



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN AGRONOMIA

**LOS CULTIVOS DE COBERTURA Y LA PRODUCTIVIDAD DEL
MAÍZ EN SIEMBRA DIRECTA: DINÁMICA DEL NITRÓGENO,
AGUA Y FRACCIONES ORGÁNICAS DEL SUELO**

Eduardo de Sá Pereira

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2013

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Agronomía, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en cinco sitios de la región de Ventania y en un invernáculo perteneciente al CERZOS, CCT-Bahía Blanca del CONICET. Las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Ambiente (LabSPA, CERZOS – Agronomía UNS) y laboratorio de Forrajes de la EEA INTA Bordenave en el ámbito del Departamento de Agronomía durante el período comprendido entre el 12 de septiembre de 2008 y el 17 de julio de 2012, bajo la dirección del Dr. Juan Alberto Galantini, Investigador CIC (CERZOS-Dpto. de Agronomía, UNS).

Eduardo de Sá Pereira



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/....../..... , mereciendo la calificación de
.....(.....)

RESUMEN

El proceso de agriculturización ha significado una reducción del aporte de residuos por la mayor participación de cultivos de soja y girasol. La utilización de cultivos de cobertura (CC) durante el período improductivo, permite mantener el suelo cubierto, reciclar nutrientes y aumentar el ingreso de carbono al sistema. El objetivo de este estudio fue evaluar la introducción de distintos CC como una nueva alternativa tecnológica en el cultivo de maíz estudiando la dinámica del agua, del N y de las fracciones orgánicas para seleccionar aquellas que permitan un uso eficiente y un aumento de la productividad del agrosistema. Los estudios se desarrollaron en cinco sitios experimentales E₁, “La Emilia”; E₂, “Paraje G8”; E₃, “La Uruguay”; E₄, “El Hinojo”; E₅, “Cura Malal”, todos Argiudoles típicos. Los tratamientos principales fueron: Avena (*Avena sativa* L), Vicia (*Vicia sativa* L), Trébol pastoreo “Laser” (*Trifolium resupinatum*), Trébol cobertura “Leithering” (*Trifolium resupinatum*), Trébol balanza (*Trifolium balansae*), Avena + Vicia y un testigo (Barbecho químico). En E₁ y E₂ se incluyeron subparcelas con cinco dosis de nitrógeno (0, 40, 80, 120, 160 kg ha⁻¹). En los E₃, E₄ y E₅ las dosis utilizadas fueron de 0 y 80 kg ha⁻¹. Se realizó un ensayo en macetas sin disturbar con el mismo suelo sin cultivo en invernáculo. Se utilizaron residuos de los CC de avena, vicia y trébol, a los que se les determinó: N, celulosa, hemicelulosa, compuestos no estructurales y lignina. Se determinó el peso del residuo superficial remanente y las diferentes fracciones de la materia orgánica (MO) a lo largo de un año. Las precipitaciones durante los tres años en estudio permitieron la recarga del perfil suelo y extender el crecimiento de los CC hasta muy próximo a la siembra del cultivo de verano. La biomasa aérea de vicia presentó las mayores concentraciones de N en la materia seca (MS) producida. Los diferentes CC presentaron relaciones C:N y Lignina:N que estuvieron en función de la cantidad de MS producida por el cultivo. El CC y la cantidad de residuo influyeron sobre los parámetros de calidad evaluados y estos podrían tener su efecto en la disponibilidad de N y C en el suelo para el cultivo siguiente. Las ventajas de la utilización de la vicia como CC para ofrecer nitrógeno al cultivo de maíz sembrado en sucesión fueron variables según el año y las condiciones climáticas. La velocidad de descomposición inicial fue mayor en vicia, luego en avena y menor en trébol. La mayor descomposición fue para los residuos de avena y vicia. Los resultados de la aplicación de un modelo matemático para la simulación de la descomposición de los diferentes residuos de los CC pusieron de manifiesto un buen ajuste con los datos reales. La tasa de descomposición de las coberturas puede ser utilizada para estimar la durabilidad de los residuos en el campo. Las fracciones más lábiles, el carbono orgánico particulado y los carbohidratos totales y solubles fueron los más afectados por el tipo de residuo en el corto plazo.

Palabras claves. Cultivos de cobertura, vicia, avena, trébol, calidad de residuos, modelo de simulación.

ABSTRACT

The process of agriculturization has caused an important reduction in the carbon incorporation, due to a higher participation of soybean and sunflower crops. The use of winter cover crops (CC) during this period unproductive allows keeping the soil covered, recycling nutrients and produces a new entrance of stubble and organic matter (MO) to the system. The aim of this study was to evaluate the introduction of different CC as a new technological alternative in the maize crop studying the dynamics of water, N y organic fractions and select those that allow an efficient use and an increase of the agrosystem productivity. Studies were carried out in five experimental sites “La Emilia” (E₁), “Paraje G8” (E₂), “La Uruguay” (E₃), “El Hinojo” (E₄) and “Cura Malal” (E₅); all of them Typic Argiudols. The main treatments were: oat (*Avena sativa* L), hairy vetch (*Vicia sativa* L), ley clover “Laser” (*Trifolium resupinatum*), cover clover “Leithering” (*Trifolium resupinatum*), balansa clover (*Trifolium balansae*), common oat + common vetch and a monolith/sample board (chemical fallow). The subparcels in E₁ and E₂ were represented by five doses of N (0, 40, 80, 120, 160 kg ha⁻¹). In E₃, E₄ and E₅, the doses used were 0 and 80 kg ha⁻¹. Another trial was made in pots with undisturbed soil with oat, vetch and clover residues. The remaining superficial residues and different fractions of MO weight were calculated along a year. The rainfall during the three-year-study allowed the soil profile recharge and to extend CC growth until very near to the seeding summer crop. The above-ground vetch biomass showed the highest concentrations of N in the dray matter (MS) produced. The different CC showed relations C:N and Lignina:N that correlated to the amounts of MS produced by the crop above-ground biomass. The quality parameters evaluated influenced on waste quality in the CC and these could affect the availability of N and C in the soil for the following crop. Applying high doses of N fertilizer in the following maize sown, the advantages of using vetch as a cover crop on the soil to offer nitrogen varied according to the year and weather conditions. The speed of initial decay was higher in vetch, then in oat and lower in clover. The highest decay was found in soil with oat and vetch as CC. The mathematical model allowed simulating the CC residue decay with a good adjustment with real data. The decay rate in CC can be used to calculate the residue durability on the field. The most labile fractions as particulate organic carbon, total and soluble carbohydrates were the most affected by the type of waste in a short term.

Key words: Cover crop, oats, vetch, clover, residue quality, simulation model

DEDICATORIA

A María mi esposa

A mis padres Lilian y Julio

AGRADECIMIENTOS

- ✓ Quiero agradecer muy especialmente a mi director, Juan Alberto Galantini por su constancia, ayuda y motivación permanente.
- ✓ A los asesores y correctores de este trabajo Dr. Alberto Quiroga, Ing. Agr. (M. SC.) Ana Miglerina y Dr. Hugo Laborde.
- ✓ Al Dr. Alberto Quiroga por su orientación, motivación y aliento durante todo el desarrollo y escritura de mi tesis.
- ✓ Al Dr. Hugo Krüger por sus valiosos aportes en la redacción y material bibliográfico.
- ✓ A mis compañeros de la EEA Bordenave y Campo Exp. Cesareo Naredo y en especial a: Ing. Agr. Alejandro Vallati, Lic. M.Sc. María Coria, Ing. Agr. M.Sc. Germán Balbarrey.
- ✓ Al departamento de Agronomía de la UNS, a sus profesores y personal no docente.
- ✓ A los establecimientos en los cuales se realizaron los ensayos: Estancia “La Emilia”, “La Uruguaya” (Flia. Kaiser), “La Susana” (Sr. Enrique Pedelaborde), “El Arroyito” (Sr. Pablo Walter) y “BAMALU” (Sr. Luis Balzi) productores del Grupo Cambio Rural “El Hinojo” de INTA.
- ✓ Al laboratorio de Forrajes de la EEA Bordenave (Tec. Mónica Tulesi y Miguel Dupuy).
- ✓ A los ayudantes de campo (Omar Roldan, Faustino Balbidares, Sergio Suppes y Germán González).
- ✓ Al INTA por el financiamiento de este trabajo.
- ✓ Al CERZOS (CCT CONICET Bahía Blanca) por la facilidades brindadas.
- ✓ Laboratorio de Suelos, Plantas y Ambiente (LabSPA, CERZOS – Agronomía UNS).

ABREVIATURAS

AAPRESID	Asociación Argentina de Productores de Siembra Directa
AI	Agua inicial
ANOVA	Análisis de la varianza (por sus siglas en inglés)
Ant	Antecesor
Ap-BA-Bt-BC-C	(Nomenclatura de horizontes de suelo) (Soil Survey Staff, 2010)
AT	Agua total
AU	Agua útil
Av. Fert.	Avena fertilizada
Av.	Avena
Av. + Vic.	Avena asociada con vicia
Av. S/Fert.	Avena sin fertilizar
C	Carbono
C:N	Relación carbono : nitrógeno
C+H	Celulosa + hemicelulosa
Ca	Calcio
CAD	Capacidad de agua disponible
CC	Cultivos de cobertura
CCT	Centro Científico Tecnológico
Cel.	Celulosa
CERZOS	Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida
CH	Carbohidratos
CHne	Carbohidratos no estructurales
CHs	Carbohidratos solubles
CHt	Carbohidratos totales
CIRN	Centro de Investigaciones en Recursos Naturales
CO	Carbono orgánico
CO ₂	Dióxido de carbono
CONICET	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
COP	Carbono orgánico particulado
CRA	Capacidad de retención de agua
CREA	Consortios regionales de experimentación agrícola
CV %	Coefficiente de variación
DA	Densidad aparente
DMS	Diferencia mínima significativa
E ₁ , E ₂ , E ₃ , E ₄ , E ₅	Ensayos uno, dos, tres, cuatro y cinco, respectivamente
EEUU	Estados Unidos
EUA	Eficiencia de uso del agua
EUN	Eficiencia de uso del nitrógeno
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria
FDA	Fibra detergente ácida
FDN	Fibra detergente neutra

Fert.	Fertilizado
Hemi.	Hemicelulosa
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
k	Velocidad de descomposición
LabSPA	Laboratorio de Suelos, Plantas y Ambiente
LC	Labranza convencional
LIG	Lignina
LIG:N	Relación lignina : nitrógeno
LV	Labranza vertical
M	Metro
m ²	Metro cuadrado
MAA	Ministerio de Asuntos Agrarios
MAIZAR	Asociación de Maíz Argentino
MAP	Mapas Uruguay
Mg	Megagramo
MO	Materia orgánica
MOG	Materia orgánica grosera
MOP	Materia orgánica particulada
MS	Materia seca
msnm	Metros sobre el nivel del mar
Mz. Fert.	Maíz fertilizado
Mz. S/Fert.	Maíz sin fertilizar
N	Nitrógeno
N disp.	Nitrógeno disponible
N Sbra.	Nitrógeno a la siembra
N ₂ O	Oxido nitroso
NH ₄ ⁺	Amonio
N-NO ₃	Nitrógeno de nitratos
NO ₂ ⁻	Nitritos
NO ₃	Nitratos
N-urea	Nitrógeno de urea
P ₁₀₀₀	Peso de mil granos
PAPRAN	Modelo de simulación de la producción de una pastura.
PB	Proteína bruta
PP	Precipitaciones
R	Coefficiente de correlación simple
RIAN	Red de Información Agropecuaria Nacional
SD	Siembra directa
SSSA	Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (por sus siglas en inglés)
Tr. Bal.	Trébol balanza
Tr. Cob.; Tr. Past.	Trébol cobertura; Trébol pastoreo
UC	Uso consuntivo
Vic.	Vicia

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición bioquímica parte aérea de residuos de maíz y soja.	13
Tabla 2. Eficiencia en el uso del agua (EUA) para cada CC, año y sitio de ensayo medidas en Kg MS mm ⁻¹ de precipitación.	51
Tabla 3. Valores de la probabilidad de los factores antecesor (Ant.), fertilización (Fert.) y ensayo (Ens.) para los parámetros de rendimiento del maíz bajo SD.	61
Tabla 4. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del rendimiento en grano de maíz establecido con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).	63
Tabla 5. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del rendimiento de materia seca total aérea (MS total) de maíz con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).	64
Tabla 6. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del índice de cosecha (IC) del maíz con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).	65
Tabla 7. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC de la densidad del cultivo (plantas ha ⁻¹) de maíz con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).	67
Tabla 8. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del número de granos de maíz por m ² con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).	68
Tabla 9. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del peso de los granos (mg) con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).	69
Tabla 10. Valores de la probabilidad de los factores antecesor (Ant.), fertilización (Fert.) y ensayo (Ens.) para la eficiencia de uso del N (EUN) y sus componentes en maíz bajo SD.	70
Tabla 11. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del contenido de nitrógeno en el grano (kg ha ⁻¹) con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).	72
Tabla 12. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del contenido de nitrógeno en la materia seca total (kg ha ⁻¹) con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).	73
Tabla 13. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del Índice de Cosecha de N (ICN) con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).	74
Tabla 14. Rendimiento en grano del maíz con cultivos de cobertura alternativos en los diferentes ensayos.	81

Tabla 15. Rendimiento en materia seca del maíz con cultivos de cobertura alternativos en los diferentes ensayos.	82
Tabla 16. Nitrógeno acumulado en el grano de maíz con cultivos de cobertura alternativos en los diferentes ensayos.	83
Tabla 17. Nitrógeno acumulado en la materia seca total aérea del maíz con cultivos de cobertura alternativos en los diferentes ensayos.	84
Tabla 18. Condiciones de muestreo de los CC evaluados en el experimento. Características de los sitios de ensayos	93
Tabla 19. Producción media de materia seca de la biomasa aérea de las especies de cultivos de coberturas de suelo de otoño/invierno solas y asociadas.	98
Tabla 20. Producción media de materia seca de la biomasa aérea de las especies de cultivos de coberturas de suelo de otoño/invierno solas y asociadas.	98
Tabla 21. Parámetros de calidad de los CC evaluados durante tres años en sector de ventania. Concentración de celulosa (Cel.), hemicelulosa (Hemi.), lignina (LIG.), carbohidratos no estructurales solubles (CHne), nitrógeno (N) de la biomasa aérea, C en g kg ⁻¹ MS, LIG:N y C:N de las especies de cultivos de cobertura de otoño/invierno solas y asociadas en los años 2005/6/7.	99
Tabla 22. Producción media de nitrógeno de la biomasa aérea de las especies de cultivos de cobertura de suelo de otoño/invierno sola y asociada.	101
Tabla 23. Producción media de nitrógeno de la biomasa aérea de las especies de cultivos de cobertura de suelo de otoño/invierno sola y asociada.	102
Tabla 24. Contenido de carbono (C) de la biomasa aérea de las especies de cultivos de cobertura de suelo de otoño/invierno solas y asociadas. Año 2005/06	103
Tabla 25. Contenido de carbono (C) de la biomasa aérea de las especies de cultivos de cobertura de suelo de otoño/invierno solas. Año 2007	103
Tabla 26. Velocidad de descomposición del carbono orgánico particulado (COP) en el suelo con diferentes antecesores.	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Suelos de la Pcia. de Buenos Aires que muestra el sector de Ventania y Tandilia correspondiente al Dominio edáfico 2	2
Figura 2. Principales flujos de carbono en el sistema suelo-planta-atmósfera (Galantini et al., 2008).	6
Figura 3. Respuestas de la evolución del rendimiento de maíz en función de los kg de fertilizante nitrogenado en dos situaciones de cultivo de cobertura antecesor, A (- CC) o B (+ CC), (Ruffo 2004).	22
Figura 4. Localización geográfica de los sitios ensayados en el partido de Coronel Suárez.	33
Figura 5. Precipitaciones medias mensuales durante los años 2005, 2006 y 2007 correspondientes a los E ₁ , E ₂ , E ₃ , E ₄ y E ₅ de estudio. Promedio histórico Aeroestación Meteorológica Coronel Suárez.	36
Figura 6. Probabilidad de ocurrencia de precipitaciones para los períodos (marzo - octubre), (noviembre - mayo), (agosto - octubre), (noviembre - enero) para el promedio histórico (1944 - 2009) Aeroestación Meteorológica Coronel Suárez.	37
Figura 7. Dinámica del agua en el suelo y lluvia en (mm) durante el ciclo CC/maíz (valores diarios estimados y determinados al momento de la siembra de los CC, secado, siembra y cosecha de maíz). (a) testigo, (b) avena + vicia, (c) trébol, (d) vicia, (e) avena. Ensayo 1 campaña 2005/06.	42
Figura 8. Efecto de los CC sobre el agua útil en el suelo a la fecha de siembra del maíz. Se indican los valores correspondientes al contenido de agua en el suelo en mm (0-60 cm) para los diferentes CC, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (PMP) como antecesores de maíz Campaña 2005/06.	43
Figura 9. Contenido de agua total en el suelo al momento de la siembra del cultivo de maíz por profundidades (0-20) y (20-60). Promedio de los CC y el testigo. Campaña 2005/06.	44
Figura 10. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC) y sin CC (Testigo), se indican las precipitaciones caídas durante el ciclo del maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Campaña 2005/06 (E ₁).	44
Figura 11. Contenido de agua del suelo a diferentes profundidades en mm (0-80 cm) para los diferentes CC y testigo, capacidad de campo y punto de marchitez permanente. (PMP) como antecesores de maíz para la campaña 2006/07 (E ₂).	45

Figura 12. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC) y sin CC (Testigo), se muestran las precipitaciones caídas durante el ciclo del Maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Campaña 2006/07 (E ₂).	46
Figura 13. Contenido de agua del suelo a diferentes profundidades en mm (0-80 cm) para los diferentes CC y testigo, capacidad de campo y punto de marchitez permanente. (PMP) como antecesores de maíz para la campaña 2007/08 (E ₃).	47
Figura 14. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC) y sin CC (Testigo), se muestran las precipitaciones caídas durante el ciclo del Maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Campaña 2007/08 (E ₃).	48
Figura 15. Contenido de agua del suelo a diferentes profundidades en mm (0-80 cm) para los diferentes CC y testigo, capacidad de campo y punto de marchitez permanente. (PMP) como antecesores de maíz para la campaña 2007/08 (E ₄).	48
Figura 16. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC) y sin CC (Testigo), se muestran las precipitaciones caídas durante el ciclo del Maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Campaña 2007/08 (E ₄).	49
Figura 17. Contenido de agua del suelo a diferentes profundidades en mm (0-80 cm) para los diferentes CC y testigo, capacidad de campo y punto de marchitez permanente. (PMP) como antecesores de maíz para la campaña 2007/08 (E ₅).	50
Figura 18. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC) y sin CC (Testigo), se muestran las precipitaciones caídas durante el ciclo del Maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Campaña 2007/08 (E ₅).	51
Figura 19. Curvas teóricas de respuesta al agregado de N en los cultivos de verano sembrados sobre una leguminosa invernal (+) o sobre barbecho (-). Adaptado de Smith (1987).	55
Figura 20. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha ⁻¹) y el rendimiento en grano de maíz (kg ha ⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 1.	76
Figura 21. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha ⁻¹) y el contenido de N en grano de maíz (kg ha ⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 1.	76

Figura 22. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha ⁻¹) y el contenido de N en la materia seca total aérea de maíz (kg ha ⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 1.	77
Figura 23. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha ⁻¹) y el rendimiento en grano de maíz (kg ha ⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 2.	77
Figura 24. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha ⁻¹) y el contenido de N en grano de maíz (kg ha ⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 2.	78
Figura 25. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha ⁻¹) y el contenido de N en la materia seca aérea de maíz (kg ha ⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 2.	78
Figura 26. Acumulación y partición de materia seca de maíz con diferentes cultivos de cobertura como antecesores. Vicia, avena fertilizada (Av.Fert.), (avena sin fertilizar) (Av. S/Fert.), avena + vicia (Av. + Vicia), maíz fertilizado (Mz. Fert.), maíz sin fertilizar (Mz. S/Fert.) y barbecho, Datos promedio de los ensayos 3, 4 y 5.	86
Figura 27. Acumulación y partición de N en maíz con diferentes CC antecesores. Vicia, avena fertilizada (Av.Fert.), avena sin fertilizar (Av. S/Fert.), avena + vicia (Av. + Vicia), maíz fertilizado (Mz. Fert.), maíz sin fertilizar (Mz. S/Fert.) y barbecho. Datos promedio de los ensayos 3, 4 y 5. Campaña 2007/08.	88
Figura 28. Concentración de celulosa, hemicelulosa y celulosa + hemicelulosa de los diferentes cultivos de cobertura en función de la cantidades de residuos aportados al suelo. Media del 2005, 2006 y 2007. a) avena, b) vicia, c) avena + vicia, d) trébol.	104
Figura 29. a) Concentración de celulosa + hemicelulosa y CHne en función de las cantidades de residuos aportados al suelo. b) Relación C:N y LIG:N. Media de todos los cultivos de cobertura para los años 2005, 2006 y 2007.	106
Figura 30. Relación C:N y LIG:N de los diferentes cultivos de cobertura en función de las cantidades de residuos aportados al suelo. Media del 2005, 2006 y 2007. a) avena, b) vicia, c) avena + vicia, d) trébol.	108
Figura 31. (a) Vista lateral del recipiente muestreador y sus componentes (b) brazo adaptador y sus componentes.	115
Figura 32. Evolución de la descomposición del Material orgánico de los CC durante un período de 360 días de a) avena b) vicia c) trébol.	118

- Figura 33. a) MS remanente observada (*) y simulada (Δ) en las macetas con residuos en superficie para vicia, avena y trébol. (b) Liberación acumulada de N mineralizado en kg ha^{-1} y relación C:N para cada uno de los CC. _____122
- Figura 34. Dinámica del carbono orgánico particulado (COP, %) en la profundidad 0-5 cm con diferente antecesor; a) barbecho o con cultivo de cobertura de b) avena, c) vicia y d) trébol. _____124
- Figura 35. Dinámica del contenido de carbohidratos totales (CH tot) y solubles (CH sol) en kg ha^{-1} en la profundidad 0-5 cm con diferente antecesor (barbecho y con cultivos de cobertura de avena, vicia y trébol). _____125
- Figura 36. Dinámica del contenido de carbohidratos totales (CH tot, kg ha^{-1} , azul) en la profundidad 0-5 cm con antecesor avena y vicia, remanente del inicial (rojo) y aporte del CC (verde). _____126
- Figura 37. Contenidos de materia orgánica particulada (MOP) (%), en la profundidad de 0-20 cm con diferentes antecesores (barbecho y con cultivo de cobertura de vicia y avena), en los distintos momentos del ciclo CC/maíz (485 días). Promedio de 3 ensayos durante la campaña 2007-08. _____127

INDICE DE CONTENIDOS

ABREVIATURAS _____	vii
ÍNDICE DE TABLAS _____	ix
ÍNDICE DE FIGURAS _____	xi
ORGANIZACIÓN DE LA TESIS _____	xix

CAPITULO I

LOS CULTIVOS DE COBERTURA Y LA PRODUCTIVIDAD DEL MAÍZ EN SIEMBRA DIRECTA: DINÁMICA DEL NITRÓGENO, AGUA Y FRACCIONES ORGÁNICAS DEL SUELO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL _____	1
1.1. Características de la región _____	1
1.2. Características generales de los suelos _____	1
2. PROBLEMÁTICA _____	4
3. IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA _____	6
4. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS _____	8
4.1. Contenido de materia orgánica _____	8
4.2. Almacenamiento y uso de agua _____	9
4.3. Secuencia de cultivos _____	12
4.4. Sistema de labranza _____	15
4.5. Fertilización _____	17
4.6. Cultivos de cobertura _____	19
5. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS _____	26
5.1. Hipótesis general _____	26
5.2. Objetivo general _____	26
5.3. Hipótesis y objetivos específicos _____	27

CAPÍTULO II

CULTIVOS DE COBERTURA DE OTOÑO/INVIERNO. SUS EFECTOS EN LA DISPONIBILIDAD Y DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO

1. INTRODUCCIÓN	28
1.1. Hipótesis	30
1.2. Objetivos	30
2. MATERIALES Y MÉTODOS	31
2.1. Generalidades del área bajo estudio	31
2.2. Clima y suelo	31
2.3. Localización y área de estudio	32
2.4. Particularidades de los ensayos, diseño y antecesores	32
2.5. Distribución Gamma	34
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
3.1. Precipitaciones	36
3.2. Distribución Gamma	37
3.3. Balance de agua y efecto de los CC sobre la disponibilidad de agua en el suelo	38
4. CONCLUSIONES	52

CAPÍTULO III

CULTIVOS DE COBERTURA DE OTOÑO-INVIERNO-MAÍZ Y SUS EFECTOS EN LA PRODUCTIVIDAD, ACUMULACIÓN DE N Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ.

1. INTRODUCCIÓN	53
1.1. Hipótesis	57
1.2. Objetivo	57
2. MATERIALES Y MÉTODOS	58
2.1. Características del área bajo estudio	58
2.2. Cultivos de cobertura	58
2.3. Cultivo de maíz	58
2.4. Muestras de plantas de maíz	58
2.5. Análisis estadístico	59
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
3.1. Cultivos de cobertura: vicia y avena	60
3.1.1. Efecto del antecesor y la fertilización en el maíz	60
3.1.2. Rendimiento en grano	61

3.1.3. Nitrógeno acumulado por el maíz	70
3.2. Cultivos de cobertura alternativos	79
3.2.1. Antecesor trébol	80
3.2.2. Antecesor avena fertilizada	80
3.2.3. Acumulación de N y partición de MS en diferentes órganos de la planta	84
4. CONCLUSIONES	89

CAPÍTULO IV

CULTIVOS DE COBERTURA DE OTOÑO/INVIERNO. PRODUCCIÓN Y PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA BIOMASA AÉREA

1. INTRODUCCIÓN	90
1.1. Hipótesis	92
1.2. Objetivos	92
2. MATERIALES Y MÉTODOS	93
2.1. Características del área bajo estudio	93
2.2. Cultivos de cobertura	93
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	95
3.1. Producción de materia seca de los cultivos de cobertura.	95
3.2. Nitrógeno acumulado en la biomasa aérea de los cultivos de cobertura	100
3.3. Producción de C en los cultivos de cobertura	102
3.4. Contenido de celulosa, hemicelulosa, carbohidratos no estructurales solubles (CHne) y lignina	103
3.5. Relación C:N y LIG:N	105
4. CONCLUSIONES	109

CAPÍTULO V

DINÁMICA DE DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS DE CULTIVOS DE COBERTURA COMO ANTECESORES DE MAÍZ BAJO SIEMBRA DIRECTA

1. INTRODUCCIÓN	110
1.1. Hipótesis	114
1.2. Objetivos	114

2. MATERIALES Y MÉTODOS	115
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	118
3.1. Transformación de los residuos: ensayo en macetas	118
3.2. Aplicación de modelo	120
3.3. Dinámica de descomposición de la materia orgánica, carbohidratos solubles y totales	123
3.4. Persistencia de los residuos de cultivos de cobertura	127
4. CONCLUSIONES	129

CAPITULO VI

CONSIDERACIONES FINALES

1. PRINCIPALES CONTRIBUCIONES	130
2. CONCLUSIONES GENERALES	131

BIBLIOGRAFÍA	135
--------------	-----

ANEXO	158
-------	-----

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La tesis está organizada en capítulos que analizan los diferentes aspectos de los cultivos de cobertura (CC) en el sistema suelo-planta, a saber: Una introducción general, hipótesis y objetivos del estudio (Capítulo I); el efecto de los CC en la disponibilidad del agua en el suelo (Capítulo II); el efecto de los CC en la producción y nutrición de maíz (Capítulo III); la producción y calidad de los CC (Capítulo IV). Se analiza la dinámica de descomposición y liberación de nutrientes de los CC (Capítulo V) y finalmente se presentan las consideraciones finales y las perspectivas del estudio. Los capítulos II, III, IV y V se redactaron según el siguiente esquema: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones. Al final se presenta toda la Bibliografía consultada.

CAPÍTULO I

LOS CULTIVOS DE COBERTURA Y LA PRODUCTIVIDAD DEL MAÍZ EN SIEMBRA DIRECTA: DINÁMICA DEL NITRÓGENO, AGUA Y FRACCIONES ORGÁNICAS DEL SUELO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Características de la región

El sector de Ventania (Figura 1) se encuentra en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires e incluye a los partidos de Coronel Suárez, Tornquist, Coronel Pringles, Coronel Dorrego, Saavedra, Bahía Blanca y parte de Puán. El clima corresponde a un régimen subhúmedo seco, con precipitaciones anuales medias que oscilan entre los 700 y 790 mm. La época más seca es la invernal. Las temperaturas extremas son bajas, siendo la mínima absoluta de -9,9°C y la máxima absoluta de 41,2°C. Las heladas comienzan a mediados de abril y terminan a fines de octubre (MAA, 2008).

Las sierras del Sistema Ventania se extienden en aproximadamente 100 km, aunque no llegan al mar. Su altura máxima alcanza los 1200 msnm. En general, estas sierras poseen una fisonomía más escarpada que la de Tandilia, lo cual ha determinado que la roca aflore, ocupando superficies más amplias que en aquellas. Además, esto ha condicionado la deposición de loess, haciendo que los suelos sean más someros en partes escarpadas. En general, prevalecen los suelos medianamente profundos y profundos, aptos para el laboreo, clasificándose en Argiudoles y Argiustoles típicos, asociados a los Haplustoles y sus fases en pendientes (MAA, 2008).

1.2. Características generales de los suelos

El mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires (Escala 1:500000) agrupa la mayor parte de los suelos de la región dentro del Dominio edáfico 2 (Figura 1). Los sitios bajo estudio representan la condición edáfica de los suelos del Dominio edáfico 2, que está ampliamente distribuido en el sistema interserrano.

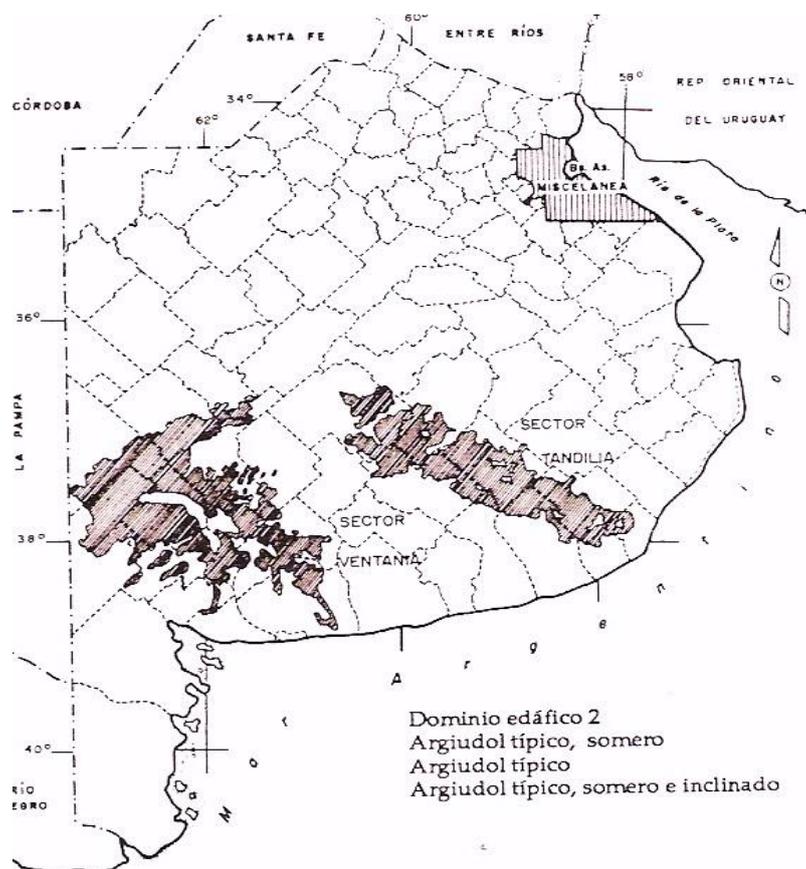


Figura 1. Mapa de Suelos de la Pcia. de Buenos Aires que muestra el sector de Ventania y Tandilia correspondiente al Dominio edáfico 2 (sombreado).

Se han desarrollado a partir de material loésico “Bonaerense” de Frenguelli (1955) o “Post-Lujanense” de Tricart (1973), que han cubierto totalmente el faldeo de las sierras.

El espesor de este sedimento, que generalmente está apoyado sobre una costra calcárea de distribución regional, oscila alrededor de los 100 cm, registrándose variaciones debido a que ha sepultado una topografía más accidentada que la actual. La granulometría y la naturaleza del sedimento son muy homogéneas en todo el ámbito del dominio; sin embargo, en unidades adyacentes a otras subregiones geomorfológicas, algunos suelos han evolucionado sobre sedimento eólicos arenosos, también apoyados sobre tosca. La inclinación de los terrenos y la costra calcárea sub-superficial son las dos características que definen este dominio. En función de ellas, se han cartografiado fases inclinadas y someras de los principales subgrupos.

