La **Franja Eólica Periserrana** está constituida por lomas de morfología compleja que se adosan a los frentes serranos u ocupan los amplios valles interserranos (Figura I.2). Estas lomas están constituidas esencialmente por depósitos del Pleistoceno tardío-Holoceno, pueden alcanzar alturas relativas de hasta 60 m y tienen formas que van desde las elongadas a las subcirculares o parabólicas. Su forma compleja se debe en parte a cauces de agua temporarios que modificaron parcialmente la morfología y, por otro lado, a la interferencia que ofrecieron los cuerpos de las sierras a los paleovientos del oeste y sudoeste favoreciendo el mayor depósito de los limos que transportaban. La forma de algunas lomas está influenciada



**Figura I.2. Vista del paisaje de las Sierras y de la Franja Eólica Periserrana del Partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) (fotografía G. Domínguez. com. personal, 2005).**

subsuperficialmente por los relieves positivos del basamento rocoso. Los suelos desarrollados sobre la **Franja Eólica Periserrana** son la mayoría de aptitud agrícola y pueden separarse, por un lado, en asociaciones de suelos que constituidas por Argiudoles Líticos, Paleudoles Petrocálcicos y Argiudoles Típicos en las cercanías de las **Sierras** o en las lomas controladas por una estructura rocosa subyacente. Las limitaciones más importantes de estos suelos para la producción son la profundidad efectiva y la susceptibilidad a la erosión hídrica debido a las pendientes pronunciadas. Por el otro, al oeste de las **Sierras** o en complejos de colinas con pendientes pronunciadas que se adosan a los frentes serranos y cuya altitud y extensión decrece al alejarse de las áreas más elevadas, los suelos dominantes son Paleudoles Petrocálcicos y Argiudoles Típicos. Las características intrínsecas de estos suelos no suelen afectar a la producción de cultivos, pero el riesgo de ocasionar daños a los cultivos o al recurso suelo se asocian a la susceptibilidad a los procesos erosivos debido a la elevada pendiente del terreno.

---

La **Planicie Fluvioeólica** corresponde a una llanura que se extiende desde la **Franja Eólica Periserrana** hacia el norte y el noreste. El relieve tiene escasa pendiente (0.1% y menores) y se caracteriza por una asociación de paleodunas parabólicas y longitudinales y cubetas de deflación (lagunas) y dunas de limo asociadas, generadas por procesos eólicos (paleovientos del sudoeste y oeste) tanto de erosión como de acumulación. En este ambiente, sector de transición entre el faldeo norte de las Sierras de Tandilla y las planicies de la Pampa deprimida, los suelos que se han desarrollado son Argiudoles Típicos con deficiencias de drenaje, Hapludoles Taptó-Argícos y Nátricos y, Argialboles, Natralboles y Natracuoles Típicos. En estos suelos el factor en común es el exceso de humedad, el cual suele afectar al rendimiento de los cultivos. El sodio intercambiable en exceso es frecuente a partir de los sectores medios del perfil.

## **I.2. Descripción de los suelos utilizados en los ensayos**

Los experimentos de larga duración analizados para este trabajo se ubican en el predio central de la Unidad Integrada Balcarce (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata - Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) (UIB). La UIB se encuentra ubicada en el ambiente **Franja Eólica Periserrana** del Partido de Balcarce. Los suelos sobre los que se desarrollaron los dos ensayos de larga duración pertenecen al Orden Molisoles y al Suborden Udoles.

### **I.2.1. Argiudol Típico**

Si bien este subgrupo de suelo se halla en los tres ambientes geomórficos del Partido de Balcarce (representa el 35.0 de la superficie del partido), es en la **Franja Eólica Periserrana** donde se presenta más frecuentemente. En este ambiente integra asociaciones de suelos junto con Paleudoles Petrocálcicos. En las **Sierras** se ha