Las ondulaciones más pronunciadas del pedemonte se registran en las cercanías de las partes cuspidales de las sierras. En estos sectores, los Hapludoles petrocálcicos se localizan en las partes superiores de las lomas, donde la tosca está más cercana a la superficie.

Los Hapludoles énticos y sus fases someras sólo se encuentran en las unidades del N-NO, transicionales a subregiones geomorfológicas donde los materiales originarios son más gruesos (INTA/CIRN, 1989).

Las pendientes y senos entre lomas están ocupadas por Argiudoles típicos, franco finos, y sus fases someras e inclinadas. En las partes distales del pedemonte, donde el relieve se atenúa, se hallan Argiudoles típicos, Ustifluventes mólicos, Natracualfes típicos y Natracuoles típicos. De acuerdo con la delimitación existente entre los regímenes údicos y ústicos, los Haplustoles y Argiustoles típicos se hallan al oeste de las sierras de Ventania, en diversas posiciones del paisaje (INTA/CIRN, 1989).

Los principales cultivos en rotación con pasturas en la región fueron trigo y girasol en la década de los 70, 80 y hasta mediados de los 90. Esto permitió un avance importante de la agricultura sobre la ganadería con un incremento notable en el área, primero de girasol y trigo y posteriormente de soja RR (con resistencia a glifosato) que comenzó a reemplazar al girasol. Por el contrario, el maíz se mantiene estable en su superficie sembrada, totalizando 17.000 ha (Partido de Coronel Suárez), aunque sería deseable su incremento para la mejora en las propiedades físicas y químicas de los suelos. En los últimos años, tanto en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires como en la región maicera típica, se produjo un paulatino desplazamiento de los cultivos productores de rastrojo voluminoso, como el maíz y sorgo granífero, por el cultivo de soja (RIAN, 2010).

Actualmente el cultivo de soja ocupa más del 60% de la superficie dedicada a cultivos de verano y el 40% del total de superficie dedicada a cultivos de cosecha de granos. A esto se suma la creciente reducción de la superficie sembrada con trigo (35%) que no podrá ser reemplazada en su totalidad por la cebada (RIAN, 2010).

2. PROBLEMÁTICA

Una de las maneras para evaluar la sustentabilidad de los ecosistemas es en términos de su impacto sobre el stock de carbono orgánico (CO) del suelo, el cual muestra estrecha relación con el aporte de residuos (Andriulo *et al.*, 2001).

Desde el inicio de la agricultura en la pradera pampeana se ha alertado sobre su impacto en el medio ambiente. Las diversas prácticas, propuestas y adoptadas, fueron debatidas tanto por productores y técnicos, como por políticos ajenos al sector (Casas, 2007a).

A fines de los '70, se escucharon reclamos en contra de la agricultura continua frente a la rotación con praderas. La caída en aproximadamente un 50% de los niveles de materia orgánica (MO) en pocos años fue el reflejo de este proceso, como atestiguan numerosos trabajos en la zona núcleo pampeana (Casas, 2007a). Además, las circunstancias económicas favorecieron e impulsaron la agriculturización.

En muchos casos, el proceso de agriculturización, a partir de una mayor participación de cultivos de soja y girasol, ha significado una importante reducción en el aporte de residuos y en los contenidos de MO, nitrógeno (N) y fósforo (P), acentuándose los procesos de degradación física y de pérdidas de suelo por erosión, tornando a los sistemas de producción no sustentables (Quiroga *et al.*, 2009; Sainz Rosas *et al.*, 2012). Además, los cereales de invierno han visto disminuidos el área sembrada y sus rendimientos en los últimos años secos, y ellos representan la principal fuente de carbono (C) para el suelo en la rotación,

Los sistemas de producción que se basan en un cultivo por año generan tiempos de barbecho excesivamente largos, en los que se aumenta la probabilidad de tener pérdidas de agua del suelo y de nutrientes por erosión o lixiviación (Díaz-Ambrona *et al.*, 2005; Reicosky, 2007; Müller, 2008).

La siembra directa (SD) en la región pampeana actuó como un importante freno a esta degradación. Su adopción fue inicialmente lenta, pero en la campaña 1991/92 comenzó un constante crecimiento de este sistema de siembra, dado que el escenario económico (relación costo/beneficio) permitió mejores resultados. De esta manera, fue como en la campaña 1997/98, se produjo un rápido aumento llegando a los 3.950.000 ha, principalmente, en los cultivos de maíz y soja de segunda. La crisis de precios de los granos entre 1997 y 2001 coincidió con el inicio de la adopción masiva de variedades de soja RR que permitió a los productores argentinos balancear, en alguna medida, la caída de precios con una importante baja en los costos. Actualmente, se encuentran en el país 27.000.000 ha bajo este sistema de siembra (AAPRESID/INTA, 2010).

El tipo de frecuencia de las especies contempladas en el planeamiento de la rotación de cultivos, debe atender tanto a los aspectos agronómicos como los ambientales, económicos y comerciales, compatibles con el agrosistema de producción practicado en la región sub-húmeda pampeana sudoeste bonaerense (Coronel Suárez).

3. IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA

La MO del suelo es un componente clave dentro de los ecosistemas naturales. Está íntimamente relacionada con las características edafoclimáticas del sitio y afecta directa e indirectamente la estabilidad del agrosistema. Su importancia ha sido reconocida desde la antigüedad y actualmente es considerada como uno de los atributos más importantes para definir la “calidad de los suelos” (Doran & Parkin, 1994).

La MO del suelo ha sido definida “la fracción orgánica del suelo, excluidos los residuos animales y vegetales aún no descompuestos” (SSSA, 1997) y se ha utilizado como sinónimo del humus (Schnitzer, 2000). Sin embargo, representa un sistema complejo de sustancias cuya dinámica es gobernada por el aporte de residuos orgánicos de diversa naturaleza y por la transformación continua a través de factores biológicos, químicos y físicos. De esta forma, se encuentra constituida por una variedad importante de compuestos de complejidad variable.

El principal constituyente de la MO es el C, que llega a representar entre el 40 y 60% dependiendo del estado de transformación. Un esquema simplificado del ciclo del C en el sistema suelo-planta-atmósfera se presenta en la Figura 2.

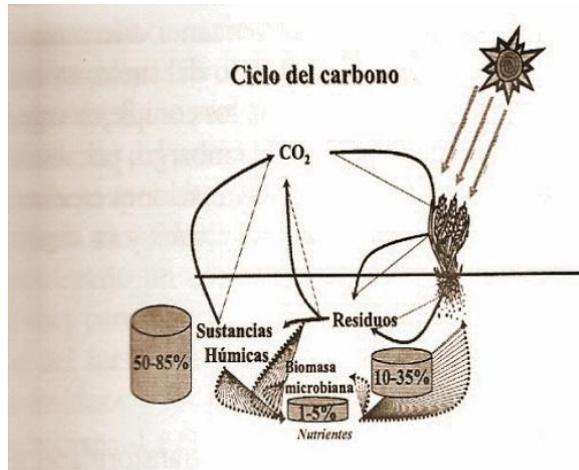


Figura 2. Principales flujos de carbono en el sistema suelo-planta-atmósfera (Galantini *et al.*, 2008).

Las plantas en presencia de agua, nutrientes y energía toman el CO₂ del aire para transformarlo en compuestos orgánicos con funciones diferentes. Una vez concluido el ciclo de la planta o alguna de sus partes, ingresa al suelo donde es activamente transformado por los microorganismos. En este proceso, los microorganismos obtienen nutrientes y energía; una gran parte del C se pierde como CO₂ y otra sufre diferentes transformaciones de resíntesis y polimeración dando lugar a las sustancias húmicas (Galantini *et al.*, 2008).

La velocidad con la que ocurren las transformaciones de los materiales orgánicos depende de factores naturales, como el clima y las características del suelo, y antrópicos, como el tipo e intensidad de manejo agrícola (labranzas, rotación, fertilización, etc.). Las prácticas agronómicas modifican la dinámica de la MO del suelo, a través de los cambios en la cantidad y calidad de los aportes orgánicos que ingresan al suelo, de su ubicación y acceso para los organismos descomponedores y de las modificaciones sobre el ambiente edáfico (porosidad, humedad, temperatura, etc.) (Studdert *et al.*, 1997; Martinazzo, 2006; Galantini & Rosell 2006; Quiroga *et al.*, 2008; Galantini *et al.*, 2008; Studdert *et al.*, 2008).

El proceso de transformación biológica de los residuos orgánicos es característico de cada agrosistema y es un factor determinante en la liberación de nutrientes. Es decir, la MO es un elemento clave en la relación con la fertilidad y productividad de los cultivos. Esto es especialmente importante en ambientes semiáridos y subhúmedos, donde influye favorablemente sobre la dinámica del agua y de los nutrientes (Galantini *et al.*, 2008).

Como la dinámica y los equilibrios de las fracciones orgánicas pueden ser modificados por los factores naturales y antrópicos, es vital conocer la magnitud e implicancias de esos cambios (Galantini *et al.*, 2008).

4. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS:

Entre los más mencionados por Quiroga *et al.* (2008) se citan los siguientes: el contenido de MO del suelo, almacenamiento y uso del agua, secuencia de cultivos, sistema de labranza, fertilización y cultivos de cobertura.

4.1. Contenido de materia orgánica del suelo.

La productividad de los cultivos y la MO del suelo, están estrechamente relacionados entre sí y resultan fundamentales para la sustentabilidad de los agrosistemas. La productividad de los cultivos incide sobre la dotación de MO de suelo a través de la cantidad y calidad de los residuos que se incorporan al ciclo del C. A su vez el contenido de MO de los suelos, es un factor clave de su fertilidad física y química que influye sobre la productividad. Por esto, es necesario conocer los factores de manejo agronómico más importantes que impactan sobre ambos. (Andriulo *et al.*, 2008; Galantini *et al.*, 2008; Quiroga *et al.*, 2008; Studdert *et al.*, 2008).

Por ejemplo, Álvarez & Steinbach 2006 indican que en agrosistemas bajo sucesiones exclusivamente agrícola, el contenido de carbono del suelo está relacionado con el aporte de carbono de la vegetación. En consecuencia, al incrementarse la cantidad de cultivos que se hacen por año o incorporar en la sucesión cultivos de mayor producción de biomasa, como el maíz, es mayor el nivel de C del suelo luego de varios años que en situaciones con menos cultivos por año o de menor producción de biomasa.

Al respecto Huggins *et al.* 2006 señalan que el monocultivo de maíz presentó stocks de C y N superiores al monocultivo de soja, demostrando que el monocultivo de soja disminuye mucho más la calidad edáfica que el de maíz. Esta disminución no solo se debería al menor aporte de C sino también a una mayor velocidad de mineralización del carbono orgánico del suelo del monocultivo de soja con respecto al de maíz.

En este sentido, desde el punto de vista productivo y calidad de suelo, la dinámica de la MO total aporta muy poco para el estudio de los efectos en el corto plazo de la prácticas agronómicas (Tan *et al.*, 2007). En cambio las fracciones que son más sensibles a los efectos del diferente uso de la tierra, pueden ser utilizadas como indicadores tempranos de la dirección de esos cambios (Six *et al.*, 2002). Por este motivo, los componentes lábiles del suelo han sido sugeridos como indicadores de los efectos de la sucesión de cultivos sobre la calidad del suelo (Gregorich *et al.*, 1994; Haynes, 2000)

4.2. Almacenamiento y uso del agua.

La disponibilidad y uso del agua es uno de los principales factores relacionados con los rendimientos de los cultivos en los agrosistemas de la región. Esta disponibilidad depende entre otros de la CRA útil de los suelos, la cantidad y distribución de las precipitaciones, la mayor o menor utilización por cultivos previos y la cobertura del suelo. A su vez los requerimientos de agua y la eficiencia en su utilización varían con el cultivo. (Venanzi *et al.*, 2006).

Según Casas (2007a), en la mayor parte de las regiones productivas del país “las precipitaciones no cumplen las demandas de los cultivos, ya que entre un 50 y un 75 por ciento retorna a la atmósfera sin participar del proceso productivo”.

“Sequía” significa período seco prolongado (Loomis & Connor, 1996), y para una misma condición ambiental, puede ser causada por la escasez de lluvias, suelos poco profundos, impedimentos para el desarrollo radicular o una combinación de ellos.

El área agrícola del sistema Ventania presenta como principal limitante para la producción de cultivos de verano una baja capacidad para almacenar agua de sus suelos, pero existe una amplia variabilidad para cada tipo de suelo según sea su génesis y su posición topográfica y, a su vez, dentro de cada unidad de suelo. También es de esperar una gran variabilidad en los rendimientos, dentro de cada empresa agrícola. Calviño & Sadras (1999) determinaron un rango de variación de rendimiento de soja en una serie de 24 años en el sur de la Provincia de Buenos Aires, de entre 2100 y 3100 kg ha⁻¹ en suelos profundos (>1 m) y entre 1300 y 2600 en suelos superficiales (0,5 a 0,75 m).

La variabilidad en la cantidad y distribución de las precipitaciones, ha sido tradicionalmente considerada uno de los principales factores que afectan la producción agropecuaria en la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana. De los beneficios atribuibles al barbecho, la acumulación de humedad en el suelo permite, dentro de ciertos límites, disminuir la incidencia de tal variabilidad climática. Diversos estudios muestran su eficacia al respecto (Puricelli, 1977; Glave, 1979), aunque en algunos casos se destaca la escasa eficiencia hídrica de la práctica. Resultados de investigaciones conducidas en la EEA Bordenave por Krüger (1993) demuestran que la eficiencia hídrica media de un barbecho para cultivo de verano varió del 23% hasta una eficiencia negativa de 14%, esta última implica que se perdió toda la precipitación acumulada en barbecho más el 14% del contenido de agua inicial en el suelo.

El cultivo previo y el manejo del período de barbecho modifican la disponibilidad hídrica inicial para los cultivos de verano en un mismo suelo (Siri-Prieto *et al.*, 2006). Otro aspecto de singular importancia es la duración del barbecho. En la región semiárida, evaluaciones

realizadas por Quiroga *et al.* (1999) demuestran la importancia de la longitud del barbecho, determinada por el antecesor y, la práctica de labranza en la acumulación de agua a la siembra del cultivo de girasol, siendo el efecto mayor en años con bajas precipitaciones. Duarte (2002) halló que además del cultivo antecesor, la cantidad de residuos remanente al momento de la siembra incide significativamente en el almacenaje de agua para el cultivo de girasol. El efecto antecesor debe ser tenido en cuenta al momento de planificar la secuencia de cultivos dentro de la rotación.

Con lluvias erráticas y baja capacidad de almacenaje de agua, la seguridad de respuesta al agregado de fertilizantes (principalmente N) es baja, lo que limita su uso. Como consecuencia de esto, Sadras *et al.* (2005) determinaron que la rentabilidad de las empresas agrícolas del sur-este de Australia es mayor en condiciones de bajo uso de insumos. El manejo del suelo sin laboreo y con rastrojo en superficie “barbecho cubierto” tiene un reconocido efecto sobre la disponibilidad de agua en el suelo expuesto bajo condiciones de extrema sequía y aporte no limitante de residuos.

Existe un comportamiento general reconocido sobre el efecto de la cobertura de suelo por rastrojo sobre la disponibilidad de agua en el suelo (Cantero-Martínez *et al.*, 1995) y el efecto benéfico sobre el control de la erosión hídrica, pero no está suficientemente cuantificada la interacción con la capacidad de almacenar agua del suelo, la demanda atmosférica de la región y la frecuencia e intensidad de las lluvias. Por ejemplo: Monzón *et al.* (2006) determinaron que son necesarios 1,86 mm de lluvia durante el período de barbecho por cada mm de capacidad de almacenaje de agua del suelo para maximizar el efecto del manejo de la cobertura del suelo por rastrojo.

En regiones o años de bajas precipitaciones y pequeñas variaciones en la disponibilidad hídrica, la cobertura genera grandes respuestas en rendimiento de los cultivos, como consecuencia del incremento en la EUA total disponible (O’Leary & Connor, 1997; Sadras, 2002). En estas situaciones, existe una alta respuesta a las variables de manejo, que aumentan la probabilidad de recarga de agua del suelo y reducen las pérdidas por evaporación. En regiones húmedas y años de precipitaciones no limitantes, el efecto del manejo del suelo y de la secuencia de cultivos tiene baja respuesta en rendimiento (Incerti *et al.*, 1993). En estas situaciones, el tiempo de barbecho pierde importancia y una intensificación de la secuencia de cultivos, que aumentara el tiempo bajo cultivo y redujera el tiempo bajo barbecho, permitiría incrementar la EUA del sistema al reducir, las pérdidas de agua por escurrimiento y drenaje profundo. Según Farahani *et al.* (1998), la intensificación deriva en mayor EUA. Como las principales pérdidas durante el barbecho se deben a la evaporación desde el suelo, más cultivos

implican aumento de la evapotranspiración. La mayor eficiencia, entonces, no se debe a la conservación del agua sino a la reasignación del agua evaporada del suelo y al flujo transpiratorio de las plantas.

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que deficiencias en la disponibilidad hídrica estacional pueden limitar el rendimiento individual de los cultivos (Díaz-Ambrona *et al.*, 2005; Monzón *et al.*, 2006). Fernández *et al.* (2005) y Duarte (2002) en trabajos sobre Haplustoles comprobaron que en años con precipitaciones normales durante barbechos largos y en suelos de baja capacidad de retención de agua (CRA), la inclusión de un cultivo en reemplazo del barbecho aumenta la EUA y la captura de C, con respecto al testigo sin cultivo. Sá Pereira *et al.* (2006) en trabajos, llevados adelante en un suelo Hapludol típico de la región sub-húmeda pampeana sudoeste, demostraron que en años con precipitaciones normales en la primavera, se llega a la siembra de girasol con similar dotación de agua en el perfil del suelo con antecesor verdeo de invierno (barbechos 30 y 60 días) que con barbechos largos. Esto, debido a que normalmente, las precipitaciones exceden durante un barbecho largo la CRA y, consecuentemente, una parte sustancial de la misma se pierde por escurrimiento o infiltrándose en profundidad. Pero, se reconoce que en primaveras secas, el consumo hídrico de los verdeos durante el invierno podría interferir en la normal oferta de agua para el cultivo siguiente.

Al respecto, Fernández *et al.* (2005), trabajando en la región semiárida pampeana, concluyeron que a la siembra del cultivo de verano el contenido de agua en los 0-80 cm de profundidad fue mayor en el testigo barbecho que en tratamiento con cultivo de invierno.

Por otra parte, Álvarez *et al.* (2006b) en Hapludoles típicos del noroeste bonaerense no encontraron diferencias en rendimiento de soja establecida sobre cultivos de invierno con diferentes longitudes de barbecho, comprobando además, bajas eficiencias de barbecho (11%) en todos los tratamientos evaluados.

Existen diferencias en los requerimientos hídricos de los cultivos, tanto en la cantidad necesaria para el máximo rendimiento, como en los momentos críticos para la definición y concreción del rendimiento en grano, la eficiencia de uso del agua (EUA), varía entre cultivos, en condiciones de restricción hídrica (Della Magiora *et al.*, 2000).

Los requerimientos de agua de los cultivos sin restricciones hídricas están influenciados por la tasa de evapotranspiración diaria, la cual es una función de la temperatura, radiación, humedad relativa y velocidad del viento, variables todas que se modifican con la ecoregión, el año y los días del año. Cuando a esta variable se la integra en el tiempo (ciclo del cultivo), se obtiene el consumo total de agua. En estas condiciones, el orden de requerimientos totales para un mismo ambiente, para la zona de Balcarce (Argentina) es soja < girasol < maíz (Della

Magiora *et al.*, 2000). La diferencia entre cultivos la establecen los valores de coeficiente de cultivos máximo (Kc) y la duración de cada fase de crecimiento.

En condiciones de restricción hídrica, operan distintos mecanismos de tolerancia/resistencia que establecen la tasa de pérdida de rendimiento por cada milímetro de reducción en la disponibilidad de agua. Mientras el orden de EUA (kg de grano mm⁻¹ de agua) es maíz>soja>girasol, la tasa de pérdida de rendimiento en condiciones de déficit sigue el orden inverso (Andrade, 1995). Green & Read (1983) cuantificaron el comportamiento diferencial de trigo, maíz y girasol en condiciones de agua limitante, discutiendo la conveniencia de ordenar los cultivos en función de estas variables.

4.3. Secuencia de cultivos

Entre las ventajas de la utilización de sistemas apropiados de rotación y sucesión de cultivos, se destacan: la estabilidad de rendimiento de granos, el quiebre de ciclos de plagas, la disminución de infestación de malezas, la alternancia en la forma de extracción de nutrientes con el uso de especies de diferentes sistemas radicales y la mantención o mejoría de las condiciones físicas del suelo de acuerdo con los estudios realizados por Rego (1994).

Cuando se habla de la sustentabilidad del ambiente se hace referencia a una actividad que permita obtener producciones rentables sin comprometer la capacidad de producción del recurso involucrado, en este caso el suelo, y sin generar efectos negativos en otros componentes del ambiente. En este sentido, la secuencia de cultivos es la clave tecnológica disponible para armonizar los objetivos de corto (productividad) y largo plazo (conservación de la MO) y en ella, el cultivo de maíz cumple un rol central. Ensayos de secuencias de cultivo realizados en el sur de Santa Fe, llevados a cabo por Pedrol *et al.* (2004) demostraron la importancia del maíz como antecesor que permite diversificar los riesgos productivos, inhibiendo la proliferación de patógenos, insectos y malezas y evitando desequilibrios químicos de importancia. Las rotaciones también influyen en las condiciones físicas de los suelos, principalmente en lo que se refiere al estado estructural y distribución de raíces. Este efecto es dado por la cantidad y calidad del rastrojo que se produce y se devuelve al suelo. En este sentido se destacan el maíz y el sorgo por su elevada producción de residuos, siendo en soja de menor volumen y cantidad. Además, el sistema radical del maíz aumenta la proporción de macroporos en el suelo, condición favorable para el crecimiento de las raíces de los cultivos siguientes. Con respecto a la calidad de los rastrojos, es ampliamente aceptado que los productos de la degradación de la lignina y compuestos nitrogenados son los mayores constituyentes de la materia orgánica

humificada y estable del suelo. La incorporación de rastrojos con alta concentración de lignina (Tabla 1) y la adición de nitrógeno pueden ser opciones de manejo que conduzcan al incremento del C del suelo.

Tabla 1. Composición bioquímica parte aérea de residuos de maíz y soja.

Residuo	Carbono aportado kg ha ⁻¹	Relación C:N	Composición bioquímica			
			FDN (%)	Hemicelulosa (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)
Maíz	3.714	109:1	20,9	39,8	29,5	9,8
Soja	1.802	48:1	34,4	23,9	31,1	10,6

Adaptado de Andriulo & Cordone 1998.

En Argentina, el cultivo de maíz es el tercero en producción luego de la soja y la caña de azúcar (FAO, 2010). Este cultivo es clave en la rotación y sucesión de cultivos ya que aporta importantes cantidades de C con sus residuos. Durante las tres últimas décadas, la superficie sembrada se redujo un 40% y la productividad aumentó un 170%, alcanzando en la campaña 2010/2011 4,3 millones/ha sembradas y un rendimiento promedio de 5.350 kg ha⁻¹. En la provincia de Buenos Aires la superficie sembrada asciende a 1.206.431 ha (MINAGRI, 2012) con un rendimiento promedio de 6819 kg ha⁻¹ y un aumento del 100% del área sembrada en el último quinquenio. El grano de maíz es, además de proveedor de C para el suelo, el insumo clave de una creciente variedad de industrias, que abarcan desde su uso como alimento humano y forraje de las producciones de carne o leche, hasta su procesamiento industrial, cuyo producto final es bebida, alimento o biocombustible (MAIZAR, 2006).

Según Calegari (2007), la inclusión de diferentes cultivos en secuencia, además de disminuir los riesgos de erosión, aumenta la agregación de las partículas en el suelo e incrementa su actividad biológica (Balota *et al.*, 1998) y promueven efectos benéficos en la fertilidad del suelo a través del aumento en el reciclado de nutrientes e incremento de la MO del suelo.

La diversificación de la secuencia de cultivos anuales favorece el efecto de otras prácticas como la rotación donde se minimiza el problema de plagas, malezas y enfermedades. También la fertilidad natural de los suelos puede ser mejorada, dando como resultado un mejor equilibrio para la vida microbiana. Además, investigaciones realizadas por EMBRAPA (2006), comprobaron que la secuencia de cultivos puede influenciar positivamente en los aspectos ambientales y en los atributos de los agroecosistemas, principalmente, por la reducción de

procesos erosivos que son influenciados por la arquitectura de planta, el tipo de sistema radical, el espaciamiento entre surcos y por la formación de residuos de cobertura.

Boehm & Anderson (1997) comprobaron que al reducirse el período de barbecho, por aumento del número de cultivos en la secuencia, mejoró la calidad del suelo como consecuencia de una mayor frecuencia del aporte de residuos, que al incrementar la fracción de MO lábil modificaron la condición física (menor densidad aparente y mayor agregación del suelo).

La inclusión de gramíneas como el maíz y centeno en la secuencia pueden reducir el uso de herbicidas para control de malezas (Reicosky & Forcella, 1998).

En sistemas de producción que rotan cultivos anuales con pasturas plurianuales de gramíneas y leguminosas, el ingreso de N por fijación simbiótica supera los 100 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Díaz-Roselló, 1992; Sawchik, 2001), pero cuando la fase agrícola de la rotación se alarga o el sistema es agrícola puro, el ingreso de N, es muy escaso, por lo que debe ser reemplazado por el agregado de mayores cantidades de N como fertilizante.

La utilización de plantas con capacidad para la fijación simbiótica de nitrógeno y/o reciclado de nutrientes es una estrategia que ha demostrado tener grandes ventajas en la rotación de cultivos. El nitrógeno mantenido en la forma orgánica está menos sujeto a pérdidas por lixiviación o volatilización, pues es provisto lentamente de acuerdo con la mineralización de los residuos vegetales. El aumento de productividad de los cultivos comerciales en sucesión a las leguminosas, probablemente ocasione un aumento de residuos no cosechados en el suelo, favoreciendo la acumulación de MO y del secuestro de CO₂ (Amado *et al.*, 1998).

En los próximos años la tendencia al monocultivo en rotación será mayor que la actual, razón por lo que se advierte una pérdida de MO y de fertilidad natural del suelo que ocasiona además enfermedades de fin de ciclo (Sá Pereira *et al.*, 2013). El balance negativo de nutrientes y MO en esquemas donde predomina la soja y faltan gramíneas se produce una pérdida de fertilidad de los suelos, que se hace explícita a través de la compactación y el escurrimiento superficial (Casas, 2007b). En general, los agrosistemas sólo reponen alrededor del 25 % de N y 55 % de P que se extrae. En el caso de calcio (Ca), azufre (S) y magnesio se aporta mucho menos. Por este motivo, se torna necesario implementar este tipo de prácticas de manejo, como la inclusión de leguminosas, especialmente en explotaciones de pequeños y medianos productores, incrementando tecnologías de procesos en disminución de la utilización de insumos y reduciendo sustancialmente sus costos de producción.

La *Vicia villosa* es una especie leguminosa que se adapta como cultivo de invierno y presenta beneficios como antecesor del cultivo de maíz, ya que posee la capacidad de fijar, N

atmosférico, permitiendo disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados (Ernst, 2004; Silva *et al.*, 2006).

Además de estos estudios, otros resultados de investigación donde fue utilizado N₁₅, indicaron que la mayor proporción de N de la biomasa de leguminosas tiene como destino el suelo, donde queda acumulado en forma de N orgánico, que muy lentamente se torna disponible para los cultivos en la sucesión (Acosta *et al.*, 2011). Estos últimos autores además constataron que la asociación de sistemas de siembra conservacionista (reducido y siembra directa) con el uso de leguminosas proporcionó el mejor ofrecimiento de N al maíz (efecto inmediato).

Las estrategias de secuencias de cultivos, al alterar el momento, la ubicación, la cantidad y la calidad de los aportes de residuos de cultivo, pueden afectar el tamaño, la tasa de reciclado y la distribución vertical de los compartimentos de C y N en el suelo (Franzluebbers *et al.*, 1994).

4.4. Sistema de labranza

La siembra directa (SD), junto con otras prácticas de manejo de suelo como rotaciones, barbechos, fertilización, fecha de siembra, cultivares y control de malezas, producen un impacto positivo en la EUA e incrementan los rendimientos y el aporte de la MO. Este impacto positivo, resulta muy beneficioso en zonas de producción en secano y con balance hídrico negativo (zonas semi-áridas y sub-húmedas). Dentro de los cultivos extensivos, el maíz en especial presenta una gran sensibilidad a la falta de agua y, en consecuencia, las prácticas de manejo que mejoren la EUA pueden tener un efecto significativo sobre su productividad (Micucci, 2004).

La SD impacta positivamente en la EUA, al incrementarse luego de varios años la cobertura en la superficie del suelo (Andriulo & Cordone, 1998), mejorando la capacidad de agua disponible del suelo (CAD) (Barbosa *et al.*, 1997; Marelli, 1998; Dardanelli, 1998, citados por Micucci 2004).

Uno de los efectos más marcados de la SD es la redistribución de la MO dentro del perfil. La no remoción del suelo produce la estratificación de la MO la cual puede utilizarse como indicador de calidad y funcionamiento del sistema (Franzluebbers, 2002; Galantini *et al.*, 2004). La estratificación comienza con la suspensión del laboreo y es afectada por las condiciones naturales (tipo de suelo, condiciones climáticas, etc.) y por el manejo (cantidad, calidad y distribución de los residuos de cultivos, aplicación de fertilizantes, rotación, etc.) (Galantini *et al.*, 2005, 2008).

Según Casas (2007a) el sistema de SD con rotación de cultivos genera un incremento importante de MO total en los primeros centímetros de suelo, como así también de la fracción de materia orgánica particulada (MOP). Esta fracción es la que se encuentra comprendida entre 53 y 250 micrones de diámetro de fundamental importancia para la fertilidad actual y la actividad biológica del suelo.

Amado *et al.* (2000) confirmaron que las grandes cantidades de residuos de cultivos dejados por la SD acentúan la acumulación de MO en el suelo. Los altos incrementos de MO ocurren mayormente en niveles superficiales del suelo, pero también se observa un incremento importante de 0 a 30 cm.

Es ampliamente reconocido que el laboreo conservacionista y, particularmente la SD, producen una menor oxidación del C que el laboreo convencional (Paustian *et al.*, 2000). Esto se debe, en primer lugar, a que la falta de laboreo favorece la formación de agregados y que éstos encapsulan el C y, por otro lado, a la modificación del ambiente edáfico: la densidad, la distribución del tamaño de poros, la temperatura, la humedad y la aireación se combinan, restringiendo la biodegradación del C (Puget & Lal, 2005). A nivel nacional, la bibliografía también es cuantiosa sobre esta temática (Panigatti *et al.*, 1998; 2001; Andriulo *et al.*, 2008, entre otros).

Sin embargo, de acuerdo con una recopilación realizada por Carfagno (2008), para alcanzar la sustentabilidad ambiental en las zonas semiáridas no alcanza sólo con la SD y la fertilización. Para la conservación del recurso suelo en particular, según Salas *et al.* (2005), es preciso que, junto con la SD y la fertilización, se realice una adecuada rotación, incluyendo gramíneas que aporten rastrojos voluminosos y de lenta degradación.

Ernst (2004), en una amplia revisión bibliográfica, encontró que la recuperación del N fijado por las leguminosas varía con el tipo de laboreo utilizado. La información coincide en que con SD la recuperación dentro de la estación de crecimiento, es más lenta. Esto puede ser beneficioso o no, si se pretende que abarque todo el ciclo, es mejor en SD, pero si al principio SD no aporta puede ser negativo. (Varco *et al.*, 1993; Sainju & Singh, 2001).

Varco *et al.* (1993) determinaron que del C agregado sobre el suelo a los 120 días quedaba solo el 21% en LC, mientras que el 43% aún estaba presente en SD, donde se utilizó vicia incorporada y dejada en superficie con una historia de barbechos de invierno. Esto es una ventaja en la liberación del N fijado por la leguminosa. Mansoer *et al.* (1997) en el mismo período de tiempo determinaron una pérdida del 69% del N existente en el rastrojo con LC y del 36% con SD. La liberación de N siguió una curva cuadrática con LC y fue lineal con una menor tasa con SD. Como resultado de estas diferencias impuestas por la labranza o no del

suelo, el aporte de N desde los residuos de cultivos antecesores difiere en el tiempo. Con SD, el mayor aporte se produce tardíamente cercano a la floración del cultivo de interés. De esta forma, la eficiencia puede quedar comprometida si no se corrige la deficiencia inicial del nutriente con fertilizante nitrogenado (Reeves *et al.*, 1993).

4.5. Fertilización

La fertilización es una práctica de manejo de los cultivos que permite lograr mayores rendimientos por unidad de superficie (Bono & Romano, 2007). Los aumentos de producción se deben en más del 55% de los casos al uso de fertilizantes, por lo que el consumo de los mismos, ocurre a nivel mundial y nacional. En Argentina ha aumentado sustancialmente en las últimas décadas a partir de la década del 90 (FAO, 2010).