desarrollado en los sitios donde el espesor del depósito de loess ha superado los 50 cm; y suele formar parte de asociaciones de suelos junto con Argiudoles Líticos y/o Paleudoles Petrocálculos. En la **Planicie Fluvioeólica** suele observarse en sitios donde las cotas aún son elevadas (F. Cabria, com. personal). El perfil del suelo está constituido por tres capas u horizontes principales "A", "Bt" y "C". Son suelos bien drenados con escurrimiento medio a rápido según su ubicación en el relieve y permeabilidad moderada a buena. El horizonte superficial es mólico, muy oscuro, y tiene textura franca y estructura granular, eventualmente en bloques que rompen a granular. El horizonte subsuperficial, "Bt", es generalmente de textura franco-arcillosa a arcillosa; y las unidades estructurales son prismas integrados por bloques. En este horizonte suelen distinguirse dos o tres subcapas, pudiendo ser reconocidas durante las descripciones en el campo gracias al aspecto que imprimen los barnices en las caras de los agregados. La tercera capa principal, horizonte "C", es el loess pampeano, material madre de los horizontes suprayacentes. En el horizonte superficial el pH es leve o moderadamente ácido y los contenidos de materia orgánica elevados (5 a 7%). El pH aumenta con la profundidad y disminuye el contenido de materia orgánica. Entre las capas u horizontes principales suelen hallarse horizontes de transición. El suelo presente en el sitio en que se desarrollaron las experiencias objeto de este trabajo, fue clasificado como Argiudol Típico, limoso fino, mixto, térmico e identificado como Serie Mar del Plata (INTA, 1979) y representa el 30.5% de la superficie del partido.

***1.2.1.1 Descripción del perfil típico de la Serie Mar del Plata (INTA, 1979; actualizada según SSS, 1999) (Figura 1.3)***

**Horizonte AP.** 0 – 15 cm. Pardo muy oscuro (10YR 2/1) en húmedo. Franco.

Estructura en bloques subangulares medios moderados que rompen en granular

migajosa fina, fuerte. Muy friable en húmedo. Raíces abundantes. Límite inferior abrupto suave.



**Figura I.3. Vista de un perfil típico de un suelo Serie Mar del Plata (INTA, 1979) (a) y de su paisaje (b) en el Partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) (fotografías G. Domínguez. com. personal, 2005).**

**Horizonte A.** 15 – 29 cm. Negro (10 YR 2/1) en húmedo. Franco. Estructura en bloques subangulares, fino, fuerte. Friable en húmedo. Raíces abundantes. Límite inferior claro suave.

**Horizonte BA.** 29 – 39 cm. Pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2) en húmedo. Franco. Estructura en bloques subangulares medios moderados que rompen a granular medios fuertes. Friable en húmedo. Ligeramente plástico, ligeramente adhesivo. Raíces abundantes. Límite inferior claro suave.

**Horizonte B<sub>t1</sub>.** 39 – 58 cm. Pardo a pardo oscuro (7,5 YR 4/2) en húmedo. Franco arcilloso. Estructura en prismas compuestos irregulares, bloque subangulares medios fuertes que rompen a prismas menores finos. Ligeramente firme en húmedo, plástico, adhesivo. Barnices húmico arcillosos comunes. Raíces comunes. Límite inferior claro suave.

**Horizonte B<sub>t2</sub>.** 58 – 76 cm. Pardo a pardo oscuro (7,5 YR 4/4) en húmedo. Franco arcilloso. Estructura en prismas irregulares gruesos que rompen en prismas

moderados menores. Ligeramente firme en húmedo, plástico, adhesivo. Barnices húmico-arcillosos escasos. Raíces escasas. Límite inferior claro suave.

**Horizonte BC.** 76 – 110 cm. Pardo claro (7,5 YR 6/4) en seco. Pardo a pardo oscuro (7,5 YR 4/4) en húmedo. Franco. Estructura en prismas compuestos irregulares medios débiles que rompen en bloques subangulares. Firme en húmedo. Ligeramente plástico, no adhesivo. Barnices húmico arcillosos escasos. Raíces escasas. Límite gradual suave.

**Horizonte C.** 110 –160. Pardo claro (7,5 YR 6/4) en seco. Pardo 7,5 YR 5/4) en húmedo. Franco arenoso. Estructura masiva. Muy firme en húmedo. Raíces escasas.