Después de la disponibilidad hídrica, el N es el nutriente que mayormente limita la producción de los cultivos en secano en la región semiárida y subhúmeda pampeana (Echeverría, 2009). Los contenidos de N disponible para las plantas en el suelo son insuficientes para cubrir los requerimientos de maíces de alto rendimiento (240 a 300 kg ha⁻¹ N), por lo cual la práctica de fertilización nitrogenada provee N en cantidad para un estado fisiológico óptimo en floración, momento en donde se define el rendimiento (Andrade, 1995). En el mercado existe gran variedad de fertilizantes inorgánicos a los que el productor comúnmente recurre para la nutrición de sus cultivos. Sin embargo, como consecuencia de un uso excesivo y/o mal uso, se producen efectos no deseados de sus aplicaciones, tales como dispersión de N en el ambiente mediante fenómenos de volatilización, lixiviación y desnitrificación, produciendo serios problemas ambientales de contaminación nítrica, lo que produce potenciales efectos sobre la salud humana y animal (Fernández, 2001).

Según Galantini *et al.* (2008), la fertilización produce cambios significativos sobre las diferentes fracciones orgánicas, incrementando el contenido de MOP y modificando tanto la cantidad como la calidad de la materia orgánica asociada a la fracción mineral (MOM). Las diferentes cantidades de MOP dependen del balance entre aportes y salidas del sistema de producción. La cantidad y calidad de los residuos orgánicos son las dos características que determinan el aporte y su velocidad de transformación. Por otro lado, la descomposición dependerá del ambiente físico y de las condiciones climáticas, en especial temperatura y humedad. Aquellos factores que afecten estas condiciones, tales como pisoteo, cobertura, riego, etc., tendrán efecto directo sobre el balance de carbono en el suelo.

El análisis que surge de la interpretación de estas estimaciones sugiere como puede ser incrementada la cantidad de N absorbida por los cultivos y disminuir las pérdidas del sistema suelo-planta. La inmovilización por parte de la biomasa del suelo debería ser mantenida en formas de inmediata o potencial disponibilidad para las plantas y tornar al sistema agrícola, más sustentable. La respuesta a esta situación es compleja, en consecuencia, solo será alcanzada con un pormenorizado conocimiento de la dinámica del N en los diferentes agroecosistemas empleados en la producción agrícola (Amado, 1997).

Yamada (1996) y Yamada & Abdalla (2000) en Entisoles del SO de Brasil en Dourados-Mato Grosso do Sul - Brasil, concluyeron que, cuando se incrementó el N en el suelo a través de la fertilización mineral, disminuyó la relación C:N, pudiendo ocurrir en un primer momento la aceleración de la mineralización del N, dependiendo del residuo que se encuentra en la cobertura del suelo. Otros factores además de la relación C:N, como son la temperatura, humedad y aireación del suelo, pueden afectar la inmovilización o la mineralización del N.

Sá (1989, 1996) evaluó la productividad del maíz en sistemas de SD después de vicia (*Vicia* sp.) y lupinos (*Lupinus* sp.) como CC. Además, constató que el nivel de respuesta al N es influenciado por la fertilidad del suelo y por el material genético de maíz. En áreas donde la SD tiene menos de cuatro años (fase de implantación), se recomienda el aporte de N en la siembra de maíz, buscando compensar parte del efecto negativo de aporte de residuos de cultivos de alta relación C:N. Según este autor, después de esta fase inicial de alta disponibilidad de N y, por lo tanto, de menor disponibilidad para las plantas, lentamente, se inicia el restablecimiento del equilibrio entre inmovilización y mineralización. A medida que esto sucede, el aporte de residuos de cultivos antecesores proporciona cantidades de N orgánico en la camada superficial del suelo. De este modo, se alcanza un nuevo equilibrio entre la formación y la descomposición de la MO. Resultados obtenidos por Sisti *et al.* (2004) y Amado *et al.* (2006) muestran que el aporte de nitrógeno es fundamental en la construcción y acumulación del carbono orgánico (CO) del suelo en agrosistemas de SD de Brasil.

En el nuevo ambiente generado por la SD, la inmovilización de N puede influir en su disponibilidad y dependiendo de la sucesión de cultivos, los suelos pueden presentar deficiencias de N en el estadio inicial de crecimiento del maíz, especialmente cuando es cultivado en sucesión a una gramínea (Basso, 1999).

Fernandes *et al.* (1998) observaron que la aplicación de 60 kg ha^{-1} de N en sistemas de SD proporcionó la mayor recuperación aparente de N aplicado, mayor eficiencia de su utilización y mayor eficiencia de los sistemas de labranza de suelo. Además, afirman que con dosis superiores a 60 kg ha^{-1} de N, la recuperación, por el maíz, del N aplicado fue menor.

El empleo de fertilizantes nitrogenados de origen industrial se ha generalizado debido a las ventajas operativas. No obstante, el elevado costo energético constituye un incentivo al empleo de otras fuentes de N como las leguminosas. Esto plantea la necesidad de realizar estudios específicos para cuantificar el real aporte de N de estas fuentes alternativas y de sus pérdidas a fin de definir la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) de los mismos. La complejidad de estos estudios plantea desafíos más que interesantes para abordarlo con un enfoque interdisciplinario a fin de poder realizar un uso racional de dichos recursos (Echeverría, 2009).

La producción moderna de cultivos extensivos requiere la implementación de prácticas de manejo eficientes, sustentables y amigables con el ambiente. Bajo esta premisa, maximizar la EUN tanto de los fertilizantes sintéticos como orgánicos o el N derivado de la MO del suelo, permitirá lograr elevados rendimientos de los cultivos minimizando las pérdidas de N al ambiente (Echeverría, 2009).

4.6. Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura (CC) de invierno previos a un cultivo de verano, se establecen en el período de tiempo entre la cosecha del cultivo de grano de verano y la siembra del siguiente cultivo de verano, y no son pastoreados, incorporados, ni cosechados (Álvarez & Scianca, 2007). Entre sus funciones se encuentran la cobertura y protección del suelo, la captura de nutrientes móviles como el N y la liberación posterior de los mismos como resultado de su descomposición, el aporte de carbono, el aumento en la EUA, control de malezas, plagas y enfermedades, y depresión del nivel freático.

Los efectos favorables de la inclusión de CC han sido puestos de manifiesto en diferentes ambientes (Cordone, 1990; Monegat, 1991; Ruffo, 2003; Havlin *et al.*, 2005; Miguez *et al.*, 2009). Los resultados, frecuentemente resultan muy variables entre sitios, dada la cantidad de factores involucrados (clima, suelo y manejo) y la fuerte interacción entre ellos durante el desarrollo de los CC, así como durante el barbecho posterior (Galantini, 2008).

En esta práctica de manejo, una vez que se suprime el crecimiento del cultivo, sea mediante métodos mecánicos (corte o aplastado) o bien químicos (glifosato) se lo mantiene en superficie, sin incorporarlo al suelo, continuando su efecto protector.

Los CC pueden reemplazar parcial o totalmente a la fertilización química, ya sea por la fijación de N por parte de las leguminosas, como por la reducción de la pérdida de nutrientes por lixiviación cuando se utilizan gramíneas que los acumulan en su biomasa para liberarlos luego, lentamente, e inhibir el crecimiento y desarrollo de malezas (Derpsch *et al.*, 1991; Aita

et al., 2001; Heinrichs *et al.*, 2001; Ruffo & Bollero, 2003a; Calegari, 2007). Por ejemplo, cuando se utiliza avena como CC su alta relación C:N y la baja velocidad de liberación de N de sus residuos determina que apenas el 40 % del N contenido en la planta sea aprovechado en las cuatro primeras semanas después de su secado, ya sea para cosecha o como CC (Amado *et al.*, 1998; Aita *et al.*, 2001; Aita & Giacomini, 2003).

Los CC constituyen excelentes coberturas que podrían disminuir las pérdidas de agua por escurrimiento y evaporación (Cordone & Hansen, 1984), ocupar los períodos entre cultivos en los que el suelo queda en barbecho (Ruffo & Bollero, 2003b) y permitir un nuevo y mayor ingreso de rastrojos al sistema (Ernst, 2004).

Además del reemplazo del N y la fijación de nutrientes, los CC pueden aumentar los rendimientos de los cultivos comerciales, manteniendo la humedad del suelo (Mitchell & Teel, 1977; Ebelbar *et al.*, 1984; Muzilli *et al.*, 1989; Salton & Mielniczuk, 1995) y la disminución de las temperaturas máximas y amplitud térmica (Salton & Mielniczuk, 1995), así como el reciclaje de nutrientes como el fósforo y potasio (De María & Castro, 1993) y atenuar las pérdidas de MO (Daliparthy *et al.*, 1994). Los cultivos de leguminosas como CC que anteceden al maíz aumentan la disponibilidad de N en el suelo. Su absorción por el cultivo de maíz y el rendimiento de granos, depende de un adecuado sistema de rotación. Al compararse sistemas de manejo de vicia, se constató que la misma desecada un día antes de la siembra de maíz proporcionó un aumento del 20 % en el rendimiento de granos. Si la vicia es desecada quince días antes de la siembra, muestra una alta tasa de mineralización de N. Por otro lado, especies de gramíneas con alta relación C:N presentan baja tasa de descomposición y ofrecen mayor protección del suelo durante todo el año o ciclo del maíz (Sá, 1996; Argenta *et al.*, 2000).

En investigaciones realizadas por Giacomini *et al.* (2004) en un suelo Hapludalf (EMBRAPA, 1999) del Sur de Brasil comprobaron que la vicia pura o asociada con avena como CC, afectaron positivamente el rendimiento de maíz en relación al barbecho o avena pura como antecesor y CC respectivamente. Hasta una proporción de 70% de avena y 30% de vicia, fue posible alcanzar una producción de maíz equivalente a la vicia sola como antecesora y el 70% de producción se logró con el antecesor barbecho prolongado con la aplicación de 80 kg ha⁻¹ de N.

En otras determinaciones realizadas también, en el sur de Brasil con CC (avena y vicia) como antecesores de maíz, Aita *et al.* (1994) observaron que la cantidad de N absorbido por la parte aérea de las leguminosas fue significativamente mayor que la acumulada por la avena. Esto se vio reflejado en la cantidad de N absorbido en el maíz cultivado en sucesión a

leguminosas, como así también en el rendimiento de grano, el cual fue equivalente al uso de N mineral con antecesores a barbecho limpio previo al maíz.

Entre tanto Argenta *et al.* (2000) determinaron que el empleo, solo de CC, puede no ser suficiente para suplir las necesidades de N de la planta de maíz y elevar la productividad a niveles satisfactorios, pues el nitrógeno es demandado en grandes cantidades por esta especie y este es el nutriente que proporciona las mayores respuestas del cultivo a la fertilización. Da Silva *et al.* (2007) determinaron que las diferentes dosis de N y los distintos CC como antecesores influenciaron significativamente en la absorción de N natural del suelo por parte del cultivo de maíz. El tenor máximo de N acumulado en las hojas de maíz fue de 29,4 mg g⁻¹ con antecesor avena, 29,9 mg g⁻¹ con vicia y 30,6 mg g⁻¹ para nabo, obtenido con dosis de 220, 170 y 205 kg ha⁻¹ respectivamente. En la sucesión vicia/maíz se produjo la máxima absorción con la menor dosis de N, debido probablemente a la fijación de N en el suelo por parte de la leguminosa.

A pesar de las ventajas del uso de vicia como antecesor del maíz, es importante el desarrollo de otras prácticas de manejo (densidades, asociación con otras especies de CC) que posibiliten mayor permanencia de los residuos en el suelo. Las especies de CC cuando se las cultiva solas, presentan ventajas y desventajas para el maíz en sucesión y para el sistema de SD, tornándose difícil la recomendación de una especie que contenga solamente beneficios. El uso de sistemas asociados con diferentes especies puede propiciar a la formación de una cantidad de residuos de suelo más próximo a lo ideal, aumentando el rendimiento del maíz en sucesión y resultando en beneficio para el sistema de SD. La asociación de gramíneas y leguminosas, puede contribuir a la mayor cobertura del suelo, con una mayor fijación y reciclado, principalmente, de N₂.

La utilización de sistemas conservacionistas de producción de maíz con el uso de CC es una eficiente alternativa al sistema tradicional (barbecho/maíz) en la recuperación del tenor de MO en el suelo y contribuye al secuestro de C atmosférico, en suelos agrícolas, mejorando la calidad ambiental (Ruffo (2004).

Según Ruffo (2004), al comparar la respuesta de maíz a la fertilización nitrogenada con una leguminosa como antecesor o con barbecho invernal, se observan fundamentalmente dos tipos de respuesta.

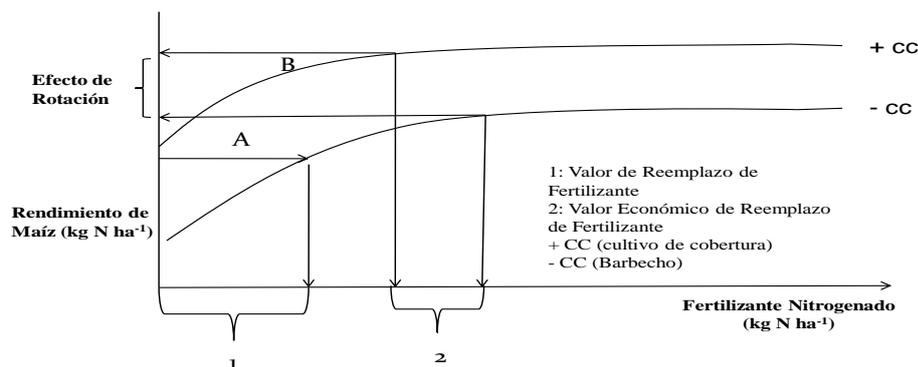


Figura 3. Respuesta del rendimiento de maíz en función de los kg de fertilizante nitrogenado en dos situaciones de cultivo de cobertura antecesor, A (- CC) o B (+ CC) (Ruffo, 2004).

Sin CC se observó, que el rendimiento del maíz, aumentaba hasta dosis más elevadas que las observadas cuando el maíz fue realizado con CC. Para cada dosis de N, en la cual hubo respuesta, el rendimiento con CC fue siempre mayor que sin CC. Esta respuesta implica un ahorro de fertilizante nitrogenado que puede ser cuantificado a partir de los valores económicos de reemplazo y esto se debe al efecto de rotación como se observa en la Figura 3.

La utilización de CC como sustituto a los fertilizantes nitrogenados es importante para mejorar la calidad ambiental, ya que la producción industrial de nitrógeno consume grandes cantidades de energía, obtenida a partir de la quema de combustibles fósiles (Da Silva, 2004).

Según (Li, 1995) trabajando con CC en rotaciones y en comparación al barbecho largo como antecesores del maíz, promovieron una menor emisión de CO₂ atmosférico. El sistema maíz + CC resultó en un balance positivo de C en comparación al sistema barbecho/maíz. Se estimó que el 75% del valor de C fue debido a la fijación de CO₂ atmosférico en la formación de MO del suelo.

Es escasa la información en la literatura argentina sobre el patrón de acumulación de N durante el ciclo del maíz en sucesión a CC de suelo en sistemas de SD.

En muchas regiones del mundo, la viabilización económica de la agricultura, en suelos arenosos y pobres en nutrientes, con bajo tenor de MO, se hizo posible solamente después de la introducción de los CC. En relación con la MO se comprobó que los contenidos fueron significativamente mayores cuando se incorporaron CC a la rotación (Wander & Traina, 1996; Ding *et al.*, 2002, 2005). Los estudios realizados por los autores anteriormente citados, tienden

a dar respuestas a la necesidad de mantener o acrecentar el tenor de MOP del suelo y con ello el de nitrógeno orgánico. Para asegurar la sustentabilidad del sistema, es fundamental su asociación a la rotación y sucesión de cultivos diversificados que produzcan adecuada cantidad de residuos de cultivos en la superficie del suelo.

Derpsch *et al.* (1991) y Calegari (2007) citan, que en zonas subtropicales, las altas temperaturas y humedad llevan con el laboreo intensivo del suelo, a una degradación particularmente acelerada de MO existente en ellos. El tenor de MO de un suelo, en regiones templadas, no será aumentado solamente a través de los CC, puesto que todo el sistema de cultivo debe ser readecuado. Los monocultivos deben ser substituidos por rotaciones, en las cuales, especies de gran producción de materia seca (MS) como el maíz, son intercaladas con CC y otros cultivos principales. Las leguminosas son capaces de fijar simbióticamente el nitrógeno del aire. Pero también plantas no leguminosas son adecuadas como CC y contribuyen para minimizar la lixiviación de nutrientes del suelo, la movilización de nutrientes fijados tales como el fósforo, el enriquecimiento del suelo en MO e inhibir el crecimiento y desarrollo de malezas.

La limitante de los CC es el consumo de agua, por lo que el momento de secado debería ser anterior a su máxima demanda, período correspondiente a la floración, en el caso de leguminosas, ya que en este período generalmente producen la máxima fijación de N y a la encañazón en el caso de gramíneas (Casas, 2007b). Además, esto se encuentra fuertemente determinado por las condiciones ambientales del sitio en estudio.

En cuanto al balance de agua, no interesaría mucho el menor contenido de humedad al suspender el crecimiento de los CC, ya que un suelo con dichos cultivos es más eficiente en captar el agua de lluvia, por lo que en relación con el barbecho desnudo no existen diferencias en la disponibilidad de agua (Cordone & Hansen, 1986).

Ernst *et al.* (2009), trabajando en suelos Brunosol éutrico típico (MAP, 1976) del oeste de Uruguay concluyeron que, para cultivos de verano sembrados a partir de un CC en el promedio de los años, se lograron recargas de los horizontes superficiales con períodos de barbecho del entorno de los 20 días y recarga total de todo el perfil con períodos de 40 días. De todas maneras son períodos estimativos, ya que dependen mucho de la cantidad de precipitaciones y de las prácticas de manejo ocurridas entre el período inicio del barbecho - siembra.

Derpech & Calegari (1992) citan a la *Vicia villosa* como una leguminosa de buen crecimiento que proporciona una eficiente cobertura protectora, que se desenvuelve bien en suelos de baja fertilidad, produciendo además, una gran cantidad de biomasa, que podrá ser empleada como forraje de invierno, y como CC. Puede todavía, para esas finalidades, ser asociada con avena,

centeno, triticale, arveja forrajera, nabo forrajero, entre otras. Tienen las leguminosas, un ciclo largo, floreciendo a los 140-160 días que permiten, a través de la fijación simbiótica incorporar cantidades superiores a 90 kg ha^{-1} de N, presentando un importante efecto en el control de malezas invasoras.

La tasa de descomposición de los CC, depende de la naturaleza del material: composición química, relación C:N, volumen, fertilidad del suelo, manejo de la cobertura y de las condiciones climáticas, principalmente precipitaciones y temperaturas, debido a que estos factores influyen directamente en el metabolismo de los organismos descomponedores, principales agentes responsables de la descomposición de los residuos (Sá *et al.*, 2009).

La descomposición de los residuos aportados por los cultivos es realizada, esencialmente, por los microorganismos heterotróficos que retiran elementos para su nutrición y C necesario para la producción de energía y formación de tejidos microbianos (Aita, 1997). Entre tanto, factores abióticos y bióticos determinan la velocidad del proceso de descomposición y definen la persistencia de estos residuos en la superficie del suelo (Espindola, 2006).

Entre estos factores, la relación C:N de los residuos de CC adicionados al suelo asume un rol importante en la descomposición y en la relación entre mineralización/inmovilización de N a la solución del suelo. Janssen (1996) analizando varios estudios relacionados sobre mineralización de N, demostró que la fracción de N orgánico mineralizada está inversamente relacionada a la relación C/N y de manera idéntica a la descomposición de los residuos. La inmovilización puede ocurrir en cualquier fase de descomposición de los residuos. Jensen (1997) trabajando con residuos de lenteja, encontró inmovilización en los períodos iniciales de descomposición cuando la relación C:N era solamente de 15.

Por otro lado, para que los CC atiendan la demanda de N de los cultivos subsiguientes existe la necesidad de que, la descomposición de los residuos, ocurra en sincronía con la demanda del cultivo en sucesión (Amado *et. al.*, 2000). Lograr sincronizar la oferta de N desde estos productos con la demanda de los cultivos constituye un gran desafío (Echeverría, 2009).

La captura de NO_3 durante el largo período de barbecho que tiene lugar entre cultivos de invierno, de un año, y de verano del año siguiente, es otro de los objetivos perseguidos al establecer los CC. Allí se minimiza la lixiviación durante el otoño, principalmente en suelos, arenosos francos y franco arenosos de la planicie medanosa en la región semiárida y subhúmeda pampeana. En relación con este objetivo Nyakatawa *et al.* (2001) comprobaron sobre un suelo Paleudult típico hubo entre 23 y 82 % menos de NO_3 bajo CC que bajo barbecho. Similares resultados fueron obtenidos por Quiroga *et al.* (1999) quienes en su trabajo sobre Haplustoles énticos determinaron entre 70 y 83 % menos de NO_3 bajo verdeo de

invierno. Bono *et al.* (2007) encontraron un 50 % menos de NO₃ en el suelo con antecesor verdeo de invierno que cuando éste fue un barbecho prolongado bajo SD.

Aunque pueda existir en la parte aérea de los CC una significativa cantidad de N, la real cantidad de éste, que quedará disponible para el cultivo sucesor dependerá de la extensión de la descomposición de los residuos dentro de la estación de crecimiento del cultivo subsiguiente y de la dinámica de mineralización/inmovilización de cada tipo y cantidad de residuo aportado al suelo (Amado, 1997).

Giacomini *et al.* (2004) determinó que la asociación de avena + vicia como CC antecesores de maíz produjo una disminución en la cantidad de N mineral del suelo en relación a la vicia pura, siendo este efecto directamente proporcional a la cantidad de avena de la mezcla. El potencial de pérdida de N por lixiviación fue mayor después de vicia pura como antecesora de maíz que cuando se comparó con avena pura o la asociación de avena + vicia.

Amado *et al.* (2006) en un Hapludalf del sur de Brasil, determinaron que las dosis de N aplicadas a la avena redujeron la relación C:N de los residuos, pero no influyeron en la velocidad de descomposición y liberación de N en SD. Comprobaron además que todos los CC de leguminosas, presentaron la mayor tasa de liberación de N dentro de los 42 días posteriores a su desecación.

Según Alberto Quiroga (comunicación personal) con información recopilada de los grupos CREA, AAPRESID, Cooperadora de INTA Anguíl y criaderos privados surge que, el área de siembra con CC asciende actualmente en la Argentina a más de 120 mil ha. En consecuencia, existe un interés creciente de los productores por incluir en el sistema de producción otras especies como la vicia, trébol o avena + vicia, para disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados debido a la elevada demanda de N por el maíz y alto costo de los fertilizantes

5. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Un barbecho largo previo al maíz asegura una buena provisión de agua y N disponible al momento de la siembra. Este último a expensas de la oxidación de las fracciones lábiles de la MO del suelo. La inclusión de CC disminuye esa oxidación, aporta C haciendo menos negativo el balance de éste, a expensas del uso de agua y nitratos. Ambos aspectos representan objetivos contrapuestos. ¿Cuál es la alternativa más adecuada en el largo plazo para un balance positivo de la materia orgánica en el suelo y cómo repercute en la productividad del maíz implantado posteriormente? Este es un tema aún no resuelto, particularmente en las zonas subhúmedas y semiáridas de nuestro país.

5.1. Hipótesis general

La inclusión de los cultivos de cobertura como antecesor del maíz afecta simultáneamente los balances de C, N y agua, y el resultado final de estos balances depende, en gran medida, de la especie utilizada. La inclusión de gramíneas influye positivamente sobre el balance de C en desmedro del balance de agua y N, en el corto plazo, con consecuencias adversas para el cultivo posterior. Por otro lado, la inclusión de leguminosas influye positivamente sobre el balance de N, haciendo más eficiente el uso del agua, sin efectos adversos sobre el cultivo siguiente. El conocimiento de la dinámica de la transformación de los residuos y las fracciones orgánicas lábiles, así como su modelado matemático ayudan a plantear las estrategias más adecuadas para cada una de las posibles alternativas productivas.

5.2. Objetivo general

Evaluar distintos CC como una alternativa tecnológica en el cultivo de maíz para entender la dinámica de agua, del N y de las fracciones orgánicas, que permitan un eficiente uso y un aumento de la productividad del sistema.

5.3. Hipótesis y objetivos específicos

- *Hipótesis 1:* Los cultivos de cobertura afectan la dinámica del agua en el suelo y su eficiencia de uso, dependiendo de la especie y la materia seca (MS) producida, afectando al maíz posteriormente implantado.
Objetivo 1: Cuantificar el uso consuntivo y la eficiencia en el uso del agua y evaluar la probabilidad de alteraciones en el balance hídrico producido por diferentes cultivos de cobertura de ciclo otoño-invernal bajo el sistema de siembra directa.
- *Hipótesis 2:* Los cultivos de cobertura dependiendo de la especie y la materia seca (MS) producida, modifican la productividad y la eficiencia de acumulación de N, afectando al maíz posteriormente implantado.
Objetivo 2: Evaluar la formación de rendimiento, sus componentes y la acumulación de N en el cultivo de maíz, utilizando diferentes cultivos de cobertura como antecesores bajo un sistema de siembra directa.
- *Hipótesis 3:* Los componentes de calidad de los cultivos de cobertura son afectados por el ambiente y el sistema de cultivo.
Objetivo 3: Evaluar la producción y los parámetros de calidad de la biomasa aérea de los cultivos de cobertura de invierno bajo el sistema de siembra directa.
- *Hipótesis 4:* Los cultivos de cobertura modifican el balance de carbono en la secuencia Trigo-CC-Maíz, aumentando sólo el contenido de la fracción lábil de la materia orgánica en períodos cortos de tiempo. La velocidad de descomposición de los residuos de CC varía en función de la relación C:N de cada uno de ellos. El grado de descomposición es afectado por la temperatura y las precipitaciones.
- *Objetivo 4:* Ajustar ecuaciones matemáticas simples, con potencial de utilización en modelos, que expliquen la evolución de la dinámica de descomposición de residuos de CC y las transformaciones de las formas lábiles del CO del suelo bajo condiciones controladas de humedad y temperatura.

CAPÍTULO II

CULTIVOS DE COBERTURA DE OTOÑO/INVIERNO. SUS EFECTOS EN LA DISPONIBILIDAD Y DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO.

1. INTRODUCCIÓN

La mayor participación de cultivos de verano en la región sub-húmeda pampeana sur, principalmente soja y girasol, ha dado lugar a una importante reducción en el aporte de residuos. Intercalar cultivos invernales, como CC, es una alternativa a evaluar para proveer residuos ricos en carbono y mantener la cobertura de los suelos. Se reconoce que el consumo hídrico de estos durante el invierno podría interferir en la oferta normal de agua para el cultivo sucesor (Duarte, 2002; Venanzi *et al.*, 2006, Alvarez *et al.*, 2006a,b; Carfagno *et al.*, 2008). Según Fernández & Quiroga (2009), el costo hídrico de incorporar un CC sería un 50% menor con respecto a un barbecho para el cultivo de verano siguiente.

Para evaluar convenientemente la influencia de los CC sobre la disponibilidad de agua (costo hídrico en la generación de biomasa) resulta necesario considerar la capacidad de almacenaje de agua de los suelos. Este aspecto es particularmente importante, ya que define el período necesario para la recarga del perfil (desde el secado de los CC hasta el momento en que el agua es requerida por el cultivo siguiente). Además, otro de los factores que incide en la disponibilidad es la fecha de siembra del cultivo sucesor: para siembras de maíz (octubre) los CC deberían finalizar la extracción de agua antes que para siembras de soja (noviembre).

Muñoz-Carpena *et al.* (2008), utilizando diferentes modelos de balance de agua, concluyeron que la utilización de CC como antecesores de maíz mejoró las condiciones físicas del suelo, incrementó la retención del agua y la evapotranspiración real del cultivo siguiente.

Sin embargo, los resultados de incluir CC, frecuentemente, resultan muy variables entre sitios, dada la cantidad de factores involucrados (clima, suelo, manejo) y la fuerte interacción entre ellos durante el desarrollo de los CC, así como durante el barbecho posterior (Galantini, 2008).

Ernst *et al.* (2009) concluyeron que para cultivos de verano de primera, sembrados a partir de un CC en el promedio de los años, se lograron recargas de los horizontes superficiales con períodos de barbecho en torno de los 20 días y la recarga total del perfil con períodos de 40 días.

La rotación de cultivos y el manejo del período de barbecho son dos variables con capacidad de modificar la disponibilidad hídrica inicial para los cultivos de verano en un mismo suelo (Siri-Prieto *et al.*, 2006). Monzón *et al.* (2006) determinaron que son necesarios 0,86 mm de lluvia durante el período de barbecho por cada mm de capacidad de almacenamiento de agua del suelo para maximizar el efecto del manejo de la cobertura del suelo por rastrojo. En función de esto, cuando el período de barbecho es muy largo (mayor a 4 meses) es más probable que ocurran las precipitaciones necesarias para recargar el agua del suelo y, en estos casos, el problema es controlar el escurrimiento para no generar problemas de erosión (Díaz-Ambrona *et al.*, 2005). En tanto, con un período de barbecho corto, como los que establece el doble cultivo anual, la probabilidad de recargar el suelo se reduce, en especial, para los de mayor capacidad de almacenaje.

Según Ernst *et al.* (2009), para situaciones bajo SD, el manejo del período de barbecho es determinante del resultado final sobre la humedad disponible. Estas situaciones se producen cuando existe crecimiento vegetal, ya sea éste un cultivo (trigo, cebada), un verdeo o una pradera. En siembras tempranas sobre rastrojos de cultivos de verano del año anterior, la recarga de agua del suelo se produce durante el otoño/invierno/primavera, por lo que el manejo de barbecho debe tender a conservar el agua, reduciendo la evaporación (cobertura con rastrojo) y eliminando la transpiración (control de malezas). Sobre CC o verdeos de invierno, se debe contemplar además, la recarga del agua consumida por el cultivo. En estos casos, la cantidad de rastrojo y la cobertura del suelo depende del estado fenológico al momento de aplicado el herbicida y el tiempo transcurrido desde la aplicación del herbicida hasta la siembra.

En cuanto al balance del agua, no es relevante el menor contenido de humedad al suspender el crecimiento de los CC, ya que un suelo con CC es más eficiente en captar el agua de lluvia, por lo que en relación con el barbecho desnudo no existen diferencias en la disponibilidad de agua (Cordone & Hansen, 1986; Sá Pereira *et al.*, 2008a). En investigaciones realizados por Scianca (2010) se confirman estos resultados y se ponen en evidencia que esto se cumple para regímenes údicos y ústicos de la región pampeana subhúmeda oeste.

Con la siembra del cultivo de soja y trigo, también se expandió la SD en gran parte de la región pampeana subhúmeda sudoeste (Coronel Suárez) (Sa Pereira, 2006). En esta zona, se torna necesario pensar en alternativas de cultivos que incorporen C y N al suelo como pueden ser los CC.

Además, los restos vegetales de estos cultivos, cuando son manejados superficialmente, constituyen excelentes coberturas que podrían disminuir las pérdidas de agua por escurrimiento

y evaporación. De esta manera, se puede contrarrestar la acción persistente de la erosión hídrica y aumentar la eficiencia en el uso del agua (Cordone & Hansen, 1984).

Por otro lado, en investigaciones realizadas por Amado (1997) y Amado *et al.* (2002), se resalta la necesidad de interrumpir el crecimiento de los CC lo más próximo a la siembra del cultivo siguiente, atendiendo a la sincronización entre la oferta y demanda de N y agua del cultivo de maíz en la sucesión.

Baker & Griffis (2009), trabajando con CC de centeno como antecesores de soja y maíz, desarrollaron un modelo con datos de estaciones meteorológicas del lugar y datos de requerimientos fisiológicos del centeno obtenidos de la literatura, para simular la producción de biomasa y la disponibilidad de agua para estos cultivos en rotación. Ellos concluyeron que el agotamiento de humedad del suelo es más probable en años y lugares donde existió una mayor producción de biomasa de centeno.

Los CC son una herramienta agro-ambiental común para la protección del suelo y el agua subterránea. En investigaciones realizadas por Bodner *et al.* (2007) utilizando el método de coeficiente de doble cultivo de la FAO, para evaluar el riesgo de agotamiento de agua del suelo por CC, concluyeron que la utilización de diferentes CC, redujeron la alta evaporación de un suelo desnudo y consideraron más adecuada la utilización de un CC para la gestión del agua en ambientes limitantes en este recurso.

1.1. Hipótesis

Los cultivos de cobertura afectan la dinámica del agua en el suelo y su eficiencia de uso, dependiendo de la especie y la MS producida, afectando al maíz posteriormente implantado.

1.2. Objetivo

En consecuencia, los objetivos de este estudio fueron: cuantificar el uso consuntivo y la eficiencia en el uso de agua y evaluar la probabilidad de alteraciones en el balance hídrico producido por los diferentes cultivos de cobertura de ciclo otoño-invernal bajo el sistema de SD.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Generalidades del área bajo estudio

El trabajo fue realizado en un radio de 40 km de la localidad de Coronel Suárez, provincia de Buenos Aires (37° 25' 47,6'' de latitud sur y 61° 44' 59'' de longitud oeste a 243 msnm) entre las campañas agrícolas de 2005/08. Los suelos del sector bajo estudio corresponden a Argiudoles típicos (Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires, 1989) con un desarrollo morfológico Ap-BA-Bt-BC-C (Soil Survey Staff, 2010) de textura franco-arcillo-limosa (69,3 % limo+arcilla).

2.2. Clima y suelo

El clima se puede clasificar como templado a moderadamente frío, con heladas de hasta -10°C, con precipitaciones media anual de 770 mm y temperatura media anual de 14°C, variando entre 0 y 28°C. Los suelos son Argiudoles típicos franco-arcilloso, con las siguientes características: Unidad taxonómica de mayor representatividad que integran las Unidades cartográficas de Dominio edáfico 2 (Área Ventania), bien drenado. a) Horizonte superficial compuesto por un Ap de textura franco-arcillosa y un contenido de MO cercano al 4%. b) El horizonte BA, tiene textura franco-arcillosa y estructura en bloques. c) Le sigue un horizonte Bt muy espeso, con textura arcillosa a franco-arcillosa, estructura en prismas y abundantes barnices. d) Debajo continúa un horizonte BC de textura franca a franco-arcillosa pasando transicionalmente a un horizonte C. Los cinco ensayos fueron instalados durante las campañas 2005/06, 2006/07 y 2007/08.

Se registraron las precipitaciones diarias en los tres años en que se condujeron ensayos a campo y en cada uno de los sitios de estudio, desde la siembra de los cultivos de cobertura hasta la cosecha del cultivo de maíz. Se realizaron comparaciones de las precipitaciones acumuladas y decádicas de cada año con las históricas registradas en la Aeroestación de Coronel Suárez (SMN) (37° 25' 47,6''S; 61° 44' 59''O, 243 msnm) provincia de Buenos Aires correspondientes a la Serie (1944 – 2008).

2.3. Localización y área de estudio.

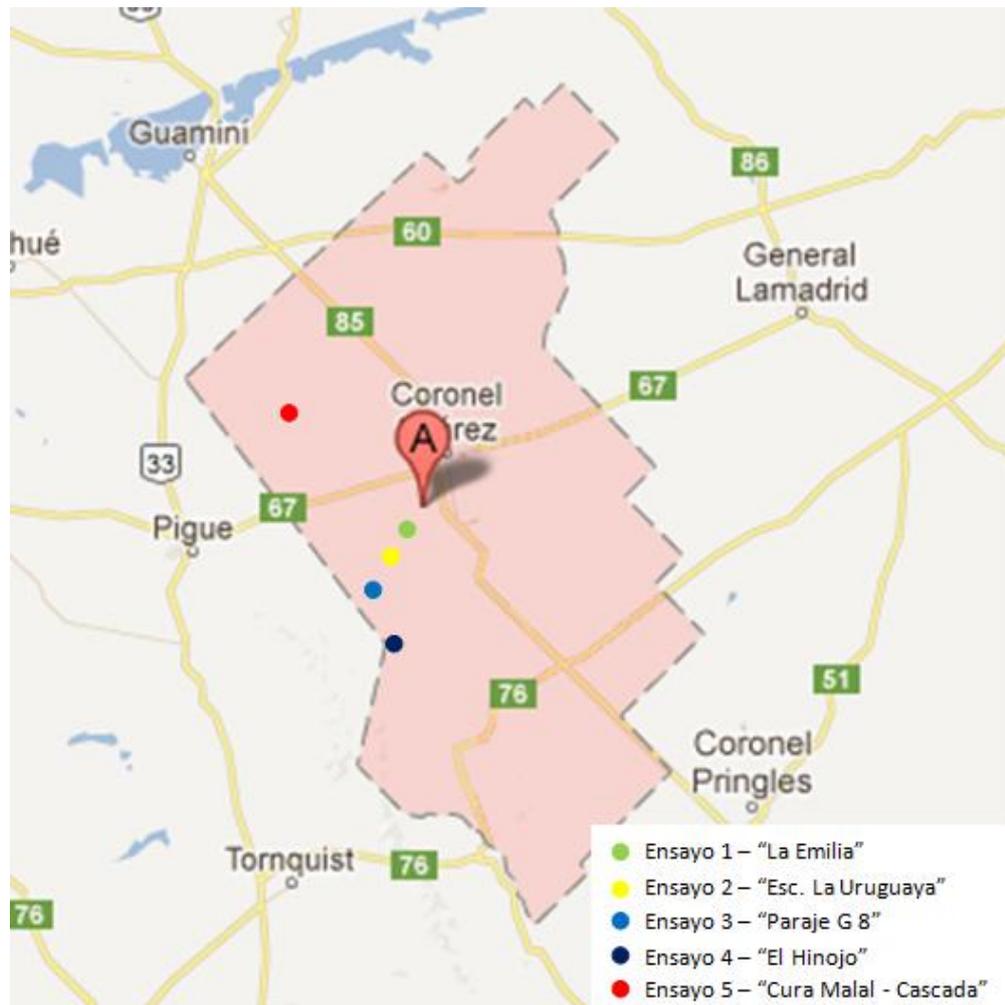


Figura 4. Localización geográfica de los sitios evaluados en el partido de Coronel Suárez.

2.4. Particularidades de los ensayos, diseño y antecedentes

Las especies utilizadas como CC de invierno fueron: avena (*Avena sativa*), vicia (*Vicia sativa*), trébol pastoreo “Laser” (*Trifolium resupinatum*), trébol cobertura “Leithering” (*Trifolium resupinatum*), trébol balanza (*Trifolium balansae*), avena + vicia (*Avena sativa* + *Vicia sativa*) y un testigo (Barbecho químico). Todos los ensayos se sembraron bajo el sistema de siembra directa (SD). La densidad de siembra fue de 40 Kg ha⁻¹ para vicia, 12 Kg ha⁻¹ para trébol, 100 Kg ha⁻¹ para avena y (50 + 50 Kg ha⁻¹) para avena + vicia. Los tratamientos fueron dispuestos en bloques al azar con tres repeticiones y en parcelas de 150 m². Se repitió el ensayo en cinco sitios sobre antecesor trigo, (E₁) “La Emilia” (2005/06), (37° 33' 06" latitud sur y 62° 01' 33" longitud oeste), (E₂) “Paraje G8” (2006/07), (37° 38' 43" latitud sur y 61° 59' 94" longitud oeste).

longitud oeste) y durante la campaña 2007/08 en tres sitios diferentes (E₃) “La Uruguaya” (37° 35’ 26’’ latitud sur y 62°02’ 47’’ longitud oeste), (E₄) “El Hinojo” (37° 41’ 05’’ latitud sur y 62° 05’45’’ longitud oeste) y (E₅) “Cura Malal-Cascada” (37° 23’ 13’’ latitud sur y 62° 11’ 27’’ longitud oeste) todos estos con similares características de textura de suelo. El secado de los cultivos de cobertura fueron realizadas 252, 239 y 237 días después de la siembra, en 2005, 2006 y 2007, respectivamente. La misma se realizó con rolo “faca” y herbicida glifosato + 2,4D a una dosis de (4 L ha⁻¹ + 500 cc ha⁻¹). Se realizaron dos cortes de evaluación a los 152 y 241 días (campaña 2005/06), 122 y 226 (campaña 2006/07) y a los 227 (campaña 2007/2008) días de la siembra. En este último caso, los cultivos debieron soportar 120 heladas durante el otoño-invierno y parte de la primavera. En los momentos de evaluación final, la avena se encontraba en estado de plena floración y la vicia en inicio de floración.

Se midió la humedad gravimétrica a la siembra de maíz, que coincidió en casi todos los años y sitios de ensayos con el momento de supresión de los CC. Esta determinación fue también realizada a la cosecha del maíz. En base a la precipitación durante el ciclo del cultivo (PP ciclo) y el agua total (AT) a la siembra y a la cosecha se calculó el uso consuntivo (UC).

$$UC \text{ (mm)} = PP_{\text{ciclo}} + AT_{\text{siembra}} - AT_{\text{cosecha}}$$

El UC representa el agua disponible para el sistema y no para el cultivo. Según Galantini *et al.* (2007) un suelo pobre en “estructura” será menos eficiente en la captación de las lluvias, un arenoso menos eficiente en la retención, uno pobre en cobertura menos eficiente en la conservación, etc. El UC integra factores naturales e incontrolables con aquellos controlables por el manejo.

Se calculó la eficiencia en el uso del agua (EUA), como la cantidad de materia seca (MS) producida por los CC por milímetro de agua disponible (UC). El contenido hídrico en mm de agua total del suelo fue medido a un metro de profundidad (a intervalos de 20 cm) como así también, el agua útil (AU) (agua retenida por las plantas para su crecimiento y desarrollo entre -33 y -1500 kPa). Para este último cálculo, se determinaron el punto de marchitez permanente (contenido hídrico del suelo en el cual las plantas no pueden absorber el agua remanente que por convención se estima en -1500 kPa) y b) la capacidad de campo (contenido hídrico que permanece en el suelo luego de drenar libremente y en un tiempo de 48 hs; por convención se toma un valor de -33 kPa) mediante olla y membrana de presión (Richards, 1947; Klute, 1986). También se determinó el valor de la densidad aparente (DA) utilizando el método del cilindro,

volumen 54,3 cm³ (Burke & Bouma, 1986) de todos los suelos de los sitios de ensayo donde se realizaron las experiencias.

2.5. Distribución Gamma

Dentro de las funciones que mejor ajustan a la lluvia mensual y estacional se encuentran las funciones teórica Gamma, log-normal, raíz cúbica o Gamma incompleta (Thom, 1966; Ravelo y Seiler, 1978; Rojas y Conde, 1980; Wilks, 1995). Asimismo se reconoce que la función Gamma es una de las de mejor ajuste al comportamiento de la precipitación en Argentina (Scian & Pierini, 2013) así también como para las regiones semiáridas (Forte Lay *et al.*, 1984).

En base a registros de lluvia medidos diarios para el período 1944-2009 se calcularon las probabilidades de exceso de una cantidad determinada de lluvia (mm) mensuales, empleando la distribución teórica Gamma. La distribución gamma ajustada es, en general, mejor que otras distribuciones teóricas para el caso de precipitaciones.

La distribución Gamma es asimétrica y resulta adecuada para las variables cuyo límite inferior es cero. La función densidad de probabilidad (FDP) de esta distribución se expresa:

(1)

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

Siendo $\alpha, \beta > 0$; en donde α es un parámetro de forma y β es un parámetro de escala. Estos parámetros se pueden estimar mediante la aproximación de Thom (1958) de la siguiente manera:

(2.a)

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right]$$

(2.b)

$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum \ln x}{n}$$

(2.c)

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

Donde \bar{x} es el valor medio de la variable aleatoria. Cuando la precipitación toma valores nulos la aproximación sigue un procedimiento diferente; se calcula una función de distribución mixta compuesta por una función de probabilidad para los valores nulos y otra para los valores no nulos de la variable aleatoria.

Si m es el número de los valores nulos, se acepta que la probabilidad de que la precipitación mensual sea igual a cero es $q=m/n$ y la probabilidad de que sea superior a cero $p=1-q$. En estos casos, la función de distribución de la serie está dada por:

(3)

$$H(x) = q + p * G(x)$$

En donde $G(x)$ es la función de distribución de los $N - m$ términos distintos de cero de la serie.

Los ensayos fueron realizados en un suelo, sin limitante de tosca en profundidad y una capacidad de almacenamiento de agua útil de (90 a 120 mm) en un espesor de 100 cm. Se realizó una estimación del balance diario de agua, calculando el contenido de AU en el suelo a lo largo del año, en base a la necesidad teórica de agua de los CC de invierno en la región (FAO, 1997), a la capacidad de retención de agua útil del suelo (CAU, diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente) y a las lluvias diarias, utilizando una planilla de cálculo. Este balance simplificado no tiene en cuenta variables importantes como la pérdida de agua por escurrimiento superficial, variaciones en la evapotranspiración por cambios en la cobertura del suelo, entre otras. Sin embargo, es una herramienta útil para estimar los cambios ocurridos en pequeños intervalos de tiempo (Galantini *et al.*, 2008).

El trabajo fue realizado utilizando un diseño estadístico en bloques al azar con tres repeticiones, durante las campañas 2005/06, 2006/07 y 2007/08.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Precipitaciones

Los registros mensuales de precipitaciones en cada sitio experimental, desde la siembra de los CC hasta el momento de la cosecha del maíz (marzo a mayo del año siguiente) durante las campañas 2005/06, 2006/07 y 2007/08 y las precipitaciones históricas (1944-2009) son presentados en la Figura 5.

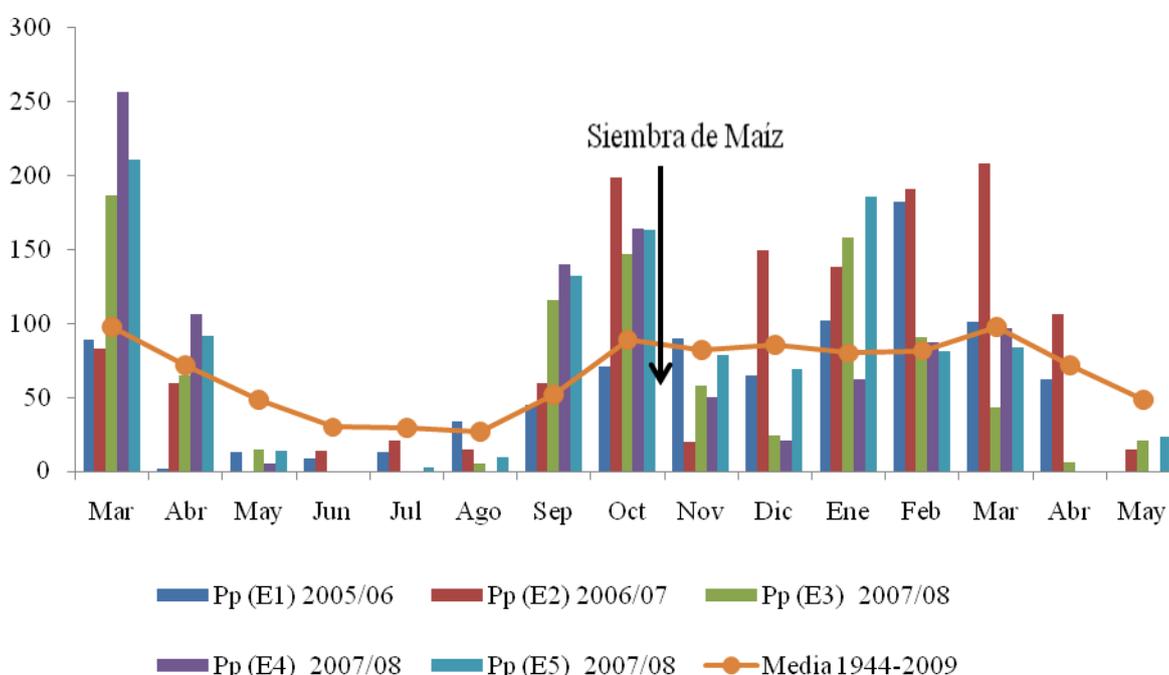


Figura 5. Precipitaciones mensuales históricas (1944-2009) y ocurridas durante los ensayos E₁, E₂, E₃, E₄ y E₅ (de marzo a mayo de 2005/06, 2006/07 y 2007/08) (mm). Aeroestación meteorológica Coronel Suárez.

Las precipitaciones en el año 2005 desde la fecha de siembra de los CC hasta su corte o siembra de maíz acumularon 187 mm. En el año 2006 para el período que va de marzo a octubre se acumularon 452 mm. Esto determinó un menor crecimiento y producción de MS de los cultivos de cobertura en el año 2005 con respecto al 2006.

Cuando se analizaron las precipitaciones acumuladas del año 2007 en los tres sitios de ensayos E₃, E₄, y E₅, en una misma fecha de corte de cultivos de cobertura/siembra de maíz y

en la misma fecha de siembra para los CC, estas fueron de: 535, 624 y 672 mm. Estos resultados determinaron un excelente crecimiento en otoño-inverno-primavera de los CC estudiados y una recuperación del agua en el suelo al momento de la siembra del cultivo de maíz en los tres sitios de experimentación. Las precipitaciones acumuladas fueron en todos los casos superiores a los obtenidos en los dos años anteriores.

3.2. Distribución Gamma

En la Figura 6 se observa como varía la probabilidad de exceso de precipitaciones durante los períodos de crecimiento de los CC y del maíz en sucesión.

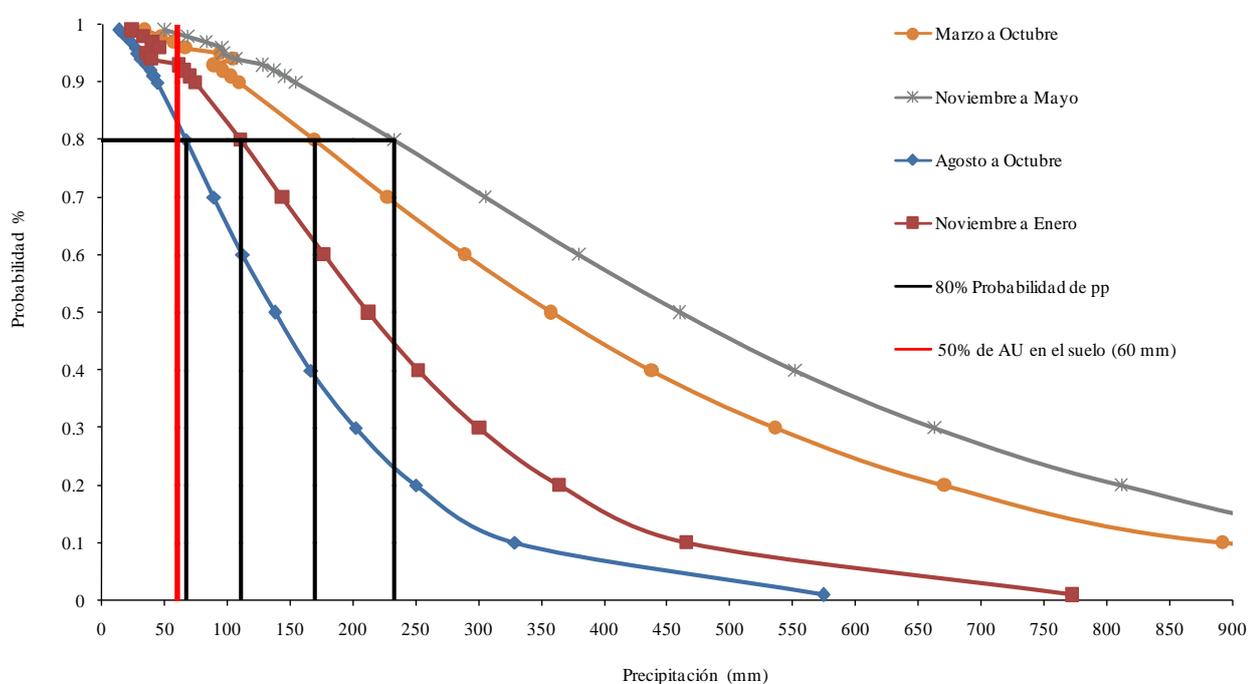


Figura 6. Probabilidad de ocurrencia de precipitaciones (pp) para los períodos (marzo - octubre), (noviembre - mayo), (agosto - octubre), (noviembre - enero) para el promedio histórico (1944 - 2009). Aeroestación Meteorológica Coronel Suárez.

Para facilitar la interpretación de la información contenida, se trazó una línea en la Figura 6 que indica el 80 % de probabilidad de ocurrencia de precipitaciones, comprobándose que éstas superan los 233 mm en el período de noviembre a mayo (ciclo del maíz), 169 mm de marzo a octubre (período de crecimiento de los CC), 111 mm de noviembre a enero (siembra a floración) y 67 mm de agosto a octubre (período de recarga del perfil de suelo). En este último

período (agosto/octubre) existe un 80 % de probabilidad de alcanzar un 50% AU (60 mm) nivel mínimo necesario para decidir la siembra de maíz.

Cuando se analizan las precipitaciones promedio para esos mismos períodos en los 5 sitios de ensayo experimentales y los 3 años evaluados, las mismas ascienden a: 512 mm (marzo a octubre), 534 mm (noviembre a mayo), 260 mm (agosto a octubre) y 254 mm (noviembre a enero), confirmándose el nivel de probabilidad obtenida con el modelo de distribución gamma.

Para el caso de los años que se cultiva trigo, con una capacidad de almacenamiento de agua total comprendida entre 180 y 200 mm, en un espesor de 80 cm, las precipitaciones del período posterior libre de cultivo (verano) tienen una probabilidad del 80% de atravesarlo por flujo preferencial. Estas, se constituyen en una recarga con un riesgo potencial contaminante del agua subterránea zonal.

3.3. Balance de agua y efecto de los CC sobre la disponibilidad de agua en el suelo.

Las lluvias durante el período de crecimiento de los CC, en el año 2005, fueron inferiores a la capacidad de almacenamiento del suelo, mientras que en los años 2006 y 2007 superaron dicha capacidad, originando un exceso que favoreció el crecimiento de los CC y contribuir a las pérdidas de nutrientes por lixiviación durante el cultivo de maíz. En el año 2005, las pérdidas por escurrimiento fueron despreciables debido a una infiltración deficiente por tratarse de un suelo bajo SD, un año sin lluvias muy intensas y al hecho de no haberse encontrado impedimentos físicos subsuperficiales. Todo el movimiento de agua fue diario, los excesos de un día se pierden para el día siguiente. Se discriminaron consumos diferentes para los diferentes cultivos de cobertura.

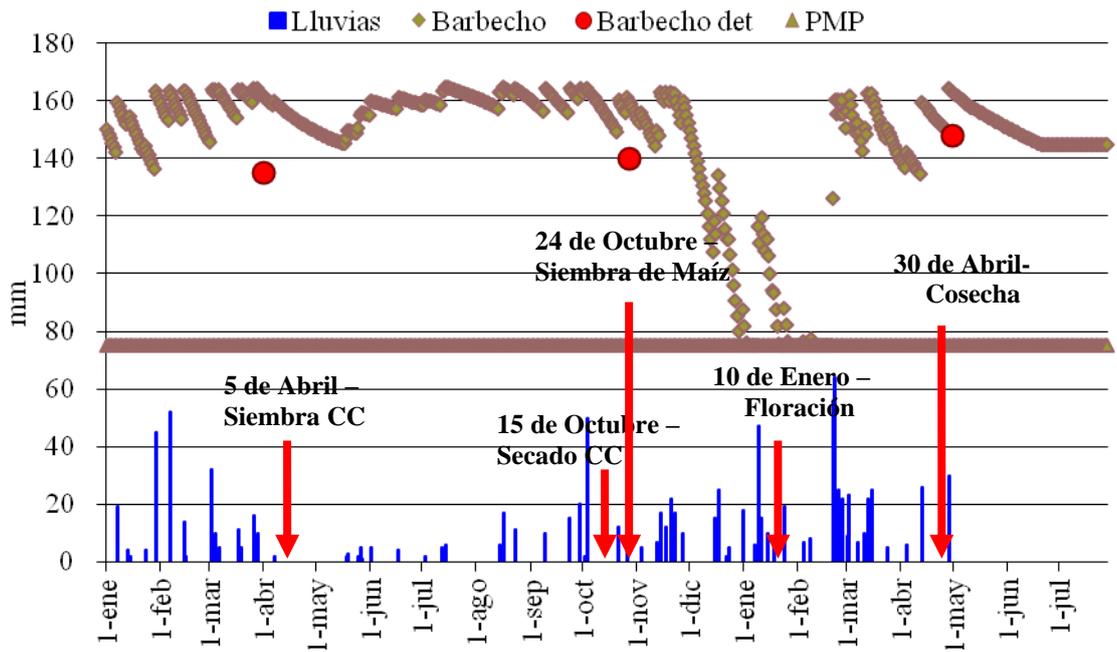
En la Figura 7 se puede observar la dinámica del agua en el suelo en la campaña 2005/06 (E_1), para el período de siembra del CC-Cosecha de maíz y para los distintos CC establecidos como antecesores. Se distinguen perfectamente, dos ciclos, el de izquierda, perteneciente al del CC de invierno hasta la interrupción del crecimiento con herbicida y el ciclo del cultivo de maíz, a la derecha. En el E_1 (2005/06), se observó como el testigo (barbecho) y el tratamiento vicia mantuvieron un nivel de agua útil en el perfil superior a los otros tratamientos; mientras que la avena, trébol y avena + vicia consumen parte del agua de reserva. En los (E_2) 2006/07, E_3 , E_4 y E_5 (2007/08) se obtuvieron resultados similares, dado que fueron años con precipitaciones próximas o superiores al promedio histórico para el período primavera-estival.

Los cultivos de cobertura, si bien consumieron parte del agua acumulada, no agotaron el perfil, quedando reservas de 70 al 80% del agua útil máxima, para el cultivo de maíz siguiente.

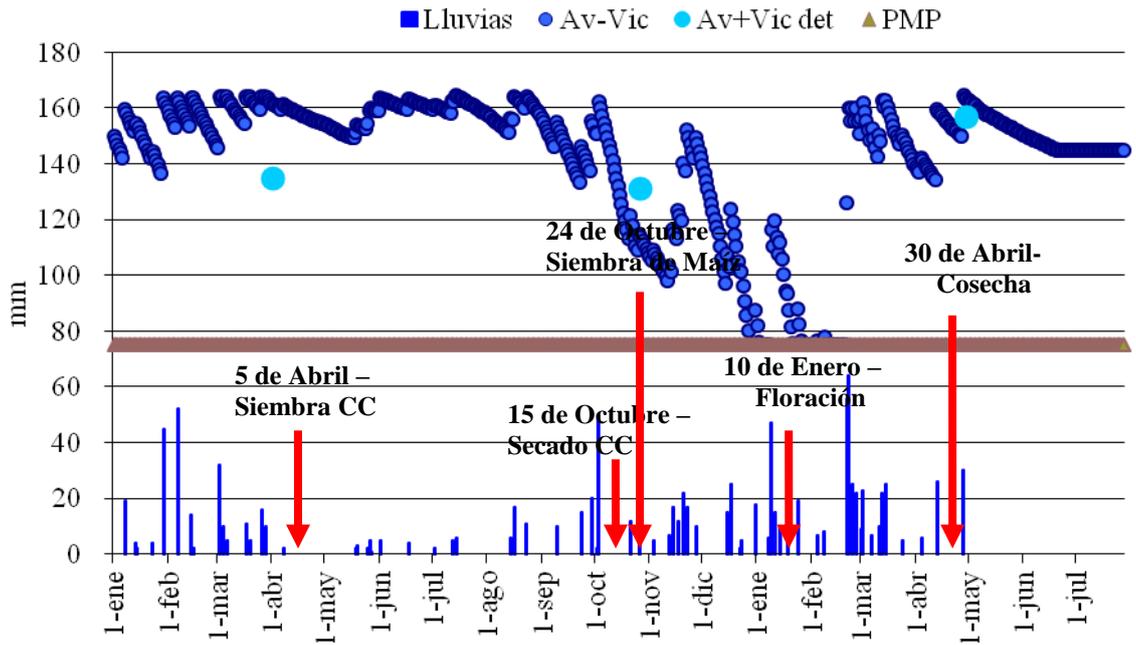
Durante el 1 de abril y el 30 de octubre del E₁ y durante el 1 de marzo y el 10 de noviembre de los E₂, E₃, E₄ y E₅ el suelo se mantuvo cercano a capacidad de campo en el tratamiento testigo (barbecho). En tanto, los tratamientos CC utilizaron agua, en especial en los 25 días previos a la aplicación del herbicida. En este momento, mientras el tratamiento barbecho tenía el 95% del agua útil almacenada, los CC, a excepción de la vicia en el segundo año, consumieron el 55%. Las lluvias ocurridas durante el período de barbecho químico permitieron recargar el perfil, habiéndose realizado la siembra de maíz con la misma reserva de agua en el suelo. Dos características parecen determinantes de los resultados: por un lado, la profundidad del perfil considerada y por otro, el régimen de lluvias de la estación. Para las condiciones de la región pampeana subhúmeda, es normal mantener el suelo cercano a capacidad de campo durante todo el invierno y la posibilidad de recargar el perfil a inicios de la primavera es alta (Sá Pereira *et al.*, 2008a), lo que permitiría implementar la hipótesis sin aumentar en forma excesiva el riesgo de no poder sembrar cultivos de verano a inicios de la estación de crecimiento con el perfil recargado de agua. Los porcentajes de AU durante el momento de floración (período crítico para el cultivo de maíz), fueron de: 50, 42, 38, 25 y 53 % respectivamente. Resultados similares a estos fueron obtenidos por Corsi, 1982 y Ernst, 2004 para las condiciones de Uruguay, donde es normal mantener el suelo cercano a capacidad de campo durante todo el invierno y la posibilidad de recarga del perfil a inicios de la primavera es alta.

Es importante destacar que los valores de humedad observados del modelo se ajustaron bastante bien con los calculados. Similares resultados fueron obtenidos por (Bodner *et al.*, 2007; Galantini *et al.*, 2007; Galantini & Landriscini, 2007; Muñoz-Carpena *et al.*, 2008; Baker & Griffis, 2009), trabajando con diferentes balances de agua y modelos de simulación.

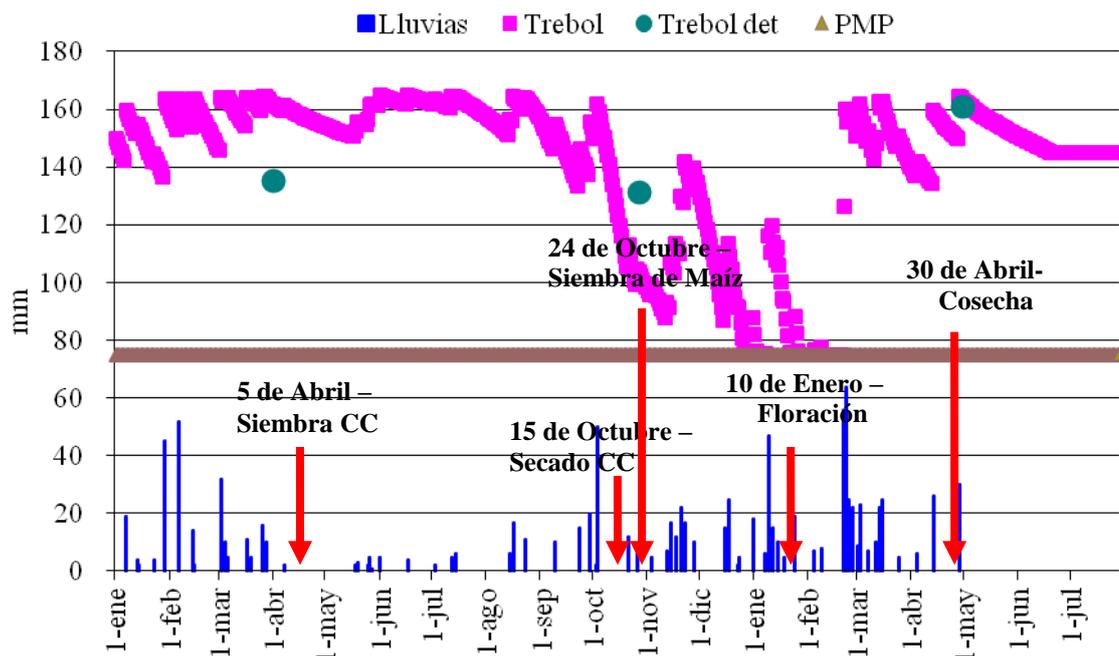
a.



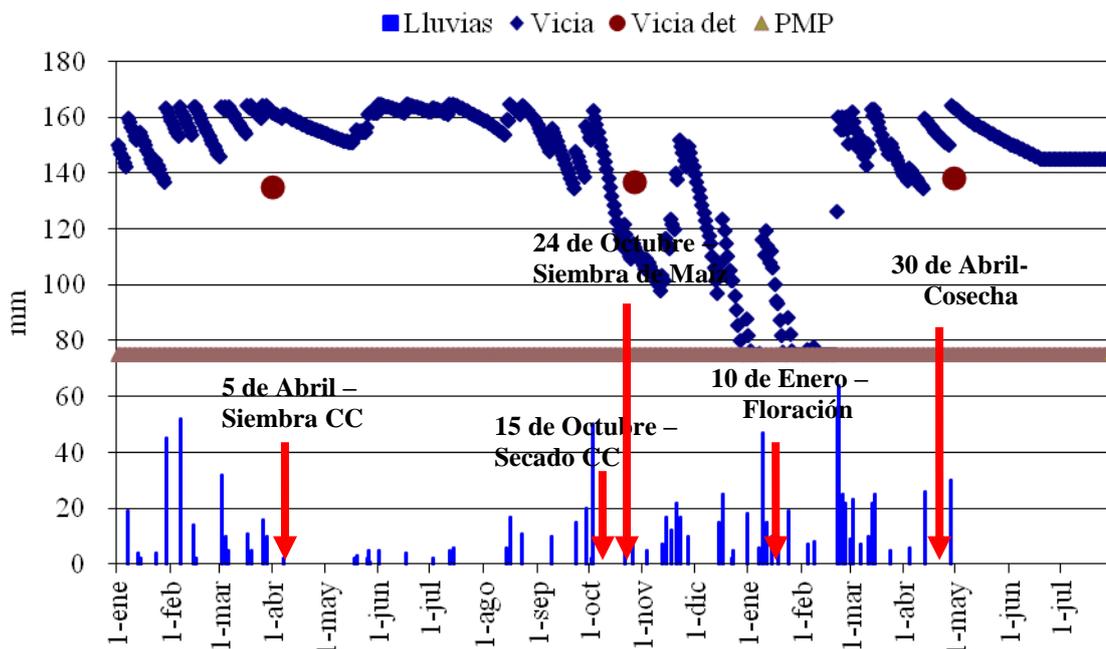
b.



c.



d.



e.