***1.2.1.2 Datos analíticos del perfil típico de la Serie Mar del Plata (INTA, 1979; descripción actualizada según SSS, 1999)***

**Tabla I.1. Datos analíticos de los horizontes del perfil típico de un suelo Serie Mar del Plata (INTA, 1979) en el Partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina).**

Variable edáfica	Horizonte						
	AP	A	BA	B <sub>t1</sub>	B <sub>t2</sub>	BC	C
Materia orgánica (%)	6.93	5.27	2.99	2.34	0.99	0.49	0.26
Carbono total (%)	4.03	3.06	1.74	1.36	0.58	0.29	0.04
N total (%)	0.34	0.25	0.15	0.12	0.07		
Relación C/N	12	12	11	11	9		
Arcilla (<2µm) (%)	23.1	22.4	23.6	33.3	31.4	19.6	13.7
Limo (2 – 50 µm) (%)	35.8	33.6	36.3	29.2	34.4	31.3	33.4
Arena muy fina (50-100 µm) (%)							
Arena fina (100-250 µm) (%)	39.4	42.5	38.8	35.7	32.5	46	50.4
Arena media (250-500 µm) (%)	1.7	1.5	1.3	1.8	1.7	3.1	2.2
Arena gruesa (500-1000 µm) (%)							
Arena muy gruesa (1-2 mm) (%)							
Calcáreo, CO <sub>3</sub> Ca (%)							
Equivalente de humedad, (%)	30.1	28.8	30.8	37.8	37.5	23.6	15.8
pH en pasta	5.2	5.4	5.8	6.1	6.3	6.5	7.0
pH en agua 1:2.5	5.9	6.1	6.3	6.7	7.0	7.2	7.6

**Tabla I.1 (continuación). Datos analíticos de los horizontes del perfil típico de un suelo Serie Mar del Plata (INTA, 1979) en el Partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina).**

Variable edáfica	Horizonte						
	AP	A	BA	B <sub>t1</sub>	B <sub>t2</sub>	BC	C
Cationes de intercambio							
Ca <sup>++</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	11.6	11.9	14.6	17.8	15.5	11.3	9.4
Mg <sup>++</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	1.9	3.3	3.6	5.8	7.3	5.2	4.0
Na <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	0.3	0.4	0.4	0.6	0.7	0.5	0.6
K <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	2.7	1.9	1.2	1.4	1.3	1.1	1.0
H <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	11.5	9.2	6.3	6.5	5.1	3.3	1.6
Suma de bases (cmol kg <sup>-1</sup> ) (S)	16.5	17.5	19.8	25.6	24.8	18.1	15.6
C.I.C., (cmol kg <sup>-1</sup> ) (T)	23.7	22.4	22.9	30.3	27.1	18.2	15.1
Saturación de bases (S/Tx100)	70	78	87	85	91	99	100

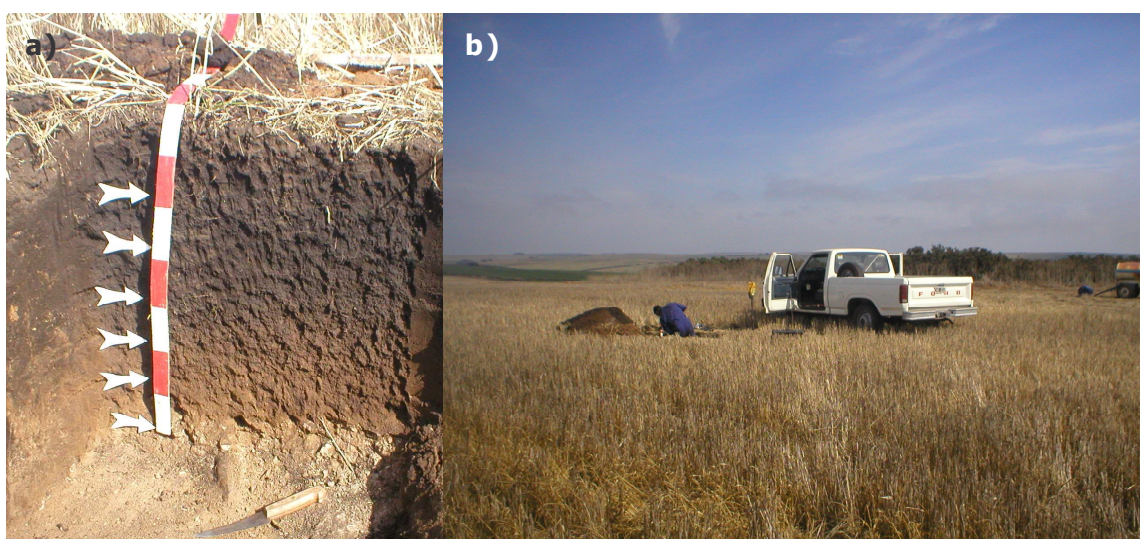
### I.2.2. Paleudol Petrocálcico

Este subgrupo de suelo (representa el 14.4% de la superficie del partido), junto con los Argiudoles Típicos, son los más abundantes en la **Franja Eólica Periserrana**. Suele conformar asociaciones de suelos con Argiudoles Líticos y Típicos en las cúspides mesetiformes de las **Sierras**. La secuencia de horizontes en el perfil y sus propiedades son similares a la de los Argiudoles Típicos. La distinción entre ambos subgrupos es el horizonte petrocálcico. Los Paleudoles Petrocálcicos presentan un horizonte de acumulación de carbonato de calcio cementado (tosca) por debajo del horizonte argílico a partir de los 50 cm de profundidad, pero no más allá de 1,5 m. Si bien el grado de cementación es variable, la dureza es suficiente como para que las raíces sólo puedan penetrar pocos centímetros a través de sus grietas. Son suelos bien drenados con escurrimiento medio a rápido según su ubicación en el relieve y permeabilidad moderada a buena. El suelo presente en el sitio en que se desarrollaron en las experiencias objeto de este trabajo, fue clasificado como Paleudol Petrocálcico, limoso fino, mixto, térmico e identificado como Serie Balcarce (INTA, 1979) y representa el 11.2% de la superficie del partido.



***1.2.2.1 Descripción del perfil típico de la Serie Balcarce (INTA, 1979; actualizada según SSS, 1999) (Figura I.4)***

**Horizonte A.** 0 – 23 cm. Gris oscuro (10YR 4/1) en seco. Negro (10YR 2/1) en húmedo. Franco. Estructura migajosa media moderada y granular fina. Duro en seco, muy friable en húmedo. Raíces abundantes. Límite inferior claro, suave.



**Figura I.4. Vista de un perfil típico de un suelo Serie Balcarce (INTA, 1979) (a) y de su paisaje (b) en el Partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) (fotografías G. Domínguez. com. personal, 2005).**

**Horizonte BA.** 23-31 cm. Pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2) en húmedo. Pardo muy oscuro en húmedo (10 YR 2/2). Franco arcillo arenoso. Estructura en bloques subangulares medios que rompen a granular. Duro en seco. Muy friable en húmedo. Ligeramente plástico, ligeramente adhesivo. Raíces comunes. Límite inferior claro suave.

**Horizonte B<sub>t1</sub>.** 31 – 54 cm. Pardo (7,5 YR 5/4) en seco. Pardo oscuro en húmedo (7,5 YR 3/2). Franco arcilloso. Estructura en prismas regulares medios que rompen en prismas finos. Extremadamente duro en seco, firme en húmedo. Muy plástico, adhesivo. Raíces escasas. Límite inferior claro suave.

**Horizonte B<sub>t2</sub>.** 54 – 70 cm. Pardo (7,5 YR 5/4) en seco. Pardo a pardo oscuro (7,5 YR 4/4) en húmedo. Franco arcilloso. Estructura en prismas irregulares medios que

rompen en bloques gruesos moderados. Muy duro en seco. Friable en húmedo.

Raíces escasas. Límite inferior claro suave.

**Horizonte 2C<sub>km</sub> (Tosca).** 70 a más cm.

***I.2.2.2 Datos analíticos del perfil típico de la Serie Balcarce (INTA, 1979; descripción actualizada según SSS, 1999)***

**Tabla I.2. Datos analíticos de los horizontes del perfil típico de un suelo Serie Balcarce (INTA, 1979) en el Partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina).**