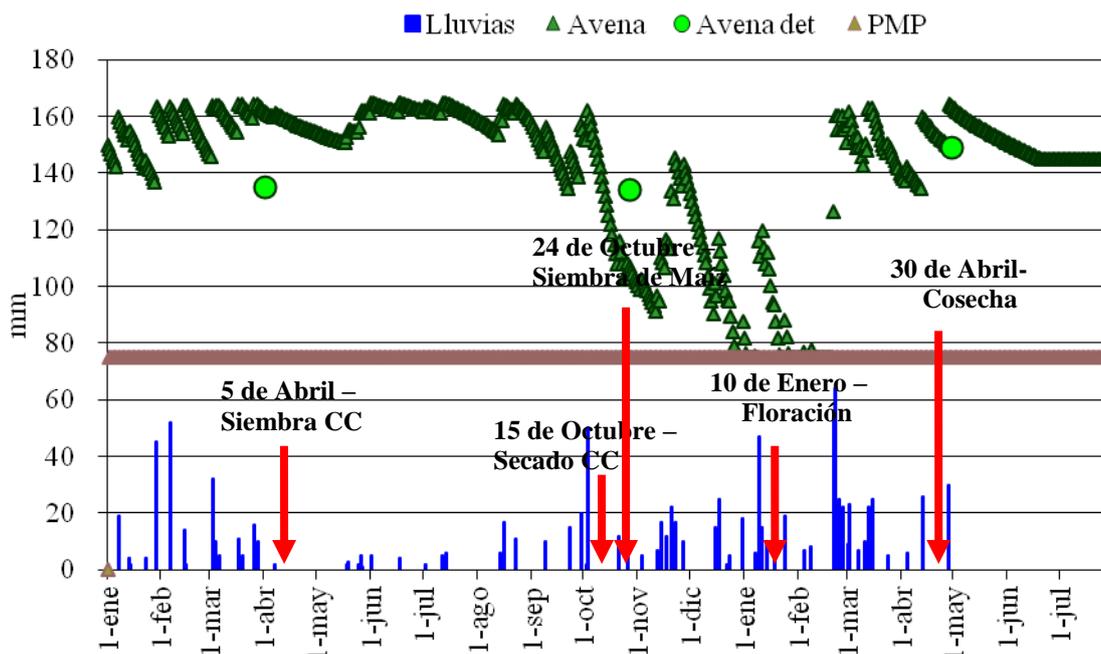


Figura 7. Dinámica del agua en el suelo y lluvia en (mm) durante el ciclo CC/maíz (valores diarios estimados y determinados al momento de la siembra de los CC, secado, siembra y cosecha de maíz). Ensayo 1 campaña 2005/06. (a) testigo, (b) avena + vicia, (c) trébol, (d) vicia, (e) avena.

Según Quiroga *et al.* (2009) para evaluar convenientemente la influencia de los CC sobre la disponibilidad de agua (costo hídrico en la generación de biomasa) resulta necesario considerar la capacidad de almacenaje de agua de los suelos. Este aspecto es particularmente importante, ya que define el período necesario para la recarga del perfil (fin del CC). Además, otro de los factores que incide es la fecha de siembra del cultivo sucesor, por ejemplo para la siembras de maíz (segunda quincena de octubre), los CC deberían finalizar la extracción de agua 30 a 45 días antes. Contrariamente, Amado *et al.* (2002) consideran la conveniencia de suprimir el crecimiento de los CC lo más próximo a la siembra del maíz en regiones más húmedas, atendiendo a una mejor sincronización entre oferta y demanda tanto de agua como de N.

Los resultados obtenidos en la campaña 2005/06 muestran que las diferencias en los contenidos finales de agua entre los testigos y los CC se ubicaron entre 3 y 14 mm (Figura 8). Por otro lado, cuando se comparó el agua total acumulada entre los CC y el testigo, y a una profundidad de 0-60 cm los CC presentaron entre 90 y 95% del contenido total de agua acumulada con respecto al testigo. En cuanto al AU disponible para este mismo año, medida en porcentaje, al momento del secado de los CC esta representó entre 64 y 72% con respecto al testigo (Figura 8). Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por Cordone & Hansen

(1986) y Quiroga *et al.* (2009), donde los CC no afectaron de modo significativo la disponibilidad de agua en el suelo al momento de la siembra del cultivo de maíz. Analizando la dotación hídrica en el suelo a diferentes profundidades tampoco se observaron diferencias en todos los cultivos de cobertura con respecto al testigo (Figura 9) en el año 2005/06. El uso consuntivo para los CC y testigo para este año fueron muy similares, observándose una pequeña diferencia de 7 mm a favor del testigo (Figura 10).

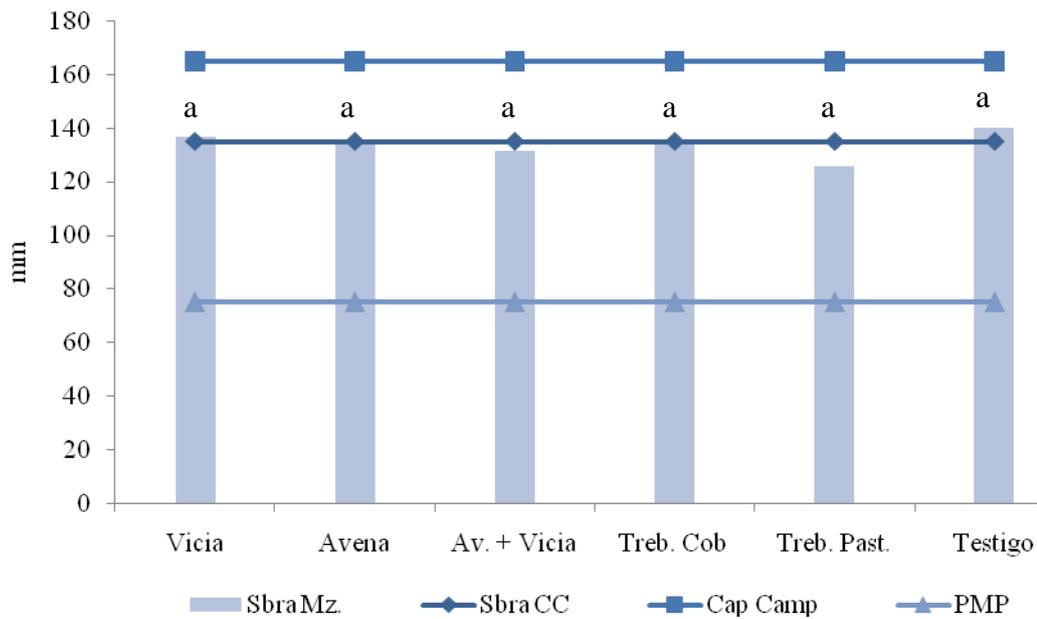


Figura 8. Efecto de los CC sobre el agua útil en el suelo a la fecha de siembra del maíz. Se indican los valores correspondientes a contenido de agua en el suelo en mm (0-60 cm) para los diferentes CC, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (PMP) como antecesores de maíz Campaña 2005/06 (E₁). Letras iguales indican que no existen diferencias significativas para $p \leq 0,05$.

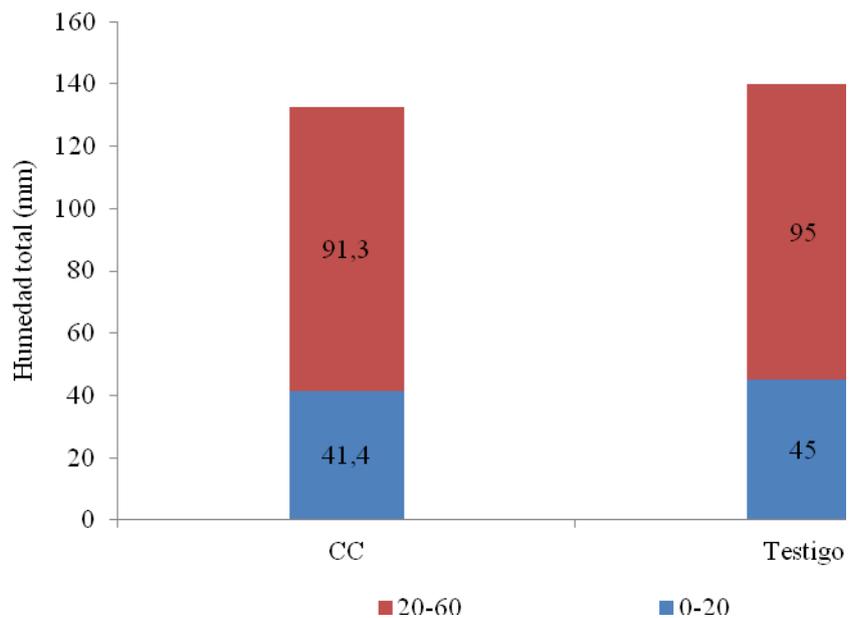


Figura 9. Contenido de agua total en el suelo al momento de la siembra del cultivo de maíz por profundidades (0-20) y (20-60). Promedio de los CC y el testigo. Campaña 2005/06 (E₁).

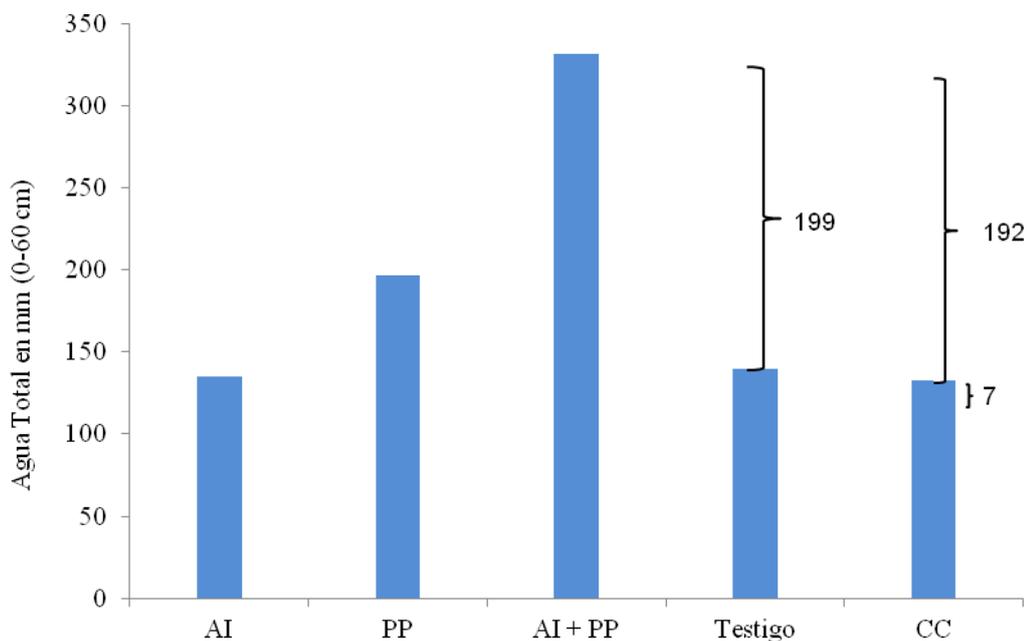


Figura 10. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC) y sin CC (Testigo), se indican las precipitaciones caídas durante el ciclo del maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Las barras finas verticales muestran el agua consumida en cada sistema. Campaña 2005/06 (E₁).

En la campaña 2006/07, el agua total en el suelo fue superior a la presente en la campaña 2005/06, debido a un aumento de las precipitaciones. En cuanto al porcentaje de agua disponible a la siembra de maíz con los diferentes CC fue de 70,6% frente a 62,4% en el testigo (Figura 12). Esto confirma los resultados obtenidos por Cordone & Hansen (1986). Sin embargo, los contenidos de agua total a la siembra en el ciclo 2005/06 para la misma fecha y los mismos antecesores, fueron levemente inferiores a los del ciclo 2006/07, debido a que las precipitaciones acumuladas fueron significativamente mayores.

Tal como se observó previamente, Sá Pereira *et al.* (2008a), reportaron que las precipitaciones de primavera resultaron suficientes para recargar el perfil del suelo en un 70% de su capacidad de almacenaje de agua útil para el cultivo posterior de maíz.

Si observamos la acumulación de agua en las diferentes profundidades evaluadas vemos que, con antecesor CC hubo una mayor captación de humedad al momento de la siembra de cultivo de maíz con respecto al testigo con barbecho largo. En las profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 y 60-80cm los CC estuvieron entre 5 y 57% por encima del testigo (Figura 11).

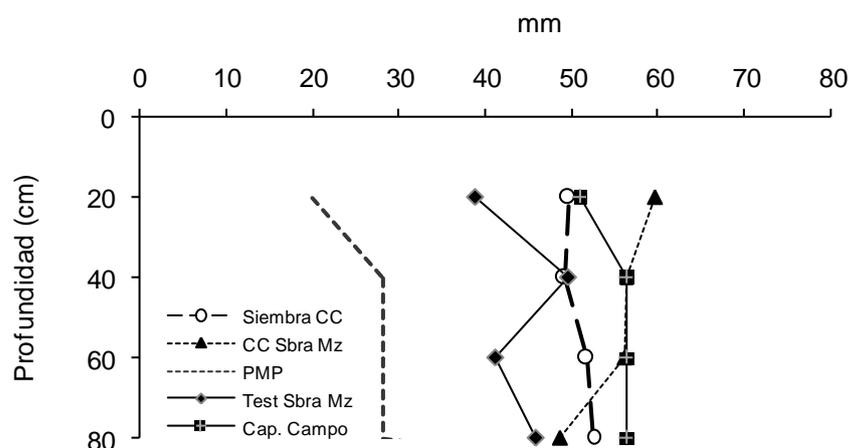


Figura 11. Contenido de agua del suelo a diferentes profundidades en mm (0-80 cm) para los diferentes CC y testigo, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (PMP) como antecesores de maíz para la campaña 2006/07 (E₂).

Los resultados obtenidos en las campañas 2005/06 (E₁) y 2006/07 (E₂), muy diferentes entre sí en cuanto a las precipitaciones acumuladas, muestran que las diferencias en los contenidos finales de agua entre el testigo y los CC variaron entre 5 y 15 mm. Los CC acumularon en promedio una lámina de agua mayor en superficie, valores similares en las capas intermedias y se aproximaron al testigo (barbecho) en la capa más profunda del suelo (Figura 11). Esto

indicaría que los CC no tienen un efecto negativo para el cultivo siguiente. No obstante, hay que considerar que las precipitaciones durante el período evaluado fueron de 197 y 452 mm, para los años 2005 y 2006 respectivamente, las que sumadas al contenido inicial de agua (135 y 203 mm) dan una lámina total de 332 y 655 mm. Es evidente que la mayor parte del agua no pudo ser almacenada en los primeros 60 y 80 cm del perfil en los años 2005 y 2006, respectivamente. De esta manera, se comprueba que el tratamiento testigo finalizó con 140 mm de los 332 mm caídos en el año 2005 y de 175 mm de los 655 mm que potencialmente podría haber almacenado (Figura 12). Es decir, que 192 y 470 mm excedieron la capacidad de almacenamiento en el perfil. Por lo tanto, de los 199,3 mm de uso consuntivo de los CC, 192 mm deben ser descontados y, consecuentemente, el costo hídrico para el cultivo de verano siguiente resultaría de 7,3 mm para la campaña 2005/06. En el ciclo 2006/07 de los 470 mm de uso consuntivo de los CC, 480 mm deben ser descontados y, en consecuencia, no solo que no existió ningún costo hídrico para el cultivo de maíz, sino que los CC acumularon 10 mm más de agua en el perfil de suelo con respecto al tratamiento sin CC (Figura 12).

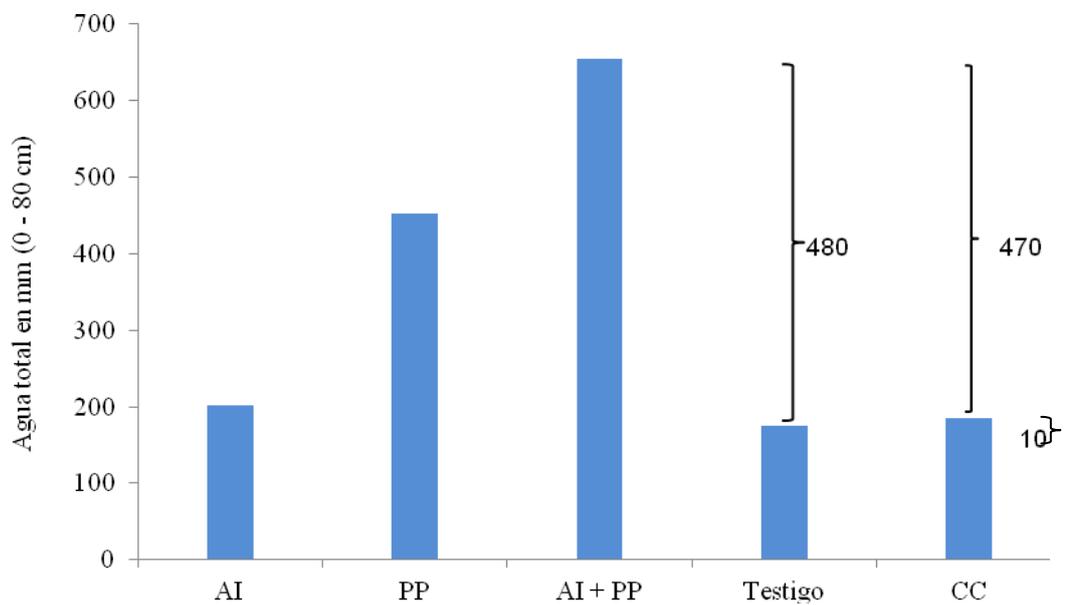


Figura 12. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC) y sin CC (Testigo), se muestran las precipitaciones caídas durante el ciclo del maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Las barras finas verticales muestran el agua consumida en cada sistema. Campaña 2006/07 (E₂).

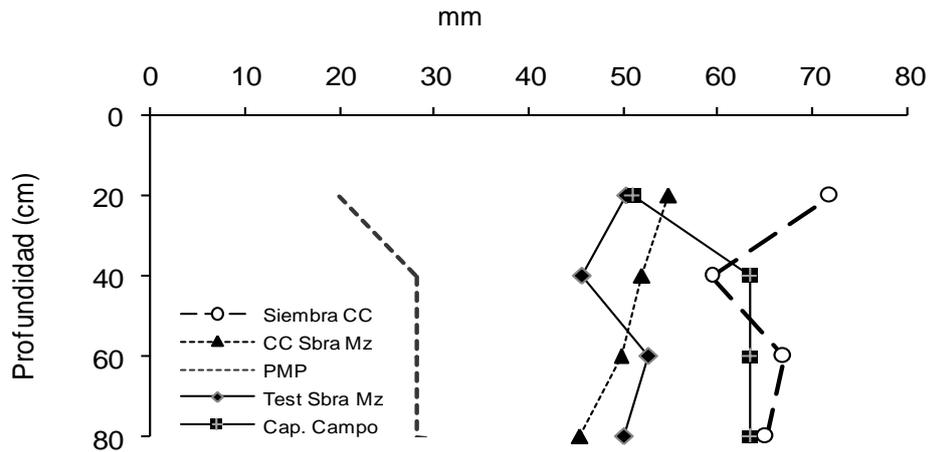


Figura 13. Contenido de agua del suelo a diferentes profundidades en mm (0-80 cm) para los diferentes CC y testigo, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (PMP) como antecesores de maíz para la campaña 2007/08 (E₃).

Cuando se analizó la campaña 2007/08 (E₃), se expresan las diferencias en los contenidos finales de agua entre los testigos y los CC. En promedio, variaron entre 6 y 12 mm. Para todos los CC y en las capas sub-superficiales, se observó una mayor disponibilidad de agua que en profundidad, cuando se comparó con el testigo (barbecho) (Figura 13). Nuevamente, en esta campaña 2007/08 (E₃) se confirman los resultados obtenidos en los años anteriores de este estudio. Sin embargo, si se considera que las precipitaciones durante el período evaluado fueron de 565 mm, para el E₃, las que sumadas al contenido inicial de agua (263 mm) dan una lámina total de 828 mm, es evidente que la mayor parte de la misma no pudo ser almacenada en los primeros 80 cm del perfil. De esta manera, se comprueba que el tratamiento testigo finalizó con 198 mm de los 828 mm en el ciclo 2007/08 (E₃) que potencialmente podría haber almacenado (Figura 14). Es decir que 630 mm no fueron almacenados en el perfil. Por lo tanto, de los 626 mm de uso consuntivo de los CC, 629 mm deben ser descontados y, en consecuencia no existió costo hídrico alguno para el cultivo de maíz siguiente, aportando los CC, 2 mm más que el testigo. (E₃) (Figura 14).

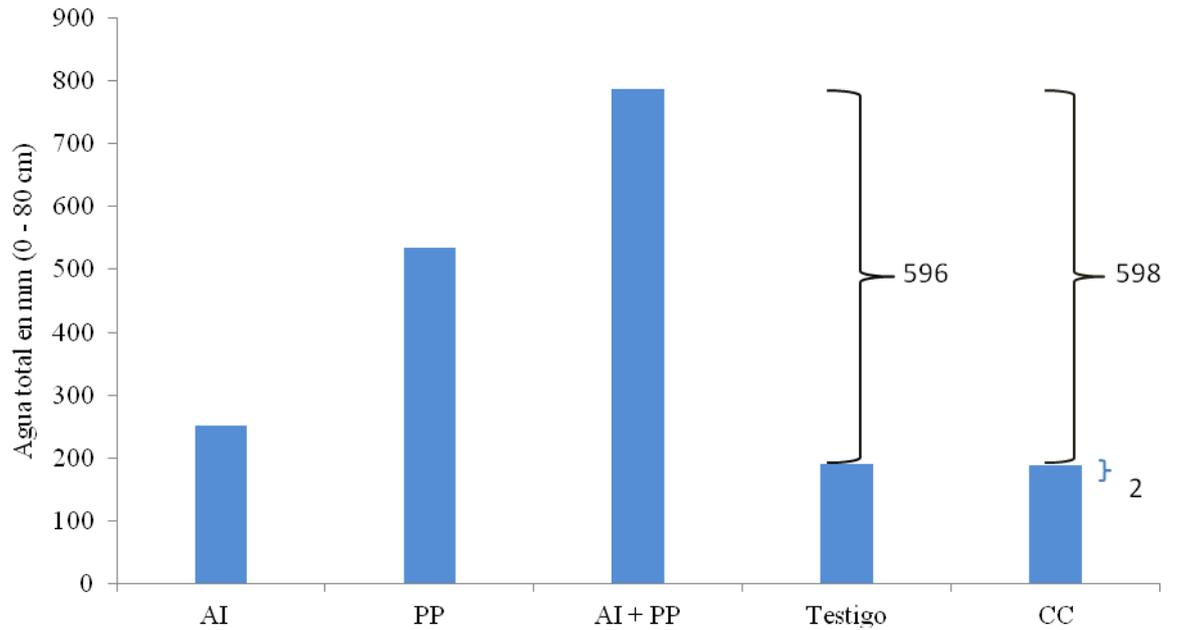


Figura 14. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC) y sin CC (Testigo), se muestran las precipitaciones caídas durante el ciclo del maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Las barras finas verticales muestran el agua consumida en cada sistema. Campaña 2007/08 (E₃).

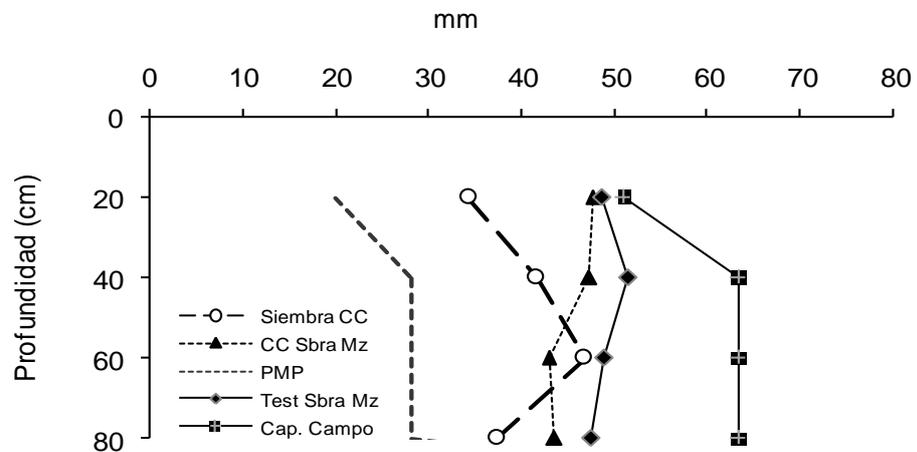


Figura 15. Contenido de agua del suelo a diferentes profundidades en mm (0-80 cm) para los diferentes CC y testigo, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (PMP) como antecesores de maíz para la campaña 2007/08 (E₄).

En el E₄ y para el mismo año se mostró que las diferencias en los contenidos finales de agua entre los testigos y los CC variaron entre 6 y 31 mm. En promedio de todos los CC y en profundidad se observó una menor acumulación de agua que en el testigo (barbecho) a la

siembra del maíz (Figura 15). En el año 2007 (E₄), si se considera que las precipitaciones durante el período evaluado fueron de 627 mm para el E₄, las que sumadas al contenido inicial de agua (160 mm) dan una lámina total de 787 mm, nuevamente se confirma que la mayor parte de la misma no puede ser almacenada en los primeros 80 cm del perfil para la campaña 2007/08 (E₄).

De esta manera se comprueba que el tratamiento testigo finalizó con 196 mm de los 787 mm en el año 2007 (E₄) que potencialmente podría haber almacenado. Es decir que 581 mm no fueron almacenados en el perfil. Por lo tanto, de los 581 mm de uso consuntivo de los CC, 607 mm deben ser descontados y, consecuentemente, el costo hídrico para el cultivo de maíz siguiente resultaría de 12 mm para la campaña 2007/08 (E₄) (Figura 16).

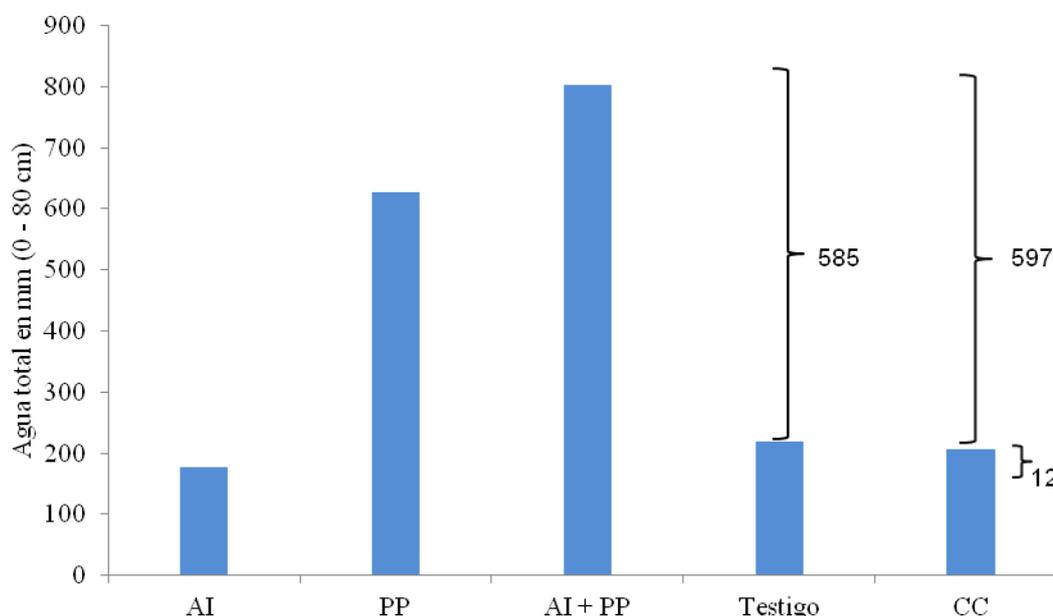


Figura 16. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC) y sin CC (Testigo), se muestran las precipitaciones caídas durante el ciclo del maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Las barras finas verticales muestran el agua consumida en cada sistema. Campaña 2007/08 (E₄).

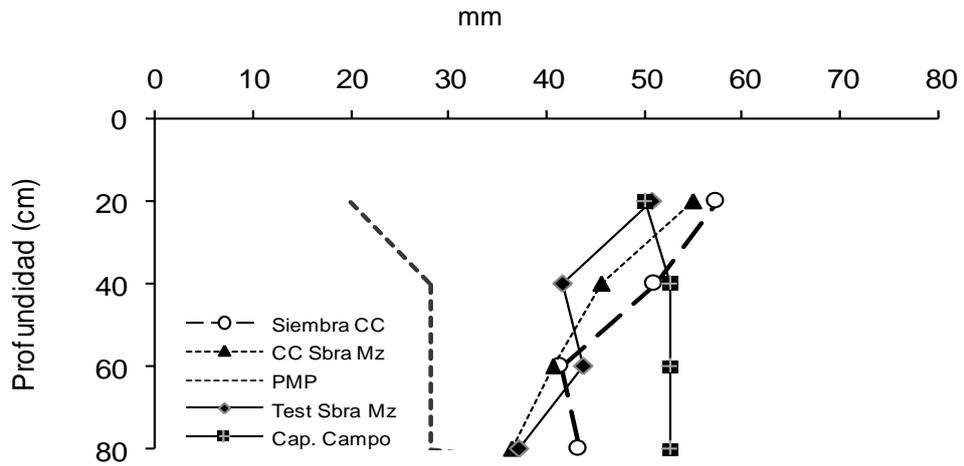


Figura 17. Contenido de agua del suelo a diferentes profundidades en mm (0-80 cm) para los diferentes CC y testigo, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (PMP) como antecesores de maíz para la campaña 2007/08 (E₅).

En el E₅, y para el mismo año, se mostró que las diferencias en los contenidos finales de agua entre los testigos y los cultivos de cobertura variaron entre 2 y 9 mm. Los CC en promedio acumularon mayor contenido de agua que el testigo (barbecho) en las capas superficiales y sub-superficiales del perfil. Valores similares fueron alcanzados por el testigo (barbecho) en profundidad (Figura 17). En la campaña 2007/08 (E₅), las precipitaciones durante el período evaluado fueron de 588,5 mm, las que sumadas al contenido inicial de agua (193 mm) dan una lámina total de 781,5 mm. Nuevamente, se confirma que la mayor parte de la misma no puede ser almacenada en los primeros 80 cm del perfil para el año 2007 (E₅). De esta manera, se comprueba que el tratamiento testigo finalizó con 173 mm de los 781,5 mm en el ciclo 2007/08 (E₅) que potencialmente podría haber almacenado. Es decir que 588,5 mm no fueron almacenados en el perfil. Por lo tanto, de los 605 mm de uso consuntivo (UC) de los CC, 608.5 mm deben ser descontados y, consecuentemente, no existió costo hídrico para el cultivo de maíz siguiente, aportando los CC, 4 mm más que el testigo para la campaña 2007/08 (E₅) (Figura 18).