Variable edáfica	Horizonte				
	A	BA	B <sub>t1</sub>	B <sub>t2</sub>	2C <sub>km</sub>
Materia orgánica (%)	7.06	4.54	2.06	1.10	
Carbono total (%)	4.11	2.64	1.20	0.64	
N total (%)	0.36	0.24	0.11	0.07	
Relación C/N	11	11	10	9	
Arcilla (<2 μm) (%)	25.7	27.8	31.3	29.3	
Limo (2 – 50 μm) (%)	31.5	27.3	28.3	35.0	
Arena muy fina (50-100 μm) (%)	41.6	43.2	39.0	34.8	
Arena fina (100-250 μm) (%)	1.2	1.7	1.4	0.9	
Arena media (250-500 μm) (%)					
Arena gruesa (500-1000 μm) (%)					
Arena muy gruesa (1-2 mm) (%)					
Calcáreo, CO <sub>3</sub> Ca (%)					
Equivalente de humedad, (%)	27.8	29.4	32.9	30.7	
pH en pasta	5.8	6.3	6.5	6.7	
pH en agua 1:2.5	7.0	7.4	7.4	7.8	
Cationes de intercambio					
Ca <sup>++</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	17.9	18.5	19.6	18.5	
Mg <sup>++</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	1.7	1.1	2.9	3.5	
Na <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	0.3	0.4	0.5	0.7	
K <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	2.3	1.9	1.4	0.9	
H <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )				5.1	
Suma de bases (cmol kg <sup>-1</sup> ) (S)	22.2	21.9	24.4	23.8	
C.I.C., (cmol kg <sup>-1</sup> ) (T)	29.4	25.1	29.2	24.4	
Saturación de bases (S/Tx100)	76	88	84	97	

### **I.3. Bibliografía**

- INTA. 1979. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja: 3757-31, Balcarce., Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Buenos Aires, Argentina.
- SSS. 1999. Soil Taxonomy: a basic system of classification for making and interpreting soil surveys. 2<sup>nd</sup> ed., Handbook N° 436, Soil Survey Staff, Natural Resource Conservation Service. United States Department of Agriculture. Washington, DC, E.E.U.U.
- CGCC. 2004. Atlas digital del Partido de Balcarce. En CD. Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata-Municipalidad de Balcarce. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

# **ANEXO II**

## ANEXO II

### CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DEL PARTIDO DE BALCARCE

Para esta caracterización se utilizó información generada en la Estación Meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEAB) (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm). La serie de tiempo utilizada es la comprendida entre 1971 y 2000.

El clima del partido se clasifica como **mesotermal subhúmedo-húmedo** (según Thornthwaite) o como **templado húmedo sin estación seca** ( $C_{fb}$ , según Köppen) (A. Irigoyen, com. personal, 2005).

#### II.1. Precipitaciones

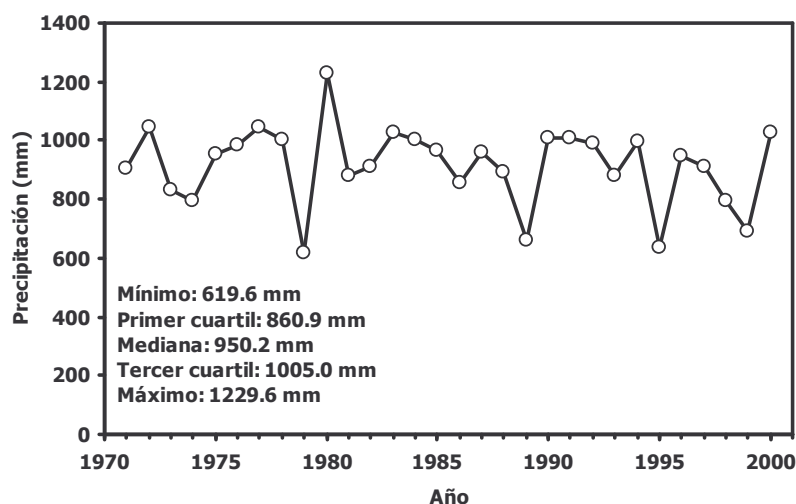
**Tabla II.1. Estadísticos descriptivos básicos de la precipitación mensual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el período 1971-2000. Estación Meteorológica, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).**

Estadístico	Precipitación mensual											
	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	----- mm -----											
Mínimo	33.2	10.2	14.9	5.8	1.9	2.8	0.0	2.5	4.9	16.0	34.6	33.4
C1*	79.8	46.8	50.7	43.3	35.5	18.2	16.2	19.3	35.3	66.1	49.5	74.7
Mediana	102.9	70.9	74.8	61.3	56.0	45.6	48.1	37.2	49.3	91.2	62.9	99.8
C3*	130.9	106.4	110.0	93.0	88.4	67.7	71.9	59.0	73.6	116.6	106.7	147.8
Máximo	200.0	224.5	199.6	378.7	168.6	164.6	136.3	146.4	116.6	244.4	229.0	283.3

\* C1: primer cuartil; C3: tercer cuartil.

Irigoyen *et al.* (1998), analizando información de precipitaciones de la serie 1930-1995, informaron que las precipitaciones invernales son las que menos contribuyen a la precipitación anual, mientras que las estivales son las que más contribuyen. Asimismo, Irigoyen *et al.* (1998) demostraron una tendencia creciente en el tiempo de la contribución de las precipitaciones estivales a la precipitación total, mientras que para

las invernales la tendencia fue inversa. La mediana de precipitación acumulada anual para el período considerado es de 950.2 mm (Figura II.1).



**Figura II.1. Evolución de la precipitación acumulada anual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el período 1971-2000. Estación Meteorológica, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).**

## II.2. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>)

**Tabla II.2. Estadísticos descriptivos básicos de la evapotranspiración de referencia (según Penman-Monteith) diaria del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el período 1971-2000. Estación Meteorológica, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).**

Estadístico	Evapotranspiración de referencia diaria											
	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	----- mm día <sup>-1</sup> -----											
Mínimo	1.7	1.4	0.7	0.4	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4	0.7	1.2	0.9
C1*	4.2	3.5	2.4	1.4	0.8	0.5	0.6	1.0	1.6	2.2	3.1	3.9
Mediana	4.9	4.2	3.1	1.8	1.1	0.7	0.8	1.3	2.1	2.9	4.0	4.7
C3*	5.6	4.8	3.7	2.3	1.4	1.0	1.1	1.7	2.6	3.5	4.7	5.5
Máximo	8.9	7.3	6.3	4.7	3.4	3.3	2.7	3.4	4.6	7.1	8.0	9.2

\* C1: primer cuartil; C3: tercer cuartil.

Entre los meses de noviembre y febrero entre el 46.6 y el 66.2% de los valores de ET<sub>0</sub> diaria están en el intervalo de 4.0 a 5.9 mm día<sup>-1</sup>. Entre abril y agosto, entre el 58.9 y el 99.2% de los valores de ET<sub>0</sub> diaria están en el intervalo de 0.0 a 1.9 mm día<sup>-1</sup>

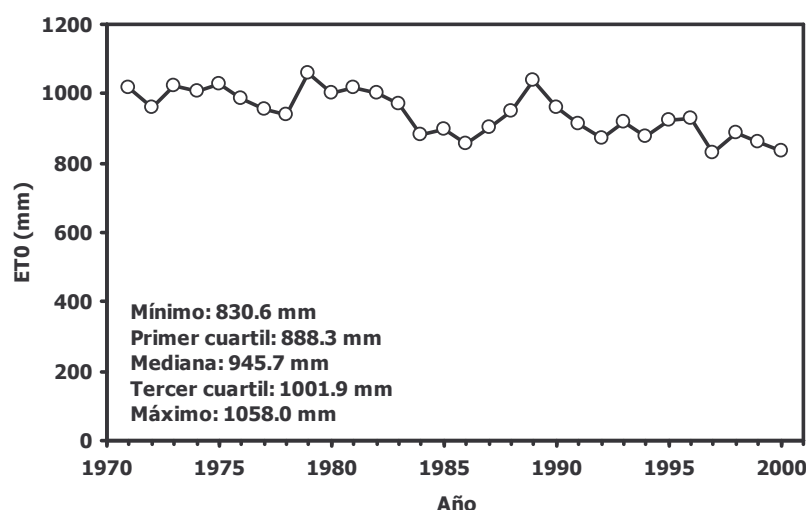
de ET0 y entre mayo y julio entre el 77.7 y el 44.2%, lo están en el intervalo entre 0.0 y 0.9 mm día<sup>-1</sup>. Esta estacionalidad está más fuertemente condicionada por el término radiativo del modelo Penman-Monteith (A. Irigoyen, com. personal, 2005).

**Tabla II.3. Estadísticos descriptivos básicos de la evapotranspiración de referencia (según Penman-Monteith) acumulada mensual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el período 1971-2000. Estación Meteorológica, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).**

Estadístico	Evapotranspiración de referencia mensual											
	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	----- mm -----											
Mínimo	122.5	93.7	71.0	45.2	24.3	15.5	20.0	29.6	44.0	72.4	90.4	100.4
C1*	138.0	110.1	86.6	49.7	31.2	19.7	23.2	36.5	57.5	77.9	105.9	132.0
Mediana	145.9	116.0	92.8	55.4	34.6	22.2	24.5	43.0	60.5	84.5	111.8	141.3
C3*	157.6	121.7	100.9	61.1	37.3	25.9	28.4	47.0	67.8	94.4	125.3	152.5
Máximo	173.4	133.2	120.1	76.6	43.4	34.5	39.2	54.7	80.4	118.1	139.3	168.3

\* C1: primer cuartil; C3: tercer cuartil.