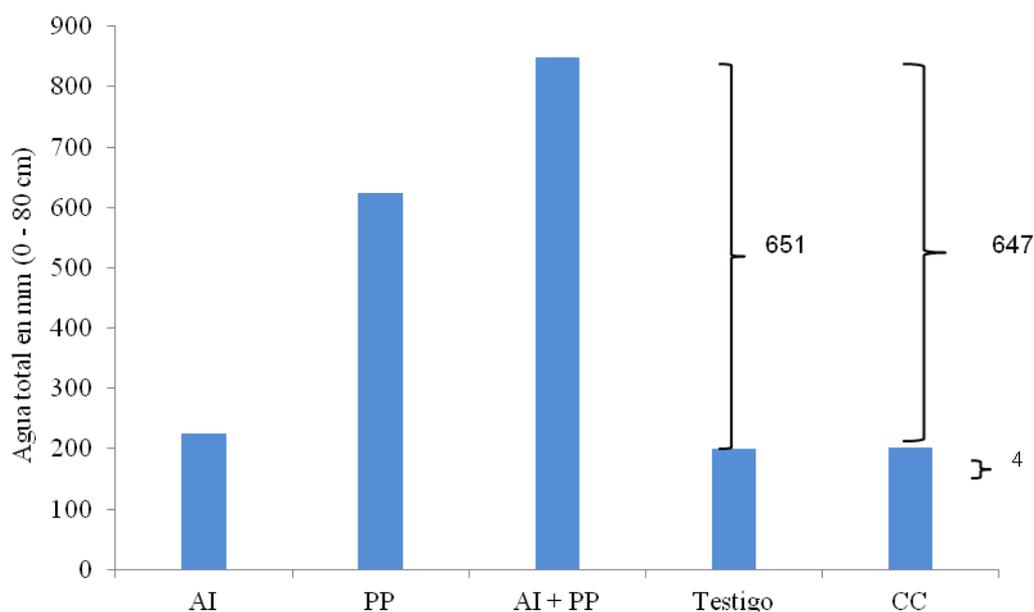


Figura 18. Contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del maíz (AI) y al final del ciclo con cultivo de cobertura (CC), y sin CC (Testigo) se muestran las precipitaciones caídas durante el ciclo del maíz (PP) y la disponibilidad total de agua para el cultivo (AI + PP). Las barras finas verticales muestran el agua consumida en cada sistema. Campaña 2007/08 (E₅).

En Tabla 2 se muestra la eficiencia de uso del agua (EUA) para cada CC y para cada año y sitio de ensayo. La EUA de las precipitaciones fue en orden decreciente mayor para la avena S/Fert.>avena+vicia>vicia>trébol en los años 2005 y 2006. En el año 2007, los valores medios fueron más bajos en la mayoría de los CC evaluados, debido a las mayores precipitaciones registradas entre la siembra de los CC y su momento de secado. Estos resultados son similares a los obtenidos por Quiroga *et al.* (2009) en la región subhúmeda pampeana.

Tabla 2. Eficiencia en el uso del agua (EUA) para cada CC, año y sitio de ensayo medidas en Kg MS mm⁻¹ de precipitación.

EUA kg MS mm ⁻¹	Vicia	Av. S/Fert.	Av Fert.	Trébol	Av + V
2005 (E ₁)	6,7	17,7	s/d	2,9	10,9
2006 (E ₂)	6,8	13,6	s/d	3,3	11,2
2007 (E ₃)	5,2	3,1	5,5	s/d	4,3
2007 (E ₄)	2,8	2,0	3,0	1,9	s/d
2007 (E ₅)	4,5	3,7	6,0	s/d	s/d

Avena sin fertilizar (Av S/ Fert.); avena fertilizada (Av. Fert.); avena + vicia (Av. + V) y sin determinación (s/d).

4. CONCLUSIONES

- En cuanto al balance de agua, no fue relevante el consumo de agua de los CC.
- El suelo con CC fue más eficiente en captar el agua de lluvia, por lo que no existieron diferencias en la disponibilidad de agua en relación al testigo (barbecho) al momento de la siembra del maíz.
- Teniendo en cuenta las precipitaciones acumuladas entre los meses de agosto y octubre y entre noviembre y enero, se puede concluir que para la región de Coronel Suárez se presentó un 80% de probabilidad de exceso de precipitaciones con respecto a la media histórica, que permitieron durante los tres años en estudio, una recarga del perfil del suelo y extender el crecimiento de los CC hasta muy próximo a la siembra del cultivo de verano.

CAPITULO III

CULTIVOS DE COBERTURA DE OTOÑO-INVIERNO - MAÍZ Y SUS EFECTOS EN LA PRODUCTIVIDAD, ACUMULACIÓN DE N Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la SD presentó una fuerte expansión en la pampa húmeda templada Argentina. Junto con ello, se ha despertado el interés por los CC en los productores que llevan adelante este sistema de siembra. En la actualidad hay diversas experiencias de productores que por sus resultados, abren un camino alentador para “consolidar” la posibilidad de tener un cultivo antecesor a un maíz, bajando la demanda de nitrógeno por fertilizantes. Es también, una manera de bajar costos y reducir los riesgos ambientales. Los CC de leguminosas pueden ser una respuesta a la necesidad de buscar fuentes nitrogenadas diferentes de las dependientes del petróleo; una opción para ello es el cultivo de vicia. De esta forma, se puede disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados, donde la demanda elevada de N por parte del maíz y su alto costo son factores que influyen sobre la rentabilidad. (Lorenzatti, 2008; Ruffo, 2003).

La utilización de CC como antecesores de maíz tiene un costo adicional debido a que se debe realizar una siembra extra a la del cultivo principal. En análisis económicos realizados por Bojanich *et al.* (2010) en un Argiudol típico, se concluyó que el cultivo de maíz sembrado sobre antecesor vicia presenta mayores rendimientos con respecto a un maíz sembrado sobre rastrojo sin adición de fertilizantes, por lo que el costo de la siembra de vicia se amortiza. El costo del cultivo de maíz con antecesor vicia sin fertilizar fue un 26% menor del obtenido con antecesor barbecho largo fertilizado, incluyendo en ambos casos el costo del balance de los nutrientes. Paralelamente a estos estudios, Baigorria & Cazorla (2009) y Restovich *et al.*, (2012) investigando sobre un Argiudol típico (Clase I) concluyeron que, el antecesor vicia como CC del maíz sin fertilizar superó al antecesor barbecho (testigo) en un 20%.

La utilización de CC en sustitución a los fertilizantes nitrogenados es importante para la recuperación de la calidad ambiental, dado que la producción industrial de nitrógeno consume gran cantidad de energía, la que se obtiene a partir de la quema de combustibles fósiles (Da Silva, 2004).

Algunos resultados obtenidos en el sur de Brasil, EEUU y Argentina indican que la vicia, con su capacidad para fijar biológicamente el N_2 atmosférico y la elevada tasa de descomposición de sus residuos, es capaz de proporcionar cantidades significativas de N al maíz en sucesión, proporcionando en algunos casos una producción de granos equivalente a una fertilización nitrogenada (Heinrichs *et al.*, 2001; Aita *et al.*, 2001; Miguenz & Bollero, 2005; Baigorria & Cazorla, 2009; Restovich *et al.*, 2012). En el caso de las gramíneas, como la avena, por acumular menor cantidad de N en la biomasa aérea y liberarlo lentamente después del momento de secado, puede afectar el abastecimiento de N y la producción de granos de maíz (Aita *et al.*, 2001; Restovich *et al.*, 2012).

En la región Sur de Brasil hay numerosos trabajos relacionados con la influencia de los CC sobre la productividad de maíz en SD (Bortolini *et al.*, 2000; Heinrichs *et al.*, 2001; Aita *et al.*, 2001; Amado *et al.*, 2002; Da Silva *et al.*, 2007; Acosta, 2009). Amado *et al.* (1998), al trabajar con rotaciones de cultivos sobre residuos de vicia, en Hapludalf, reportaron un incremento de 82% en la productividad de maíz en relación al sistema avena/maíz, en tanto que Andrada (2000) encontraron una diferencia de productividad en torno de $2,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ en favor de la sucesión vicia/maíz, cuando se comparó con la sucesión avena/maíz y barbecho/maíz. En promedio, en los dos primeros años de estudio, fue necesario aplicar 150 kg ha^{-1} de N en el maíz en sucesión a la avena para alcanzar la producción de granos obtenida con 60 kg ha^{-1} de N en la sucesión vicia/maíz. Por otro lado, en una amplia revisión bibliográfica realizada por Smith *et al.* (1987) y Ernst (2004), encontraron que existen tres tipos de respuestas a la aplicación de N de los cultivos de cosecha en función de la existencia o no de un CC (Figura 19): En el caso “A”, la diferencia de rendimientos es corregida por el agregado de fertilizante nitrogenado, existiendo respuesta positiva a la presencia del CC sólo en condiciones de baja disponibilidad de nutrientes por el suelo (factor limitante) (Hargrove, 1986; Torres & del Pino, 1995). En el caso “B”, las curvas de respuesta son paralelas, lo que indica que existe un beneficio adicional del CC. Este tipo de respuesta es observada en algunos años, por lo que se asocia a mayor disponibilidad de agua, cambios en la temperatura del suelo y sanidad de los cultivos (Touchton *et al.*, 1984; Calegari & Peñalva, 1994). En el caso “C”, el rendimiento sobre el CC es menor que después de barbecho cuando el nitrógeno no es limitante. Este tipo de respuesta cuando el agua no fue limitante, ha estado asociado a fallas en implantación y crecimiento del cultivo, que en la mayoría de los casos no se logra demostrar y se explica por la existencia de alelopatías (Magie *et al.*, 1967; Brown *et al.*, 1985). Efectos similares fueron también encontrados por Worsham (1986, 1991) y Torbert *et al.* (1996) trabajando con tréboles.

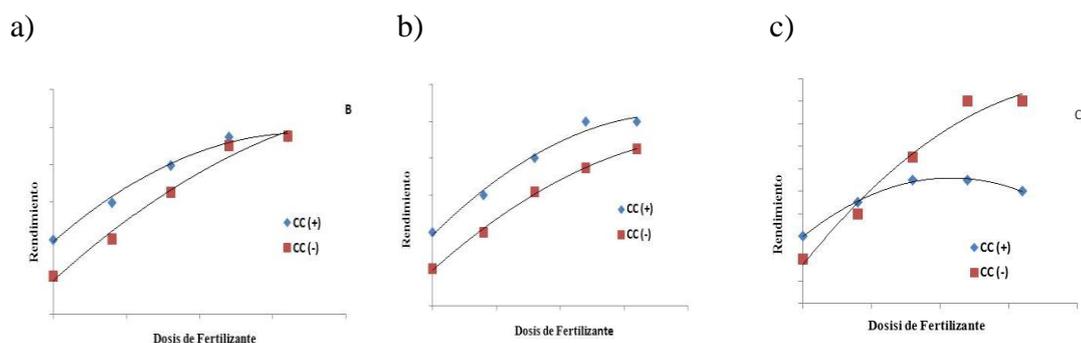


Figura 19. Curvas teóricas de respuesta al agregado de N en los cultivos de verano sembrados sobre una leguminosa invernal (+) o sobre barbecho (-). Adaptado de Smith (1987).

Estos trabajos evidencian los efectos positivos de la vicia sobre la producción de granos de maíz y demuestran que es posible recomendar la utilización de esta leguminosa como fuente de N para este cultivo. Entre tanto, la producción de esta leguminosa es variable e influenciada por las condiciones climáticas, edáficas y fitosanitarias (Calegari *et al.*, 1993). Das Ros & Aita (1996) verificaron que el rendimiento de maíz sembrado después de vicia común no respondió a la fertilización nitrogenada en cobertura total. Según Aita & Giacomini (2003), trabajando en Hapludalf, concluyeron que el cultivo de vicia pura libera la mayor parte del N durante los primeros quince días de descomposición de sus residuos. Bortolini *et al.* (2000) comprobaron que con el incremento en el nivel de fertilización nitrogenada aumentó linealmente la producción de maíz, cuando fue cultivado en sucesión a avena sola o asociada con vicia. Por otro lado, cuando el maíz fue cultivado en sucesión a vicia pura, no obtuvieron respuesta en el rendimiento de maíz a la fertilización nitrogenada. Das Ros & Aita (1996) también verificaron que el rendimiento del maíz sobre un CC de vicia no respondió a la fertilización nitrogenada.

Coelho & França (2003) citan que por cada tonelada de grano de maíz producida son necesarios en torno a 20 kg de N. Karlen *et al.* (1998) y Da Silva (2004) concluyeron que alrededor del 50% del N mineral aplicado se pierde por lixiviación o volatilización. En consecuencia es importante buscar nuevas alternativas de abastecimiento de este nutriente como una forma de reducir costos y dar seguridad al ambiente. Los fertilizantes nitrogenados son los más utilizados en el cultivo del maíz en la Argentina, debido a su elevada exigencia y a las mayores pérdidas producidas.

La utilización de plantas con la capacidad de fijación simbiótica de nitrógeno y/o reciclado de este nutriente, como la vicia y el trébol, son una estrategia que ha demostrado grandes ventajas. El nitrógeno mantenido en la forma orgánica es menos propenso a pérdidas por

lixiviación, volatilización o desnitrificación, ya que es puesto a disposición lentamente, de acuerdo con la mineralización de los residuos vegetales.

La sola utilización de CC previo al maíz no garantiza productividades satisfactorias, pues el N proporcionado de esta manera no siempre es suficiente. A través del efecto positivo de la interacción entre fertilizantes y CC es posible obtener rendimientos mayores que con el empleo de cada uno de ellos por separado (Derpsch *et al.*, 1991). Los CC en sistemas de rotación y sus efectos sobre el N en la producción de cultivos y calidad de ambientes fueron investigados recientemente por Henry (2011).

Por este motivo, en áreas donde la SD tiene menos de cuatro años (fase de implantación), se recomienda aumentar el aporte de N a la siembra del maíz, buscando compensar parte del efecto negativo del aporte de residuos de CC de alta relación C:N (Sá, 1996). Según este autor, después de esta fase inicial de alta inmovilización de N y, por lo tanto, de menor disponibilidad para las plantas, se inicia lentamente el restablecimiento del equilibrio entre inmovilización y mineralización, a medida que los aportes de residuos de CC proporcionan una acumulación de N orgánico en la capa superficial del suelo. Una vez alcanzado un nuevo equilibrio de formación y de descomposición de MO, las demandas bajo SD se tornan menores.

Giacomini (2001), trabajando en Hapludalf, manifestó que la relación entre la cantidad de carbono soluble en agua (Csa) adicionado al suelo por los residuos de CC y las pérdidas de N vía desnitrificación son aspectos que deberían ser mejor estudiados. Este carbono fácilmente oxidable favorecerá el consumo de oxígeno (O₂) por los microorganismos, pudiendo provocar la presencia en el suelo de micrositios de anaerobiosis. En este ambiente, algunas bacterias pueden utilizar facultativamente, el N-NO₃⁻ en lugar de O₂ como receptor de electrones, reduciéndolo a N₂ y/o NO₂⁻. Además, la disponibilidad de C, la humedad elevada y la compactación del suelo también contribuyen en la disminución de la disponibilidad de O₂. En consecuencia, aumentan el potencial de desnitrificación. Según expresa este autor, estas condiciones parecen estar más fácilmente presentes bajo SD que bajo sistema de labranza convencional (LC). Doran (1980) demostró que el número de bacterias desnitrificadoras en suelos sometidos a SD fueron significativamente mayores que en LC. También, resaltó que la cantidad de Csa dependerá, no solo de su concentración en los residuos de cultivos, sino también, de la cantidad de MS aportada al suelo por los CC. Giacomini (2001) en sus estudios realizados en el sur de Brasil también determinó, que la cantidad de Csa varió de 219,0 a 383,4 kg ha⁻¹, lo que sería suficiente para aumentar el potencial de pérdida de N vía desnitrificación.

Acosta (2009) concluyó que el uso de N del fertilizante redujo la recuperación del N naturalmente aportado por la vicia. De esta manera, cuanto mayor es la cantidad de residuos de

vicia aportado al suelo menor fue la absorción por el maíz del N proveniente del fertilizante. Acosta *et al.* (2011), trabajando en un Paleudalf, concluyeron que la recuperación máxima de N de vicia por el maíz fue en media del 12,3% y que el 72,4 % del N acumulado (130 kg ha⁻¹ anual) en la biomasa aérea de vicia tuvo su origen en la fijación biológica de N.

La estrategia de utilizar elevados aportes de residuos al suelo, asociados al sistema de SD, representa la base de una agricultura que valoriza los procesos biológicos, considerándolos como componentes esenciales para alcanzar la sustentabilidad en el agroecosistema (Acosta, 2009). Este autor constató la necesidad de investigar la influencia de la cantidad y calidad de los residuos, cuando son combinados con la aplicación de N de fertilizante, sobre la eficiencia de la fertilización nitrogenada en la productividad de maíz.

1.1. Hipótesis

Los cultivos de cobertura, dependiendo de la especie y la MS producida modifican la productividad y la eficiencia de acumulación de N, afectando al maíz posteriormente implantado.

1.2. Objetivo

En base a lo expuesto, los objetivos de este trabajo fueron evaluar la formación de rendimiento, sus componentes y la acumulación de N en el cultivo de maíz, utilizando diferentes CC y dosis de N como antecesores de maíz bajo un sistema de SD.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Características del área bajo estudio (Ver cap II)

2.2. Cultivos de cobertura (ver cap. II)

2.3. Cultivo de maíz

Con posterioridad al secado de los CC se procedió a realizar la siembra de maíz, sobre los residuos de CC en SD, aproximadamente a los 7 días posteriores a su eliminación, utilizando sembradora VHB con doble disco y disco barre rastrojo. La distancia entre surcos fue de 0,7 m, obteniéndose una población final de 67.000 plantas ha⁻¹ promedio en los tres años.

A la siembra en cada año se aplicó 70 kg de FDA ha⁻¹. En los sitios de ensayos (E₂ a E₅) se sembró el híbrido LT 619 RR2 a excepción del (S₁) en que se utilizó el AX 882. Las fechas de siembra fueron: (E₁) 27/10/05, (E₂) 23/10/06, (E₃) 05/11/07, (E₄) 10/11/07, (E₅) 09/11/07. En todos los casos se aplicó glifosato antes y después de la siembra con una dosis de 4 L ha⁻¹, con excepción del año 2005 en que se realizó una aplicación en barbecho químico de (Glifosato 4 L ha⁻¹ + Acetoclor 1,5 L ha⁻¹ + Atrazina 4 L ha⁻¹ + 500 cc de 2,4D ha⁻¹). En todos los sitios de ensayo los tratamientos de las parcelas principales fueron constituidos por los CC como antecesores de maíz y dentro de estas se diseñaron las subparcelas de dosis de fertilización. En las subparcelas (5 x 6) los tratamientos consistieron en una fertilización entre V4 a V6, durante las campañas 2005/06 y 2006/07 en el cultivo de maíz de dosis crecientes de nitrógeno al voleo (0, 40, 80, 120 y 160 kg ha⁻¹). La campaña 2007/08 se analizó por separado ya que se utilizó una única dosis de N (80 N) entre V4 y V6. Como fuente de N se utilizó urea (46%).

2.4. Muestreos de plantas de maíz

En los muestreos realizados a cosecha se determinaron los rendimientos de materia seca total (MST) y de grano, los parámetros de rendimiento, número de plantas; peso de 1000 granos, número de granos e índice de cosecha (IC) (kg de grano producido/kg de materia seca total aérea). Se corrigió el peso de los granos a una humedad de cosecha de 14,5%. La producción de granos de maíz fue siempre evaluada, cosechando los dos surcos centrales de cada parcela de 2 m de largo. A cosecha en las campañas 2005/06 y 2006/07 se determinaron los contenidos de N en planta y grano. En la campaña 2007/08 se determinó el contenido de N

total en los estados fenológicos de R3 (grano lechoso), R5 (grano dentado) y cosecha en los tres sitios de ensayos. Las determinaciones en esta campaña fueron realizadas en hoja, tallo, espiga y grano por separado.

2.5. Análisis estadístico

El diseño base de los ensayos fue de parcelas divididas en bloques completos al azar, con tres repeticiones y en sub-parcelas de 30 m². Los tratamientos quedaron definidos como combinaciones de niveles de un primer factor (antecesores) en parcelas principales y niveles de un segundo factor (fertilización) en subparcelas. El tercer factor (ensayo) también fue tenido en cuenta para este análisis. Con el objeto de evaluar globalmente los factores cultivos de cobertura y fertilización y sus efectos sobre los parámetros de rendimiento y componentes de rendimiento del maíz, se realizaron análisis de la varianza (ANOVA) para el diseño en parcela dividida. Cuando se detectó interacción significativa o el nivel de significancia, no superó el 10%, se compararon las medias de las combinaciones de ambos factores. En caso contrario, se compararon los promedios marginales de cada factor por separado. En todos los casos, las comparaciones de medias se realizaron mediante la prueba de diferencia media significativa de Fisher (DMS) con $p < 0,05$. El procesamiento se realizó mediante el software InfoStat Profesional^R (Di Rienzo *et al.*, 2008).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Cultivos de cobertura: vicia y avena

3.1.1. Efecto del antecesor y la fertilización en el maíz

Los resultados del análisis estadístico incluyendo los tres factores, antecesor, fertilización y ensayo, no presentaron interacción significativa para las variables relacionadas con el rendimiento y sus parámetros (Tabla 3). Sin embargo, se encontraron interacciones significativas entre pares de factores. La interacción bifactorial entre antecesor * ensayo fue altamente significativa para el rendimiento en grano y MS total, mientras que las interacciones bifactoriales restantes fueron significativas para rendimiento en grano, en MS total y P_{1000} . Esto resultó, en parte, como consecuencia de la variabilidad en los diferentes ensayos, los que representan ambientes distintos.

El análisis estadístico puso de manifiesto la variabilidad encontrada entre los diferentes ensayos. Existió un efecto significativo del antecesor y de la fertilización, que fue diferente en los ensayos, influyendo positiva o negativamente en diferentes momentos del ciclo del maíz y reflejándose en el parámetro de rendimiento que se expresa en ese momento. Por este motivo, el análisis de los resultados se realizó por ensayo (con diferencias altamente significativas en la mayoría de las variables analizadas), destacando los efectos encontrados en cada uno de ellos debido al antecesor (p entre 0,039 a 0,905, según variables) y a la fertilización (p desde $<0,001$ a 0,115).

Tabla 3. Valores de la probabilidad de los factores antecesor (Ant), fertilización (Fert) y ensayo (Ens) para los parámetros de rendimiento del maíz bajo SD. Coeficiente de variación (CV %).

Factor de Anova	Variables					
	Grano	MS total	Plantas ha ⁻¹	Granos m ⁻²	P ₁₀₀₀	IC
Antecesor	0,0565	0,1474	0,9047	0,9043	0,0033	0,0389
Fertilización	<0,0001	0,0005	0,1146	0,1360	0,0001	0,0205
Ensayo	0,0005	<0,0001	0,0721	0,0038	0,0001	<0,0001
Fert. x Ant.	0,0023	0,0586	0,4878	0,4016	0,0149	0,0976
Fert. x Ens.	0,0188	0,0132	0,2132	0,1202	0,6108	0,7034
Ant. x Ens.	0,0002	0,0165	0,2243	0,1844	0,1620	0,5814
Ant. x Fert. x Ens.	0,2190	0,3330	0,9871	0,9816	0,1090	0,5670
CV %	15,75	17,09	9,22	9,42	6,87	9,71

3.1.2. Rendimiento en grano

Se encontró interacción significativa en tres de los cinco sitios. En términos generales, se pudo observar el efecto del antecesor y la fertilización sobre el rendimiento en grano de maíz. En los tratamientos sin aplicación de N, los rendimientos de maíz promedio de los cinco ensayos fueron 8603, 5022 y 6561, para los antecesores vicia, avena y barbecho respectivamente (Tabla 4).

Esta tendencia en los rendimientos evidencia el aporte de N realizado por la leguminosa y la inmovilización producida por los residuos de gramíneas. Resultados coincidentes fueron reportados por Da Ros & Aita (1996), Heinrichs *et al.* (2001), Aita *et al.* (2001), Baigorria & Cazorla (2009) y Bojanich *et al.* (2010).

Las lluvias durante el ciclo de los CC o barbecho y el maíz en los años estudiados fueron adecuadas para una buena provisión de agua para el cultivo siguiente, aún en los tratamientos con CC con menor período de reposición de la humedad que el tratamiento barbecho. En estas condiciones manifiesta el efecto positivo de la vicia como antecesor (Ernst, 2004). Restovich *et al.* (2006) coincidiendo con estos resultados concluyeron que dependiendo de la duración del ciclo y el estado de desarrollo, la vicia puede fijar un 3% de N en su biomasa, por lo que se pueden incorporar hasta 30 kg de N por Mg de materia seca producida. Además, la mineralización del N se encuentra facilitada por la baja relación C:N de sus tejidos (Fageria *et al.*, 2005; Restovich *et al.*, 2006).

Por otro lado, cuando se realiza el análisis de las parcelas que tuvieron 80 kg de N, los rendimientos fueron semejantes con todos los antecesores, perdiéndose la diferencia relativa a favor de la vicia y observándose un importante efecto sobre la avena. Teniendo en cuenta que las lluvias durante el ciclo de los CC no limitaron su desarrollo (187, 369, 348, 415, 413 mm para los ensayos E₁, E₂, E₃, E₄ y E₅, respectivamente), el cultivo de avena pudo inmovilizar una gran parte del N que se fue liberando y producir un material vegetal de lenta descomposición (Bortolini *et al.*, 2000; Ruffo & Bollero, 2003a; Miguez & Bollero, 2005; Acosta, 2009). Como la posterior liberación de este nutriente pudo no coincidir con el período de mayor demanda cuantitativa de N del maíz (Heinzmann, 1985; Sá, 1996), dado que durante las primeras semanas puede descomponerse alrededor del 20% (Amado *et al.*, 2003), fue posible acelerar el proceso con el N adicional (Fernández *et al.*, 2007) como se observó en este caso.

En los ensayos 2 y 3, con el antecesor barbecho, el maíz rindió igual que con antecesor vicia, esto puede ser por un exceso de lluvias durante el barbecho que produjo un lavado de nitratos acumulados y este antecesor no produjo un efecto diferencial de rendimiento cuando fue comparado con los otros CC. En este sentido, Tobert *et al.* (1996) concluyeron que los CC de invierno mejoran la producción de maíz y la disponibilidad de N del suelo. Resultados similares fueron encontrados por otros estudios en suelos limosos finos de EEUU (Clark *et al.*, 2007).

En los ensayos 4 y 5 hubo una alta inmovilización, causada por el antecesor avena, en el tratamiento sin N y no se presentaron diferencias cuando se aplicó 80 kg N. El efecto de fertilización fue variable, en particular por la respuesta al N baja, cuando el antecesor fue vicia, variable cuando fue barbecho y significativa cuando fue avena.

Tabla 4. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del rendimiento en grano de maíz establecido con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).

Factores		Grano (Kg ha ⁻¹)				
Antecesor	Fertilización	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Vicia	0N	8022	9627 a	8277	8282 a	8806 a
Avena	0N	6151	5405 b	4033	4034 b	5487 b
Barbecho	0N	5689	9222 a	4753	7548 a	5594 b
Vicia	80N	8374	9365 a	9823	8117 a	9543 a
Avena	80N	8201	10315 a	8506	8042 a	7786 b
Barbecho	80N	6237	12142 a	9437	8630 a	9347 ab
Vicia	Media	8198 a	9496	9050 a	8200	9174
Avena	Media	7176 ab	7860	6270 b	6038	6637
Barbecho	Media	5963 a	10682	7095 b	8089	7470
Media	0N	6621 a	8085	5688 b	6621	6629
Media	80N	7604 a	10607	9255 a	8263	8892
Ant.		0,037	0,036	0,014	0,013	<0,001
Fert.		0,137	0,007	<0,001	0,013	<0,001
Ant. x Fert.		0,490	0,054	0,136	0,028	0,012

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.).

La producción de materia seca total mostró un comportamiento semejante al descrito para la producción de grano, aunque solo se observó interacción significativa en dos de los 5 ensayos y los efectos del antecesor como de la fertilización fueron significativos en menor cantidad de casos. Nuevamente, sin la aplicación de N, el antecesor vicia se destacó del resto, con diferencias significativas en relación al antecesor avena (en el 80% de los ensayos) y del barbecho (en el 40% de los ensayos) (Tabla 5).

Estos resultados son similares a los obtenidos por Smith *et al.* (1987), Corak *et al.* (1991), Da Ros & Aita (1996), Bortolini *et al.* (2000) y Da Silva *et al.* (2007) quienes verificaron que la producción de materia seca del maíz sembrado luego de un CC de vicia no responde a la fertilización nitrogenada. Respuestas negativas a la fertilización nitrogenada en maíz con antecesor vicia fueron observadas en Kentucky-EEUU por Smith *et al.* (1987), Corak *et al.* (1991) y Reeves (1994). Estos autores observaron que la causa de la no respuesta a la fertilización eran los residuos de vicia, dado que cuando se los retiró hubo un incremento de los rendimientos de maíz a dosis crecientes de fertilizante nitrogenado. El IC de maíz no presentó diferencias con los distintos CC como antecesores en los ensayos 4 y 5. En los ensayos 1 y 3

con antecesores vicia sin fertilizar el maíz presentó los mayores valores de IC y en el ensayo 2 con antecesor vicia y barbecho fueron superiores a los obtenidos con antecesor avena (Tabla 6).

Tabla 5. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del rendimiento de materia seca total aérea (MS total) de maíz con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).

Factores		MS total Kg ha ⁻¹				
Antecesor	Fertilización	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Vicia	0N	13880	17329	12269	11440 a	12607 a
Avena	0N	14783	11809	6932	6922 b	8393 b
Barbecho	0N	13554	16581	8271	10421 a	8681 b
Vicia	80N	14571	17614	14448	11146 a	13617 a
Avena	80N	14874	19349	13335	10819 a	11283 a
Barbecho	80N	12195	21680	13918	11840 a	13716 a
Vicia	Media	14226 a	17471 a	13358 a	11293	13112
Avena	Media	14829 a	15579 a	10133 b	8871	9838
Barbecho	Media	12875 a	19131 a	11095 ab	11130	11199
Media	0N	14073 a	15240 b	9157 b	9594	9894
Media	80N	13880 a	19547 a	13900 a	11268	12872
Ant.		0,375	0,343	0,033	0,027	0,005
Fert.		0,866	0,055	<0,001	0,035	<0,001
Ant. x Fert.		0,749	0,320	0,161	0,088	0,072

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert).

Tabla 6. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del índice de cosecha (IC) del maíz con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).

Factores		IC				
Antecesor	Fertilización	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Vicia	0N	0,59	0,59 a	0,67	0,72	0,70
Avena	0N	0,42	0,46 b	0,58	0,59	0,66
Barbecho	0N	0,52	0,55 a	0,57	0,73	0,65
Vicia	80N	0,58	0,58 a	0,68	0,73	0,70
Avena	80N	0,55	0,54 a	0,68	0,74	0,69
Barbecho	80N	0,52	0,56 a	0,64	0,73	0,69
Vicia	Media	0,58 a	0,58	0,67 a	0,73 a	0,70 a
Avena	Media	0,49 b	0,50	0,61 b	0,67 a	0,68 a
Barbecho	Media	0,47 b	0,56	0,62 ab	0,73 a	0,67 a
Media	0N	0,47 b	0,53	0,60 b	0,68 a	0,67 a
Media	80N	0,55 a	0,56	0,67 a	0,73 a	0,69 a
Ant.		0,035	0,006	0,049	0,284	0,306
Fert.		0,032	0,174	0,009	0,163	0,144
Ant. x Fert.		0,214	0,106	0,162	0,195	0,647
CV %		13,2	6,9	6,6	10,8	5,5

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV %).

Los parámetros del rendimiento, cantidad de plantas por ha, cantidad de granos por m^2 y peso de los granos, reflejan las condiciones para el desarrollo del cultivo en diferentes momentos del ciclo del maíz. En el primer caso, durante la primera etapa de implantación y desarrollo vegetativo, mientras que en el segundo caso refleja la condición durante el período de formación de la espiga, desarrollo de las flores y fecundación. Finalmente, el peso de los granos refleja las condiciones posteriores a antesis.

La cantidad de plantas por hectárea, relativamente homogénea entre ensayos, fue modificada por el antecesor en dos ensayos y en ninguno por la fertilización (Tabla 7). Esto confirma la buena disponibilidad hídrica que en todos los ensayos permitió una implantación adecuada y buen desarrollo del cultivo.

En el ensayo 3, el menor número de plantas en el barbecho se debió a una helada producida en el momento de la emergencia del maíz que hizo disminuir el stand de plantas sobre el antecesor barbecho donde se encontraba ya emergido, no así, sobre el antecesor avena y vicia,

en los que el nacimiento se produjo más tarde a causa de una mayor cobertura en superficie y, en consecuencia, una emergencia más lenta.

La cantidad de granos por m² fue semejante en todos los ensayos, sin diferencias estadísticas debidas ni al antecesor, ni a la fertilización (Tabla 8). Nuevamente, esto confirma la buena disponibilidad de agua durante el ciclo del maíz, que permitió un desarrollo semejante del número de plantas y cantidad de granos. Solo en el ensayo 3 se encontró un aumento significativo en el número de granos por aplicación de N, específicamente en los antecesores avena y barbecho. En el caso de estos dos últimos antecesores, las diferencias en el número de granos por efecto de la fertilización fueron variables en los ensayos, pero relacionado con las lluvias en el período siembra-floración.

En cuanto al peso de los granos, la respuesta al antecesor y a la fertilización fueron muy variables entre ensayos (Tabla 9). Evidentemente, fue en esta etapa del cultivo donde los efectos del antecesor y del N más impactaron sobre el cultivo.

En general, cuando no se fertilizó (0N) los granos de mayor peso se observaron en los tratamientos con antecesor vicia. Posiblemente, la buena disponibilidad de humedad permitió la descomposición paulatina de los residuos del CC, con una liberación de su N en la medida que las necesidades del maíz aumentaban. Algo opuesto se observó con el antecesor avena, donde el peso de los granos siempre fue más bajo que los obtenidos con antecesor vicia, posiblemente por el N de la leguminosa liberado lentamente (Argenta *et al.*, 2000; Giacomini, 2001 y Ohland, 2002). Otros estudios han demostrado un modo particular de descomposición de los residuos de vicia utilizado como CC, en los que hay un aporte importante inicial de N (proveniente de la rápida descomposición de las materiales menos resistentes como las hojas) y posteriormente una liberación paulatina del material más resistente (Acosta, 2009; Vanzolini, 2011).

La aplicación de N, al igual que lo observado para rendimiento, aumentó el peso de los granos de los antecesores barbecho y avena. En estos tratamientos fertilizados, el peso de los granos alcanzó a ser significativamente semejante al antecesor vicia en los ensayos 2, 4 y 5 para el barbecho y en 2 y 4 para avena.

Tabla 7. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC de la densidad del cultivo (plantas ha⁻¹) de maíz con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).

Factores		Plantas ha ⁻¹				
Antecesor	Fertilización	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Vicia	0N	50050	61967	72692	60775	70308
Avena	0N	53625	67925	72692	76267	67925
Barbecho	0N	58392	67925	65542	69117	67925
Vicia	80N	52433	65542	77458	67925	76267
Avena	80N	61967	72692	70434	70908	75075
Barbecho	80N	58392	73883	61967	70308	70308
Vicia	Media	51242 b	63754 a	75075 a	64350 a	73288 a
Avena	Media	57796 ab	70308 a	71563 a	73587 a	71500 a
Barbecho	Media	58392 a	70904 a	63754 b	69713 a	69117 a
Media	0N	54022 a	65939 a	70308 a	68719 a	68719 a
Media	80N	57597 a	70706 a	69953 a	69714 a	73883 a
Ant.		0,071	0,203	0,003	0,139	0,522
Fert.		0,18	0,185	0,871	0,781	0,102
Ant. x Fert.		0,405	0,959	0,271	0,377	0,789
CV %		9,55	10,54	6,49	10,76	8,68

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV %).

Tabla 8. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del número de granos de maíz por m² con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).

Factores		Granos m ²				
Antecesor	Fertilización	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Vicia	0N	2321	3507	3537	3711	3653
Avena	0N	2483	3845	3189	3478	3421
Barbecho	0N	2483	3845	3479	3479	3305
Vicia	80N	2429	3710	3768	3305	3710
Avena	80N	2645	4114	3769	3479	3827
Barbecho	80N	2699	4182	3711	3247	3421
Vicia	Media	2375 a	3609 a	3653 a	3508 a	3682 a
Avena	Media	2564 a	3980 a	3479 a	3479 a	3624 a
Barbecho	Media	2591 a	4013 a	3595 a	3363 a	3363 a
Media	0N	2429 a	3732 a	3401 b	3556 a	3460 a
Media	80N	2591 a	4002 a	3749 a	3344 a	3653 a
Ant.		0,309	0,203	0,603	0,765	0,302
Fert.		0,199	0,185	0,029	0,234	0,279
Ant. x Fert.		0,934	0,960	0,524	0,628	0,680
CV %		10,0	10,5	8,3	10,4	10,1

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV %).

Tabla 9. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del peso de los granos (mg) con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).

Factores		Peso Granos (mg)				
Antecesor	Fertilización	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Vicia	0N	345	321 a	288	275 a	314
Avena	0N	196	249 c	248	203 b	271
Barbecho	0N	231	277 b	237	277 a	279
Vicia	80N	349	316 a	309	293 a	321
Avena	80N	310	299 a	290	278 a	284
Barbecho	80N	232	316 a	292	290 a	329
Vicia	Media	347 a	318	299 a	284	318 a
Avena	Media	253 b	274	269 b	240	277 b
Barbecho	Media	232 b	296	264 b	283	304 ab
Media	0N	257 a	282	258 b	251	288 b
Media	80N	297 a	310	297 a	287	311 a
Ant.		0,006	<0,001	0,018	<0,001	0,041
Fert.		0,140	<0,001	<0,001	<0,001	0,068
Ant. x Fert.		0,153	0,013	0,331	0,011	0,299
CV %		19,1	4,6	6,8	6,03	8,2

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV %).

En los casos de acumulación y eficiencia de uso de fertilizante, los resultados del análisis estadístico incluyendo los tres factores, antecesor, fertilización y ensayo, no presentaron interacción significativa a excepción de los de eficiencia de uso de N (Tabla 10). Las variaciones en la cantidad de N tomada y translocada al grano por el cultivo de maíz con los distintos antecesores y dosis de N demuestran, la alta dependencia a las condiciones meteorológicas sobre los procesos involucrados. Sin embargo, se encontraron interacciones significativas entre pares de factores, por lo que el análisis se realizó nuevamente por ensayo y considerando separadamente el efecto del fertilizante y antecesor.

Tabla 10. Valores de la probabilidad de los factores antecesor (Ant.), fertilización (Fert.) y ensayo (Ens.) para la eficiencia de uso del N (EUN) y sus componentes en maíz bajo SD.

Factor de Anova	N MS kg ha ⁻¹	N en Grano kg ha ⁻¹	Variables					
			EFGGr	EFMS	EUNGr	EUNMS	FR	ICN
Antecesor	0,0195	0,0240	0,0121	0,0007	0,0582	0,0003	0,0355	<0,0001
Fertilización	<0,0001	<0,0001	0,0005	0,0015	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0001
Ensayo	<0,0001	0,0369	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0001
Ant. x Fert.	0,1161	<0,0001	0,0314	0,8826	0,1883	0,0058	0,0080	0,0008
Fert. x Ens.	0,0002	0,0047	<0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0381
Ant. x Ens.	0,0073	0,0141	0,0005	0,0388	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0055
Ant. x Fert. x Ens.	0,5968	0,6011	0,2574	0,2523	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,4869
CV%	16,04	19,02	8,79	10,85	29,73	26,99	24,52	6,37

Interacción entre fertilización y antecesor (Ant.x Fert.), interacción entre fertilización y ensayo (Fert x Ens.), interacción entre antecesores y fertilización (Ant. x Ens.), interacción entre antecesores, fertilización y ensayo (Ant x Fert x Ens), coeficiente de variación (CV%), eficiencia agronómica en el uso del fertilizante aplicado para la producción de grano (EFGGr), eficiencia agronómica en el uso del fertilizante aplicado para la producción de materia seca (EFMS), eficiencia de uso del nitrógeno disponible para la producción de grano (EUNGr), eficiencia de uso del nitrógeno disponible para la producción de materia seca (EUNMS), fracción recuperada aparente del fertilizante aplicado (FR) e índice de cosecha de nitrógeno (ICN).

3.1.3. Nitrógeno acumulado por el maíz

El N acumulado en el grano presentó diferencias significativas en la mayoría de los ensayos tanto para N en grano como N en MS por efecto del antecesor y de la fertilización mientras que el acumulado en la MS presentó diferencias en alguno de ellos (Tabla 11 y 12). En términos generales, en las parcelas no fertilizadas, el contenido de N promedio en el grano fue 104, 78 y 59 kg N ha⁻¹, para los antecesores vicia, barbecho y avena, respectivamente. La aplicación de 80 kg de N ha⁻¹ tendió a disimular las diferencias entre los tratamientos, encontrándose 131, 121 y 113 kg de N ha⁻¹ para los antecesores vicia, barbecho y avena, respectivamente.

El N acumulado en la MS presentó diferencias entre los tratamientos y ensayos semejantes a la cantidad de N presente en el grano (Tabla 12). El N en la MS del cultivo brinda una idea de la disponibilidad de este nutriente en el suelo y de la disponibilidad de agua para poder crecer y tomarlo. La disponibilidad de agua de los ensayos evaluados fue relativamente adecuada, por lo que en este caso, el contenido de N daría una idea de la disponibilidad y la eficiencia en la que se ha utilizado este nutriente. Analizando la tendencia general encontrada en el promedio de los

5 ensayos, se observó que en las parcelas no fertilizadas el contenido de N en la MS fue 131, 103 y 82 kg N ha⁻¹, para los antecesores vicia, barbecho y avena, respectivamente. En forma semejante a lo encontrado al analizar la producción de granos o materia seca total aérea, la aplicación de 80 kg de N ha⁻¹ tendió a acortar las diferencias entre los tratamientos, encontrándose 167, 161 y 149 kg de N ha⁻¹ para los antecesores vicia, barbecho y avena, respectivamente. Esto representa un aumento en sentido opuesto en la recuperación aparente de los 80 kg de N aplicados, siendo en avena>barbecho>vicia.

El N en la MS del maíz sin fertilizar con antecesor vicia fue mayor que con antecesor barbecho en 2 de los ensayos y que con antecesor avena en 4 de los ensayos. Es decir, en ningún caso la acumulación de agua y nutrientes buscada con el barbecho prolongado presentó ventajas en relación a la vicia como CC. Con disponibilidad de agua adecuada a alta, el N extra fijado biológicamente y una liberación gradual a lo largo del ciclo del maíz por la descomposición de esos residuos permitieron mayor consumo por parte del cultivo (entre 9 y 56 kg de N ha⁻¹ según los ensayos). Por otro lado, el antecesor avena fue semejante al barbecho en 3 de los 5 ensayos. Es decir, un barbecho prolongado no representó mayor disponibilidad de N para el ciclo del cultivo, ya que la mayor disponibilidad se logra a la siembra y en etapas tempranas, donde los requerimientos del maíz son bajos con alta probabilidad de pérdidas importantes.

Los estudios que utilizaron al centeno y vicia como CC previo al maíz (Sullivan *et al.*, 1991; Giacomini, 2004) también encontraron resultados semejantes, atribuyéndolo a la cantidad de residuos de centeno (6,5 Mg ha⁻¹) con elevada relación C:N (C:N = 59).

Tabla 11. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del contenido de nitrógeno en el grano (kg ha^{-1}) con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).

Factores		N en grano Kg ha^{-1}				
Antecesor	Fertilización	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Vicia	0N	120,3	116,2	92,3	114,0	79,5
Avena	0N	103,8	51,1	38,1	48,1	52,3
Barbecho	0N	85,3	91,7	42,3	104,8	64,5
Vicia	80N	125,6	134,2	137,9	145,1	115,6
Avena	80N	123,0	118,7	102,0	130,1	91,6
Barbecho	80N	93,6	148,6	114,8	140,3	106,7
Vicia	Media	123,0 a	125,2 a	115,1 a	129,5 a	97,5 a
Avena	Media	113,4 ab	84,9 b	70,0 b	89,1 b	71,9 b
Barbecho	Media	89,5 b	120,1 a	78,5 b	122,6 a	85,6 ab
Media	0N	103,1 a	86,3 b	57,5 b	88,9 b	65,4 b
Media	80N	114,1 a	133,8 a	118,2 a	138,5 a	104,6 a
Ant.		0,048	0,021	0,002	0,025	0,010
Fert.		0,298	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Ant. x Fert.		0,838	0,193	0,448	0,158	0,907
CV %		19,6	21,1	20,5	20,6	14,1

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV %).

Tabla 12. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del contenido de nitrógeno en la materia seca total (kg ha⁻¹) con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).

Factores		N en MS total Kg ha ⁻¹				
Antecesor	Fertilización	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Vicia	0N	151,8	161,2	112,5	130,4	98,8
Avena	0N	147,0	82,5	49,5	63,9	65,5
Barbecho	0N	128,6	129,9	56,5	121,7	76,1
Vicia	80N	159,7	181,8	180,1	170,8	139,9
Avena	80N	159,7	202,8	126,1	148,6	106,1
Barbecho	80N	126,3	239,7	147,0	164,6	127,5
Vicia	Media	155,7 a	171,5 a	146,3 a	150,6 a	119,4 a
Avena	Media	153,4 ab	142,6 a	87,8 b	106,3 b	85,8 b
Barbecho	Media	127,5 b	184,8 a	101,8 b	143,1 a	101,8 b
Media	0N	142,5 a	124,5 b	72,8 b	105,3 b	80,1 b
Media	80N	148,6 a	208,1 a	151,1 a	161,3 a	124,5 a
Ant.		0,074	0,247	0,002	0,023	0,002
Fert.		0,556	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Ant. x Fert.		0,828	0,120	0,695	0,2789	0,724
CV %		14,6	25,3	20,6	19,1	12,7

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV)

Tabla 13. Evaluación conjunta de los cinco ensayos con CC del índice de cosecha de N (ICN) con distintos antecesores (vicia y avena) y dosis de fertilización (0N y 80N).

Factores		ICN				
Antecesor	Fertilización	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Vicia	0N	0,72	0,82	0,79	0,87 a	0,80
Avena	0N	0,62	0,77	0,71	0,75 b	0,80
Barbecho	0N	0,71	0,75	0,66	0,86 a	0,85
Vicia	80N	0,74	0,77	0,79	0,85 a	0,83
Avena	80N	0,60	0,81	0,77	0,88 a	0,86
Barbecho	80N	0,62	0,78	0,74	0,85 a	0,84
Vicia	Media	0,79 a	0,73 a	0,79 a	0,86	0,82 a
Avena	Media	0,73 b	0,61 b	0,79 a	0,81	0,83 a
Barbecho	Media	0,70 b	0,67 ab	0,76 a	0,86	0,84 a
Media	0N	0,72 b	0,69 a	0,79 a	0,83	0,82 a
Media	80N	0,76 a	0,65 a	0,78 a	0,86	0,84 a
Ant.		0,011	0,057	0,371	0,195	0,464
Fert.		0,036	0,427	0,626	0,242	0,163
Ant. x Fert.		0,193	0,458	0,208	0,062	0,256
CV %		5,6	11,8	5,9	6,4	4,4

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV %).

El ICN de maíz no presentó diferencias con los distintos CC como antecesores en 3 de los 5 ensayos realizados. Se analizaron separadamente los factores hasta $p < 0,10$. En el ensayo 1 y 2 con antecesor vicia, el maíz presentó valores superiores que con avena y barbecho (Tabla 13).

En los ensayos 1 y 2 se realizaron aplicaciones crecientes de N en el cultivo de maíz a los efectos de verificar la respuesta en el rendimiento y en la absorción de N con los distintos antecesores al variar la disponibilidad de N en el suelo (Figuras 20, 21, 22, 23, 24 y 25).

En el ensayo 1 se observó un punto más alto de rendimiento en el antecesor vicia respecto de los otros dos, mostrando el aporte realizado desde la implantación del cultivo sucesor. Con vicia, el rendimiento fue más alto pero la pendiente menor, indicando que la respuesta a la aplicación de N fue menos eficiente.

Solo con el antecesor avena el cultivo de maíz alcanzó su máximo rendimiento (entre 80 y 120 kg N disponible ha^{-1}), mientras que con antecesor barbecho o vicia la tendencia fue siempre creciente (Figura 20).

En cuanto a la cantidad de N en grano, se observó una tendencia general semejante, aunque con una mayor separación entre los antecesores barbecho y vicia. Cuando la disponibilidad de N fue baja el antecesor vicia fue mucho más eficiente para acumular N en el grano, mientras que, a medida que la disponibilidad de N aumentó, el barbecho tendió a ser más eficiente (Figura 21).

La cantidad de N en la materia seca total aérea del maíz (Figura 22) reflejó el efecto acumulado de cada uno de los antecesores sobre la disponibilidad para el cultivo. En este sentido, las curvas obtenidas con antecesor barbecho y vicia mostraron una mayor disponibilidad inicial (posiblemente por el aporte de la descomposición del material lábil de la vicia) y una diferencia a lo largo de los diferentes niveles de N disponible entre 10 y 15 kg ha⁻¹ (proveniente de la descomposición adicional de los materiales orgánicos del suelo).

En cuanto al antecesor avena, se observó una inmovilización importante del N (sin aplicación de N) que es superada con 50 kg de N ha⁻¹ con una tendencia decreciente en la medida que la disponibilidad aumenta, esto pudo deberse a un mayor volumen de residuos de más lenta descomposición dejado por la avena.

En el ensayo 2 se observaron algunas diferencias importantes:

El antecesor barbecho tenía mayor disponibilidad de N a la siembra del maíz; esto fue debido a un mayor desarrollo de ambos CC y a un secado muy próximo al momento de la siembra.

La respuesta con el antecesor barbecho y avena fue significativa y creciente, alcanzando valores más altos con el primero de ellos. En cambio con el antecesor vicia, la tendencia de los rendimientos al aumento de la disponibilidad de N fue negativa (Figura 23). Siendo un año con abundantes precipitaciones y una buena disponibilidad en los momentos críticos, se profundizó el efecto de aumento en la disponibilidad de N. En este sentido, no hubo deficiencias en la cantidad de N absorbido en la materia seca total aérea, que a baja disponibilidad de N fue mayor que en el antecesor barbecho, ni hubo problemas en la translocación del N al grano, donde en general fue mayor que en los otros antecesores (Figura 24 y Figura 25).

Teniendo en cuenta que la disponibilidad de N y agua para el maíz con el antecesor vicia no fue limitante, las diferencias encontradas podrían estar asociadas a la gran cantidad de material acumulado en superficie, que produjo una emergencia tardía de las plantas de maíz, y que podría haber afectado algunos factores no medidos responsables de una disminución en el rendimiento. Además de esta diferencia en el desarrollo, las plántulas de maíz sobre el antecesor vicia presentaron cierto amarillamiento, hecho que podría estar sugiriendo cierto efecto alelopático (Magie *et al.*, 1967; Brown *et al.*, 1985, Hicks *et al.*, 1989) del material

acumulado o de su combinación con la aplicación de herbicida próxima a la siembra de maíz, aspectos que deberían ser objeto de estudio posteriores.

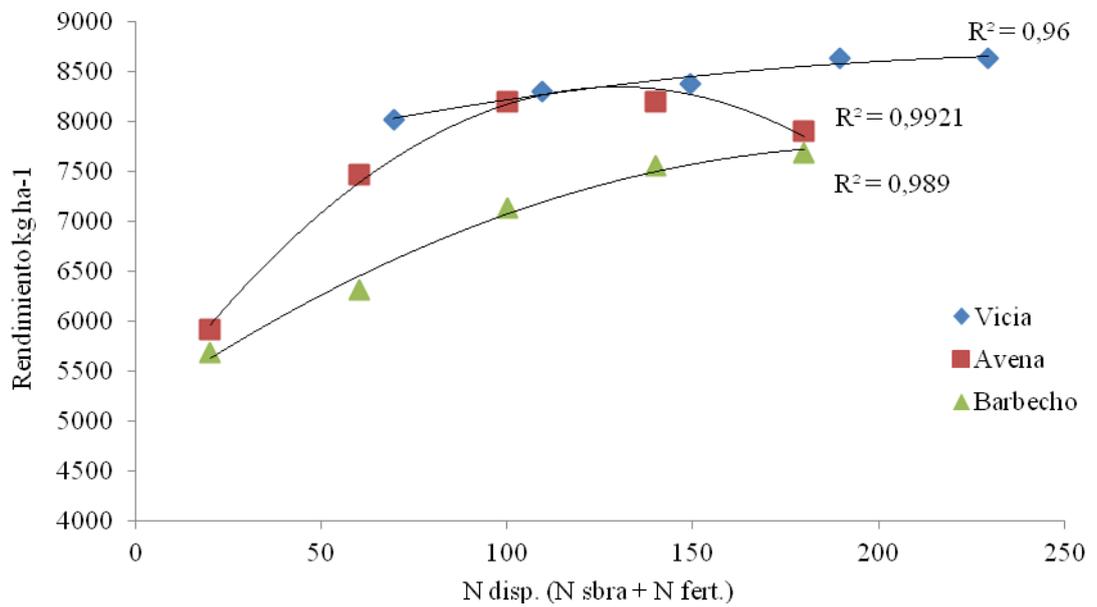


Figura 20. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha⁻¹) y el rendimiento en grano de maíz (kg ha⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 1.

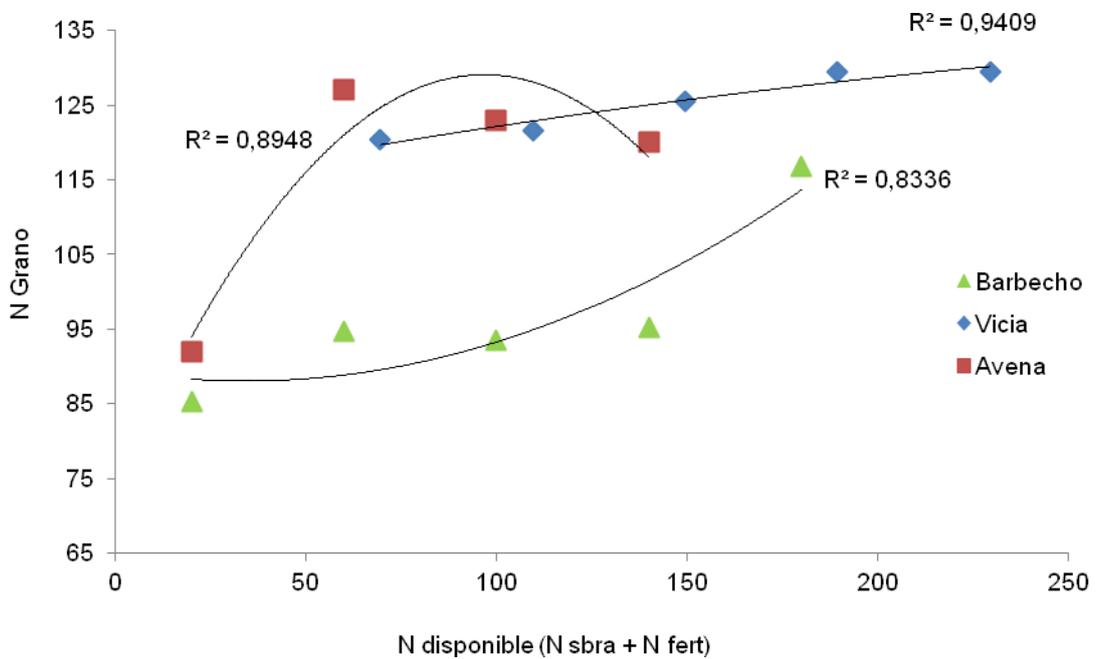


Figura 21. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha⁻¹) y el contenido de N en grano de maíz (kg ha⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 1.

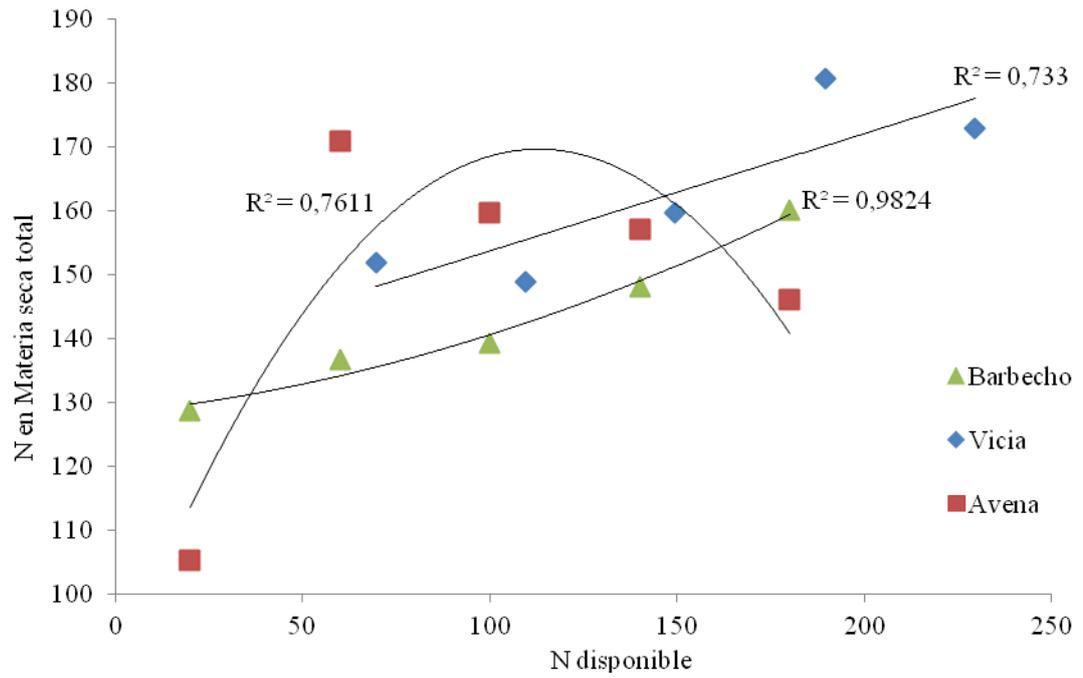


Figura 22. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha⁻¹) y el contenido de N en la materia seca total aérea de maíz (kg ha⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 1.

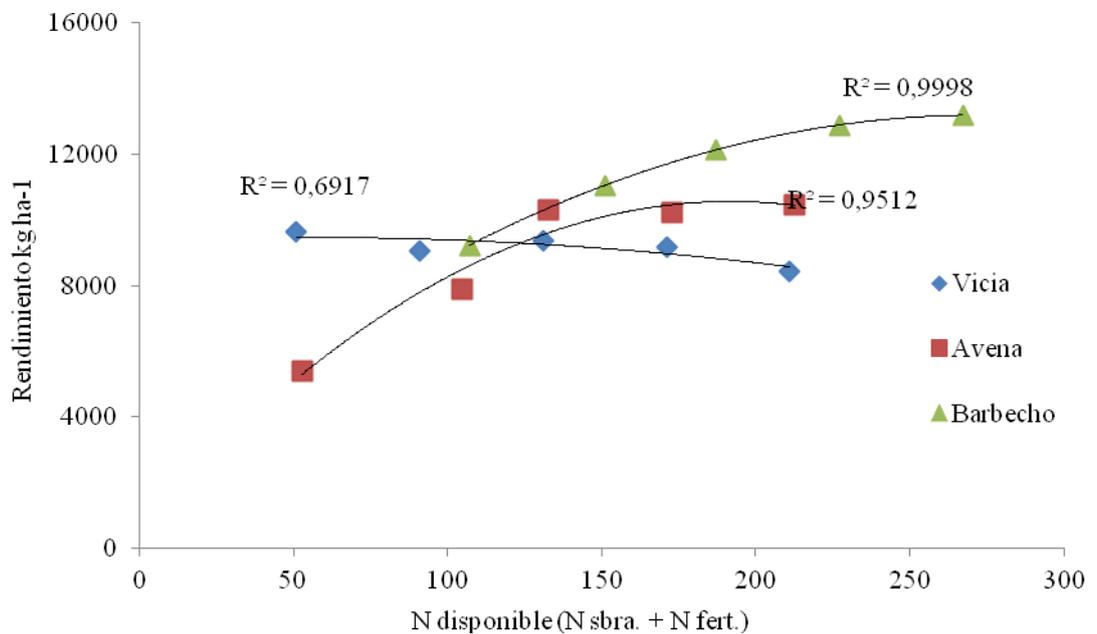


Figura 23. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha⁻¹) y el rendimiento en grano de maíz (kg ha⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 2.

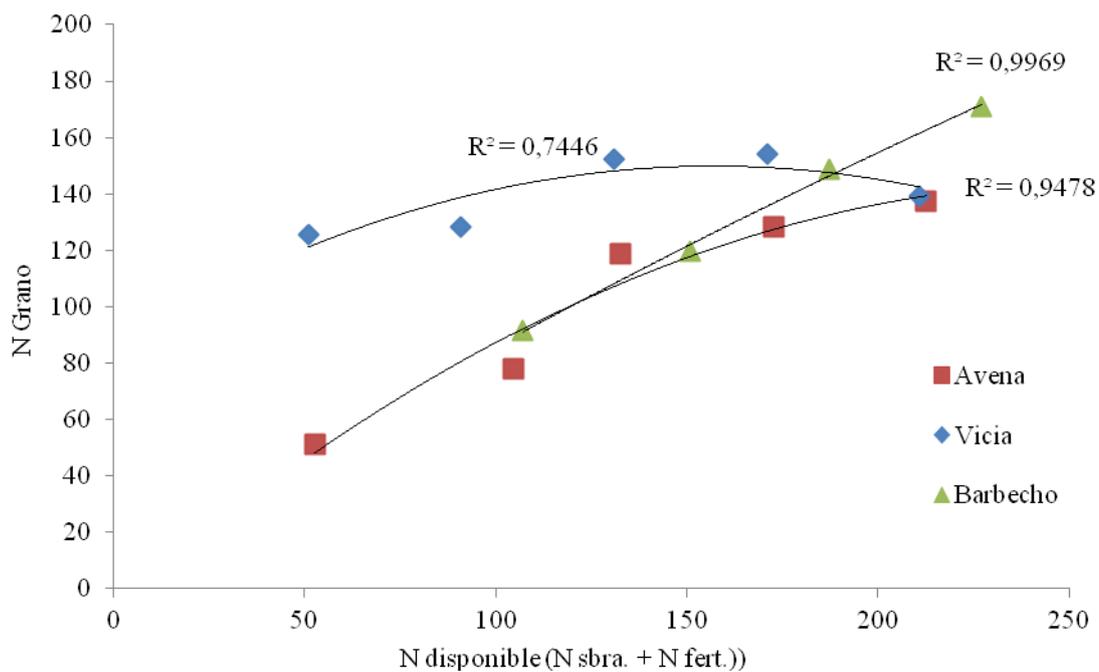


Figura 24. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha⁻¹) y el contenido de N en grano de maíz (kg ha⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 2.

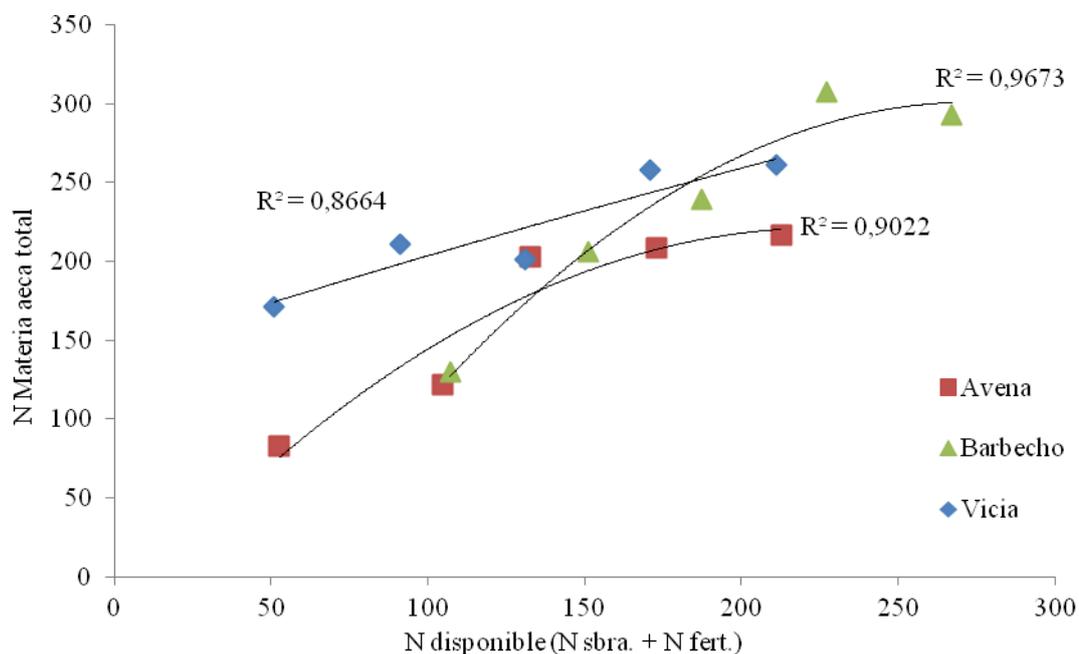


Figura 25. Relación entre la disponibilidad de N (N disponible a la siembra + N del fertilizante, kg ha⁻¹) y el contenido de N en la materia seca aérea de maíz (kg ha⁻¹) sembrado sobre los antecesores avena, vicia y barbecho en el ensayo 2.

3.2. Cultivos de cobertura alternativos

Dado la gran variabilidad que presentó el maíz, en sus parámetros de rendimiento con los diferentes CC alternativos ensayados como antecesores, se planteó un análisis enfocando el efecto solo de los siguientes CC: avena + vicia, trébol cobertura y pastoreo y avena fertilizada.