La mediana de evapotranspiración de referencia acumulada anual para el período considerado es de 945.7 mm (Figura II.2).



**Figura II.2. Evolución de la evapotranspiración de referencia (según Penman-Monteith) (ET0) acumulada anual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el período 1971-2000. Estación Meteorológica, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).**

Irigoyen *et al.* (2004), analizando la variación intra e interanual del balance de agua mensual para dos suelos de la **Franja Eólica Interserrana** similares a los descritos en el Anexo I, informaron que entre los meses de mayo y octubre en ambos suelos los valores máximos de almacenaje igualaron al límite máximo de almacenaje del suelo y equivalieron al cuartil superior. Por otro lado, para el suelo más profundo (Argiudol típico) el límite mínimo de agua útil en el suelo se alcanza sólo durante los meses de verano, mientras que para el suelo menos profundo (Paleudol Petrocálcico) se lo alcanza entre los meses de primavera y verano. Con ello, la probabilidad de déficit de agua o de baja evapotranspiración relativa (evapotranspiración real/ET<sub>0</sub>) es mayor en el Paeludol Petrocálcico.

### II.3. Temperatura

Las temperaturas máximas, mínimas y medias diarias (Tablas II.4, II.5 y II.6, respectivamente), así como las amplitudes térmicas, presentan cambios estacionales con menores valores entre junio y agosto y mayores valores entre diciembre y marzo.

**Tabla II.4. Estadísticos descriptivos básicos temperatura diaria máxima del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el período 1971-2000. Estación Meteorológica, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).**

Estadístico	Temperatura diaria máxima											
	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	----- °C -----											
Mínimo	16.0	10.2	12.5	10.6	7.0	4.9	3.5	3.0	6.9	8.5	10.6	12.6
C1*	24.5	23.5	21.3	17.5	13.7	10.5	9.6	11.4	13.5	16.0	19.2	22.5
Mediana	27.5	26.4	24.0	20.0	16.0	12.5	12.0	14.0	16.1	19.0	22.2	25.7
C3*	30.1	29.0	27.0	22.6	18.3	14.8	14.5	16.9	19.0	22.1	25.0	28.8
Máximo	37.5	39.9	36.5	30.1	27.5	22.7	25.3	27.6	29.7	32.7	34.0	38.0

\* C1: primer cuartil; C3: tercer cuartil.



**Tabla II.5. Estadísticos descriptivos básicos temperatura diaria mínima del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el período 1971-2000. Estación Meteorológica, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).**

Estadístico	Temperatura diaria mínima											
	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	----- °C -----											
Mínimo	3.7	2.5	3.0	0.0	-1.6	-2.5	-3.8	-4.0	-4.4	-1.1	-0.1	0.5
C1*	11.0	10.4	9.0	6.1	3.3	1.5	1.3	1.5	2.0	4.6	6.7	9.2
Mediana	13.8	13.3	12.0	9.0	6.0	3.4	3.0	3.5	4.7	7.2	9.4	11.9
C3*	16.4	16.0	14.7	11.5	8.8	6.0	5.4	6.0	7.3	9.8	12.0	14.6
Máximo	21.6	22.1	22.1	18.0	19.1	14.6	16.2	15.2	16.6	17.6	19.0	23.7

\* C1: primer cuartil; C3: tercer cuartil.

**Tabla II.6. Estadísticos descriptivos básicos temperatura diaria media del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el período 1971-2000. Estación Meteorológica, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).**

Estadístico	Temperatura diaria media											
	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	----- °C -----											
Mínimo	3.7	2.5	3.0	0.0	-1.6	-2.5	-3.8	-4.0	-4.4	-1.1	-0.1	0.5
C1*	11.0	10.4	9.0	6.1	3.3	1.5	1.3	1.5	2.0	4.6	6.7	9.2
Mediana	13.8	13.3	12.0	9.0	6.0	3.4	3.0	3.5	4.7	7.2	9.4	11.9
C3*	16.4	16.0	14.7	11.5	8.8	6.0	5.4	6.0	7.3	9.8	12.0	14.6
Máximo	21.6	22.1	22.1	18.0	19.1	14.6	16.2	15.2	16.6	17.6	19.0	23.7

\* C1: primer cuartil; C3: tercer cuartil.

El cambio de temperatura es más brusco desde los meses cálidos a los fríos que desde los fríos a los cálidos. Las amplitudes térmicas oscilan entre 0.9 °C y 28.0 °C con una mediana de 11.5 °C. El valor medio mensual de amplitud térmica más elevado es en el mes de diciembre (13.9 °C) y el más bajo, en el mes de junio (9.1 °C) (San Martino *et al.*, 2002).

#### II.4. Heladas

Las características generales del régimen de heladas del sudeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina) indican como de baja peligrosidad las heladas estivales e invernales y de moderada o alta peligrosidad las primaverales y otoñales. Esto se debe a que, si bien las heladas tempranas y tardías suelen ser de baja intensidad, se producen en momentos de mayor susceptibilidad de los cultivos (Irigoyen, 1993). Se define como helada meteorológica (HM) a la ocurrencia de una temperatura mínima diaria que no supere los 0 °C a 1.5 m de altura en abrigo meteorológico, y como helada agrometeorológica (HA) a la ocurrencia de una temperatura mínima diaria que no supere los 3 °C a 1.5 m de altura en abrigo meteorológico (Monterubbiansesi y Cendoya, 2001).

Según la información de la Estación Meteorológica de la EEAB, en Balcarce hay 23 días en el año con HM y 73 días con HA, produciéndose la mayor parte de ellos entre los meses de mayo y septiembre. En la Tabla II.7 se muestran las fechas de primera y última helada y la duración de los períodos con y sin heladas.

**Tabla II.7. Fechas de primera y última helada y períodos con y sin heladas del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el período 1971-2000. Estación Meteorológica, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).**

Variable	Helada meteorológica		Helada agrometeorológica	
	Medio	Extremo	Medio	Extremo
Fecha primera helada	27/05	12/04	21/04	25/02
Fecha última helada	3/10	13/11	17/11	22/12
Período libre de heladas (d)	236	173	155	86
Período con heladas (d)	129	192	210	279

En el análisis realizado por Monterubbiansesi y Cendoya (2001) se observó que a lo largo del período 1971-1999 hubo una tendencia significativa de acortamiento del período con heladas. Esto llevó a que los períodos libres de HM y de HA durante la

última década fueran de 267 días y 190 días, respectivamente, lo que significa 1.2 y 1.4 veces la duración promedio de las dos décadas anteriores.

## **II.5. Bibliografía**

Irigoyen, A. 1993. Ocurrencia de heladas tempranas y tardías en el centro-sudeste de la Provincia de Buenos Aires. p. 161-163. En: Actas II Jornadas Nacionales de defensa c ontra heladas y Primer Seminario internacional. Mendoza, Mendoza, Argentina. 23-26 de mayo de 1993.

Irigoyen, A.I., E.E. Suero, y J.M. Gardiol. 1998. Tendencia y estacionalidad de la precipitación en Balcarce. En CD, 5 pág. En: Actas "X Congreso Brasileiro de Meteorología y VIII Congreso de la Federación Latinoamericana e Ibérica de Sociedades de Meteorología. Brasilia, Brasil. 26-30 de octubre de 1998.

Irigoyen, A.I., A.I. Della Maggiora, y F.N. Cabria. 2004. Balance de agua seriado para tgres perfiles de suelo del ambiente geomorfológico lomas interserranas de Balcarce (Arg.). En CD. En: Actas "X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología". Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. 13-15 de octubre de 2004.

Monterubbianesi, M.G. y M.G. Cendoya. 2001. Caracterización del régimen de heladas meteorológicas y agrometeorológicas en Balcarce (Argentina) en el pweríodo 1970-1999. Rev. Facultad de Agronomía, 21(1):69-78.

San Martino, S., A. Della Maggiora, y G. Monterubbianesi. 2002. El régimen de temperaturas máximas y mínimas y amplitudes térmicas en Balcarce (Argetnina) y su relación con el ENOS y la ocurrencia de precipitaciones. Rev. Arg. Agrometeorología, 2(1):89-96.