En la mayoría de los ensayos se observó un efecto significativo del antecesor y de la fertilización. Aunque la interacción resultó no significativa ($P < 0,056$), la respuesta observada en los tratamientos sin fertilizante mostró diferencias a las observadas en los fertilizados. El rendimiento en grano del maíz sin fertilizar con antecesor avena+via fue menor, igual y mayor que el del barbecho en los ensayos 1, 2 y 3, respectivamente (Tabla 14). Este pudo haberse debido a las precipitaciones ocurridas desde la siembra hasta 15 días antes de floración que fueron en el ensayo 1 y 2 un 50% superior al del ensayo 3 para ese mismo período. Las menores precipitaciones y la asociación gramínea-leguminosa, determinaron que la liberación del N en el ensayo 3, con antecesor avena+via, fuera más lenta en los primeros 60 días después de la emergencia, con una menor pérdida y mayor liberación de N en períodos críticos de mayor demanda por el cultivo de maíz. Al fertilizar, los rendimientos en grano fueron iguales o menores. Cuando se analiza la producción de MS total aérea (Tabla 15) las diferencias solo se detectaron en el ensayo 1 sin N y en el 2 con N, aspecto que sugiere que la productividad neta no se vio mayormente afectada y el efecto podría estar más asociado a la etapa de llenado de grano. Al analizar el N translocado al grano (Tabla 16) se observó que en los ensayos 1 y 2 sin la aplicación de fertilizante no se encontraron diferencias en el maíz con antecesor avena + vicia respecto del antecesor barbecho, mientras que en el ensayo 3 fue significativamente mayor en el primero de ellos. En las parcelas fertilizadas se diluyen las diferencias por una mayor respuesta del maíz con antecesor barbecho.

En relación al N en la materia seca total aérea (Tabla 17) se observó una tendencia a una diferencia a favor del antecesor barbecho cuando los valores de N en la materia seca fueron más altos, debido a una mayor disponibilidad del N del suelo, (ensayos 1 y 2) y a la inversa cuando la disponibilidad fue baja, (ensayo 3). Al fertilizar, los valores de N en la MS total aérea tienden a uniformarse, posiblemente por efecto de otras limitantes.

En síntesis, la disponibilidad de N natural del suelo es la que influyó sobre las diferencias en la absorción de N total por parte del maíz, mientras que la cantidad de N llevada al grano tendió a ser proporcionalmente mayor (con un índice de cosecha del N más alto en los ensayos no fertilizados). Evidentemente, la liberación gradual del N contenido en la biomasa del CC

favorecería una utilización más eficiente en las etapas más tardías del maíz, comportamiento también observado en otros ambientes (Amado *et al.*, 2002; Acosta, 2009).

3.2.1. Antecesor trébol

En el maíz con antecesor trébol, no se observaron diferencias entre el trébol de cobertura o para pastoreo en ninguno de los parámetros evaluados, sea en las parcelas testigos o fertilizadas. Las diferencias fueron variables, con una tendencia a obtener mayores rendimientos en las parcelas fertilizadas. Posiblemente, el desarrollo de los tréboles fue escaso, con una baja incorporación de biomasa, no brindando los beneficios de los CC, cobertura del suelo y aporte de N, ni del barbecho, acumulación de agua y nutrientes.

3.2.2. Antecesor avena fertilizada

En el caso del antecesor avena fertilizada (ensayos 3, 4 y 5) se observó un comportamiento general mejor que en el caso del antecesor avena sin fertilizar, aunque se observaron diferencias a favor del antecesor barbecho. El rendimiento en grano de maíz fue semejante a la parcela con antecesor barbecho en dos de los tres ensayos, tanto sin como con N. Un comportamiento semejante se observó con la MS total aérea, donde solo se detectaron diferencias significativas en el ensayo 4 fertilizado.

Al analizar el N en el grano y en la MS total aérea se observó una tendencia a menores valores en el maíz con antecesor avena fertilizada con respecto al testigo, aunque no siempre las diferencias fueron estadísticamente significativas. Evidentemente, la fertilización de la avena mejoró la calidad y la velocidad de su descomposición, aunque el efecto sobre el maíz posteriormente implantado fue variable, como el resultado de las condiciones meteorológicas imperante durante el período de desarrollo del CC y posterior descomposición.

La producción obtenida puede ser atribuida a la eficiencia de los CC utilizados como antecesores, a las condiciones climáticas favorables (temperatura y precipitación pluviométrica), a la disponibilidad de nutrientes y del potencial genético del híbrido utilizado.

Tabla 14. Rendimiento en grano del maíz con cultivos de cobertura alternativos en los diferentes ensayos.

Factores		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Antecesor	Fertilización					
Av.+Vic.	0N	4632	7475 ab	7606 a		
Treb. Cob.	0N	5209	5464 bc		5484	
Treb. Past.	0N	6771	4885 c			
Av. Fert.	0N			4203 b	4807	6149
Barbecho	0N	5690	9222 a	4753 b	7547	5594
Av.+Vic.	80N	4420	7833 b	9487 a		
Treb. Cob.	80N	6424	8940 b		7027	
Treb. Past.	80N	6371	9341 b			
Av. Fert.	80N			9388 a	6477	8360
Barbecho	80N	6237	12142 a	9437 a	8630	9347
Av.+Vic.	Media	4526 a	7654	8547		
Treb. Cob.	Media	5816 a	7202		6255 b	
Treb. Past.	Media	6571 a	7113			
Av. Fert.	Media			6795	5642 b	7254 b
Barbecho	Media	5963 a	10682	7095	8089 a	7470 a
Media	0N	5575 a	6762	5521	5946 b	5871 b
Media	80N	5863 a	9564	9437	7378 a	8853 a
Ant.		0,1848	0,0003	0,0551	0,0037	0,001
Fert.		0,6582	<0,0001	<0,0001	0,0118	<0,001
Ant. x Fert.		0,7981	0,0567	0,0691	0,8735	0,150
CV %		27,3	14,92	15,89	15,37	11,4

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Avena + vicia (Av. + Vic.), trébol cobertura (Treb. Cob.), trébol pastoreo (Treb. Past.), avena fertilizada (Av. Fert.), antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV%)

Tabla 15. Rendimiento en materia seca del maíz con cultivos de cobertura alternativos en los diferentes ensayos.

Factores		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Antecesor	Fertilización					
Av.+Vic.	0N	11067	15274	11499		
Treb. Cob.	0N	11644	10927		7140	
Treb. Past.	0N	14160	9558			
Av. Fert.	0N			7385	8221	9610
Barbecho	0N	13555	16581	8271	10421	8681
Av.+Vic.	80N	9902	14471	14179		
Treb. Cob.	80N	13574	14214		10302	
Treb. Past.	80N	14236	16437			
Av. Fert.	80N			12977	8843	12109
Barbecho	80N	12195	21681	13918	11840	13716
Av.+Vic.	Media	10485 a	14873 b	12839 a		
Treb. Cob.	Media	12609 a	12570 b		8721 b	
Treb. Past.	Media	14198 a	12998 b			
Av. Fert.	Media			10181 b	8532 b	10860 a
Barbecho	Media	12875 a	19131 a	11095 ab	11130 a	11199 a
Media	0N	12606 a	13085 b	9052 b	8594 b	9146 b
Media	80N	12477 a	16701 a	13691 a	10328 a	12913 a
Ant.		0,2186	0,0032	0,0393	0,0084	0,7268
Fert.		0,9153	0,0056	<0,0001	0,0160	0,0038
Ant. x Fert.		0,7559	0,1389	0,2248	0,2690	0,213
CV %		23,41	18,62	14,04	13,88	14,72

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Avena + vicia (Av. + Vic.), trébol cobertura (Treb. Cob.), trébol pastoreo (Treb. Past.), avena fertilizada (Av. Fert.), antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV%).

Tabla 16. Nitrógeno acumulado en el grano de maíz con cultivos de cobertura alternativos en los diferentes ensayos.

Factores		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Antecesor	Fertilización					
Av.+Vic.	0N	69	74	77		
Treb. Cob.	0N	78	52		72	
Treb. Past.	0N	102	45			
Av. Fert.	0N			40	61	58
Barbecho	0N	85	92	42	105	64
Av.+Vic.	80N	66	115	135		
Treb. Cob.	80N	96	106		116	
Treb. Past.	80N	96	114			
Av. Fert.	80N			114	109	100
Barbecho	80N	94	149	115	140	107
Av.+Vic.	Media	68 a	94 b	106 a		
Treb. Cob.	Media	87 a	79 b		94 b	
Treb. past	Media	99 a	79 b			
Av. Fert.	Media			77 b	85 b	79 a
Barbecho	Media	89 a	120 a	79 b	123 a	86 a
Media	0N	84 a	66 b	53 b	79 b	61 b
Media	80N	88 a	121 a	121 a	122 a	103 a
Ant.		0,1848	0,0008	0,0048	0,0136	0,4309
Fert.		0,6582	<0,0001	<0,0001	0,0005	0,0006
Ant. x Fert.		0,7981	0,4779	0,5498	0,8449	0,991
CV %		27,33	16,54	15,54	19,09	16,21

Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Avena + vicia (Av. + Vic.), trébol cobertura (Treb. Cob.), trébol pastoreo (Treb. Past.), avena fertilizada (Av. Fert.), antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV%).

Tabla 17. Nitrógeno acumulado en la materia seca total aérea del maíz con cultivos de cobertura alternativos en los diferentes ensayos.

Factores		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Antecesor	Fertilización					
Av.+Vic.	0N	93	96	96		
Treb. Cob.	0N	114	76		85 a	
Treb. Past.	0N	142	60			
Av. Fert.	0N			53	93 a	72
Barbecho	0N	129	130	56	122 a	76
Av.+Vic.	80N	96	210	157		
Treb. Cob.	80N	136	148		132 ab	
Treb. Past.	80N	139	178			
Av. Fert.	80N			135	91 b	118
Barbecho	80N	126	240	147	165 a	127
Av.+Vic.	Media	95 b	153 b	127 a		
Treb. Cob.	Media	125 a	112 c		109	
Treb. Past.	Media	141 a	119 c			
Av. Fert.	Media			94 b	92	95 a
Barbecho	Media	127 a	185 a	102 b	143	102 a
Media	0N	119 a	91 b	68 b	100	74 b
Media	80N	124 a	194 a	146 a	129	123 a
Ant.		0,0249	0,0002	0,0110	0,0027	0,4552
Fert.		0,6107	<0,0001	<0,0001	0,0094	0,0005
Ant. x Fert.		0,7670	0,3400	0,2909	0,1032	0,743
CV %		19,24	16,57	15,08	17,48	15,35

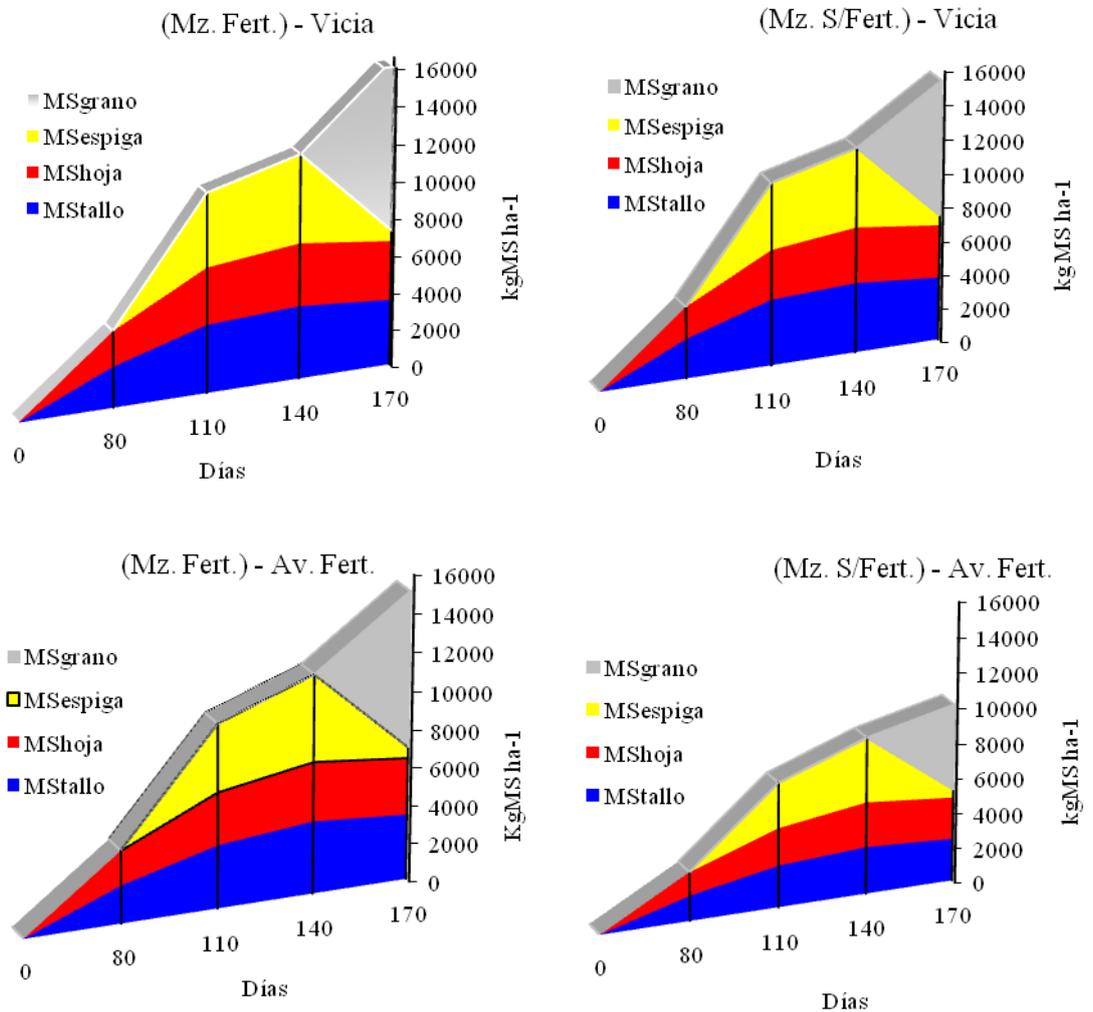
Letras diferentes en un mismo ensayo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los antecesores (con 0N, 80N o el promedio de ellos) o por la fertilización. Avena + vicia (Av. + Vic.), trébol cobertura (Treb. Cob.), trébol pastoreo (Treb. Past.), avena fertilizada (Av. Fert.), antecesor (Ant.), fertilización (Fert.), interacción entre fertilización y antecesor (Ant. x Fert.), coeficiente de variación (CV%).

3.2.3. Acumulación de N y partición de MS en diferentes órganos de la planta

El análisis de crecimiento de maíz a través de la variación de su peso y de la partición de MS entre sus distintos órganos, a lo largo de su cultivo, permitió describir, primero el comportamiento del proceso de producción con los diferentes antecesores de CC y segundo la estrategia puesta en juego por el cultivo para determinar el número de estructuras reproductivas y el llenado efectivo de los órganos de cosecha.

En la Figura 26 se describe la evolución del peso promedio total (ensayos 3, 4 y 5) y de las distintas fracciones de la parte aérea de maíz con los diferentes antecesores de CC. Se puede observar claramente los efectos de los antecesores y la fertilización en la producción de biomasa aérea del maíz. El efecto positivo del antecesor vicia sin la aplicación de N se destacó del resto de los CC, principalmente del efecto esquilante de la avena. Entretanto, la fertilización igualó todos los tratamientos de antecesores.

En la Figura 27 se observa que los efectos en biomasa de cada uno de los órganos están correspondidos por variaciones en la acumulación de N. En general, cuando no se fertilizó (0N) los mayores contenidos de N fueron obtenidos con el antecesor vicia.



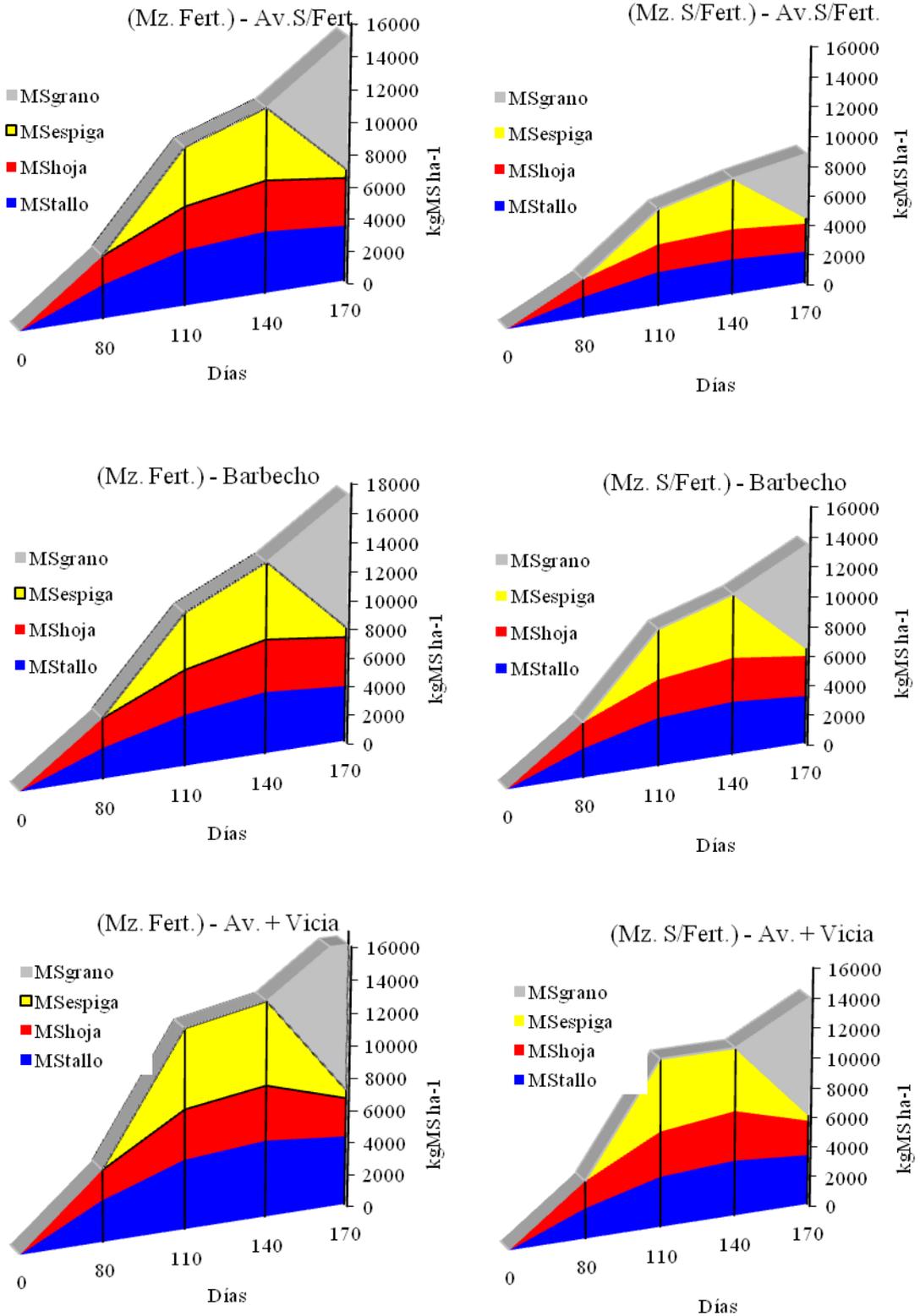
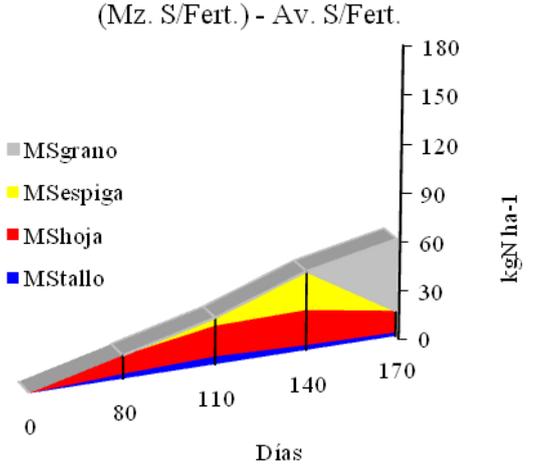
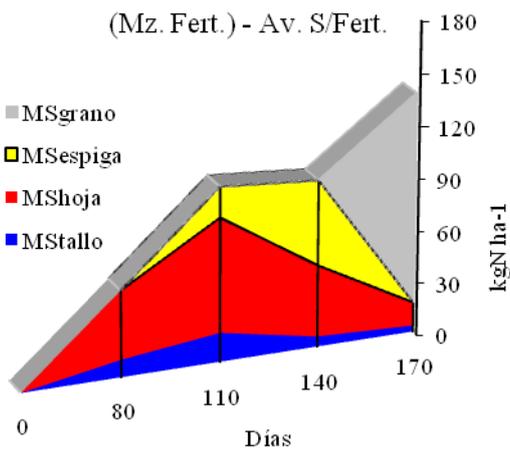
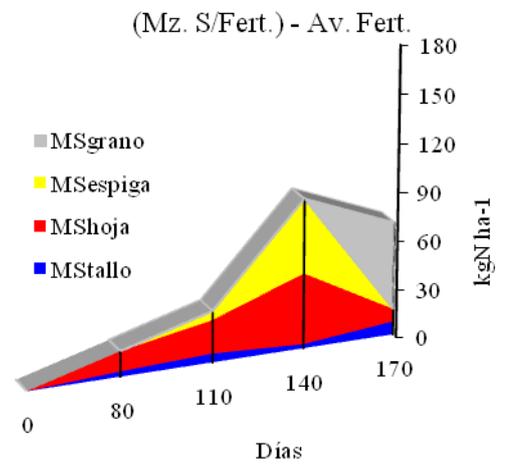
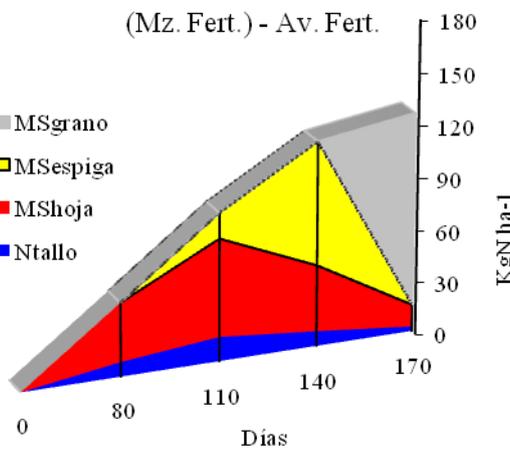
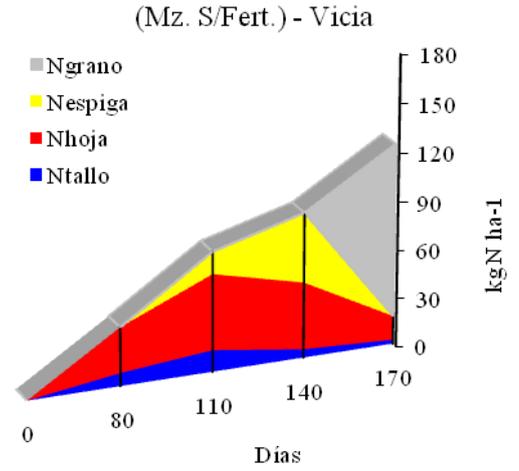
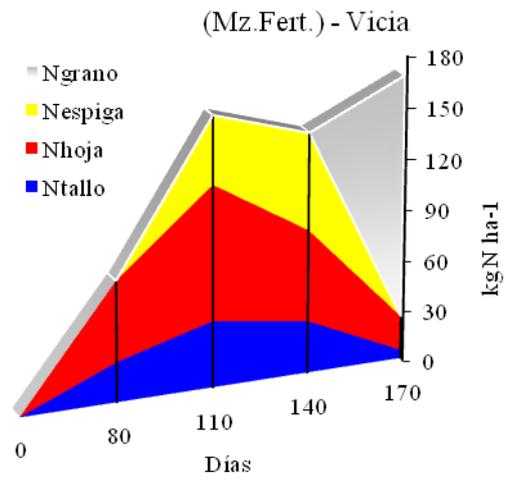


Figura 26. Acumulación y partición de materia seca de maíz con diferentes cultivos de cobertura como antecesores. Vicia, avena fertilizada (Av.Fert.), avena sin fertilizar (Av. S/Fert.), avena + vicia (Av. + Vicia), maíz fertilizado (Mz. Fert.), maíz sin fertilizar (Mz. S/Fert.) y barbecho, Datos promedio de los ensayos 3, 4 y 5. Campaña 2007/08.



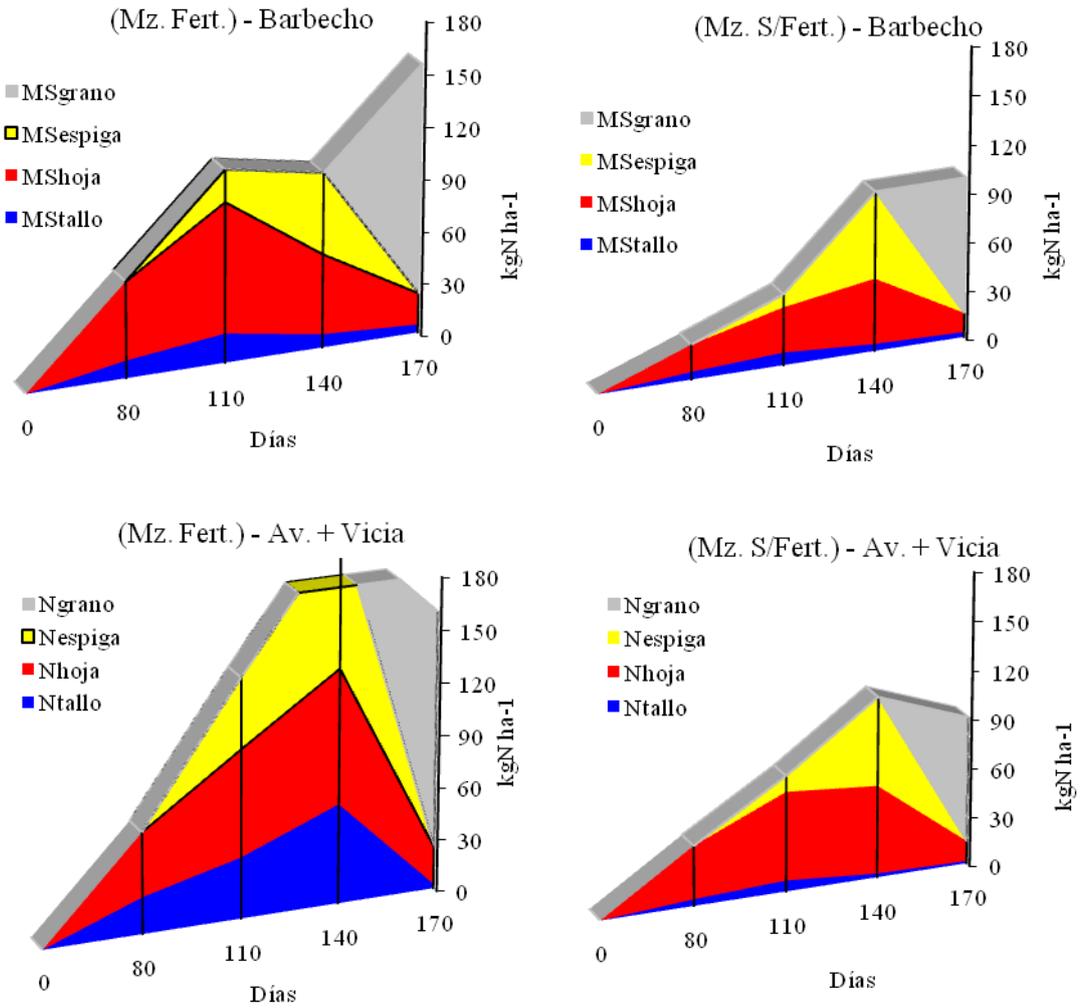


Figura 27. Acumulación y partición de N en maíz con diferentes CC antecesores. Vicia, avena fertilizada (Av.Fert.), avena sin fertilizar (Av. S/Fert.), avena + vicia (Av. + Vicia), maíz fertilizado (Mz. Fert.), maíz sin fertilizar (Mz. S/Fert.) y barbecho. Datos promedio de los ensayos 3, 4 y 5. Campaña 2007/08.

4. CONCLUSIONES

- Los cultivos de cobertura antecesores tienen efectos diferenciados sobre los parámetros de rendimiento de maíz. La vicia y la avena + vicia proporcionaron mayor producción de maíz que los tratamientos barbecho y avena.
- La vicia fue más efectiva que la avena en cuanto a sus efectos sobre características agronómicas del maíz: rendimiento, biomasa aérea, peso de 1000 granos y tenor de N en los granos.
- En ausencia de fertilización nitrogenada, las mayores productividades de maíz fueron obtenidas sobre el CC antecesor vicia y las menores sobre avena.
- La introducción de la vicia y la avena + vicia disminuyó las necesidades de fertilización nitrogenada para el cultivo de maíz.
- La vicia presentó efectos positivos en la absorción de N y en la nutrición del maíz. A su vez, con la aplicación de fertilizante nitrogenado, las ventajas de la utilización de la vicia como CC del suelo para ofrecer N fueron variables según el año y las condiciones climáticas.
- En el cultivo de maíz en secano, sembrado a continuación de los CC sin limitaciones de nutrientes, el agua acumulada a la siembra, la cantidad y distribución de las precipitaciones, en particular las ocurridas en enero, determinaron los rendimientos máximos alcanzables.

CAPÍTULO IV

CULTIVOS DE COBERTURA DE OTOÑO/INVIERNO. PRODUCCIÓN Y PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA BIOMASA AÉREA

1. INTRODUCCIÓN

La descomposición de los residuos de cultivos aportados al suelo es realizada, esencialmente, por los microorganismos heterotróficos que utilizan elementos para su nutrición y el carbono necesario para la producción de energía y formación de tejidos microbianos (Aita *et al.*, 2001). Entre tanto, factores abióticos y bióticos determinan la velocidad del proceso de descomposición y definen la persistencia de estos residuos en la superficie del suelo (Acosta, 2009).

La tasa de descomposición de los CC depende de su naturaleza (composición química, relación C:N), de su volumen, de la fertilidad del suelo, del manejo de la cobertura y de las condiciones climáticas, principalmente precipitaciones y temperaturas. Estos factores influyen directamente en el metabolismo de los organismos descomponedores del suelo (Alvarenga *et al.*, 2007).

Entre los factores que interfieren en la actividad microbiana, la tasa de descomposición de los residuos, resultan relevantes el contacto suelo/residuo (Schomberg & Steiner 1994; Amado *et al.*, 2000), el régimen hídrico (Parton *et al.*, 2007), la disponibilidad de N inorgánico en el suelo (Wiethölter, 1993), la temperatura (Koenig & Cochran, 1994), las relaciones C:N (Tian *et al.*, 1992; Jama & Nair, 1996; Janssen, 1996; Mary *et al.*, 1996) y lignina:N (LIG:N) (Buchanan & King, 1993), el tenor de lignina y polifenoles (Palm & Sanchez, 1991; Tian *et al.*, 1992; Koenig & Cochran, 1994; Jama & Nair, 1996) y la concentración de N en el tejido vegetal (Mary *et al.*, 1996; Parton *et al.*, 2007). Entre estos factores, la relación C:N de los residuos adicionados al suelo asume un rol importante en la descomposición y en la relación entre mineralización/inmovilización de N a la solución del suelo. Janssen (1996), analizando varios estudios relacionados a la mineralización de N, observó que la fracción de N orgánico mineralizada está inversamente relacionada a la relación C:N y de manera idéntica a la descomposición de los residuos. A su vez, trabajando con residuos de lenteja, encontró inmovilización neta en los períodos iniciales de descomposición cuando la relación C:N era solamente de 15. En la bibliografía se encuentran diversos valores de relación C:N a partir de los cuales ocurre inmovilización neta de N (Kumar & Goh, 2003). No obstante, estos varían

con el tipo de planta y el estadio de maduración en que estos son adicionados al suelo (Monteiro *et al.*, 2002). La inmovilización puede ocurrir en cualquier fase de descomposición de los residuos. Resultados preliminares obtenidos por Barraco *et al.* (2009) demostraron que los CC pueden producir altos volúmenes de biomasa, logrando con esto mejorar la cobertura superficial del suelo, aportando además otros nutrientes (S y P) que son capturados durante el invierno-principio de primavera por los CC y liberados en formas orgánicas (rápida liberación), dependiendo especialmente del estado fenológico en el cual se ha cortado su ciclo y de la especie.

El efecto benéfico de la disponibilidad de N sobre la performance de gramíneas, cuando están asociadas a leguminosas, es relatado en diversos trabajos. Vaughan & Evanylo (1998), por ejemplo, verificaron que hubo mayor predominancia de centeno en asociación con vicia villosa, cuando la cantidad de N disponible en el suelo era de 45 mg kg⁻¹ y no fue así con 25 mg kg⁻¹. Esto debe haber beneficiado a la gramínea, aumentando su competitividad en relación a la leguminosa.

Por otro lado, en investigaciones llevadas adelante por Amado *et al.* (2000), en un Hapludalf, se encontró que para que los CC atiendan la demanda de N de los cultivos subsiguientes existe la necesidad de una descomposición en sincronía con la demanda del cultivo en sucesión. Combinar estos dos objetivos han sido un desafío para técnicos y agricultores en el sur de Brasil, pues aunque una significativa cantidad de N pueda existir en la parte aérea de los CC, la cantidad real de N que quedará disponible para el cultivo sucesor dependerá de la extensión de la descomposición de los residuos dentro de la estación de crecimiento del cultivo de valor económico y de la dinámica de mineralización/inmovilización de cada tipo y cantidad de residuo aportado al suelo (Amado, 1997). En investigaciones realizadas por Giacomini (2001) se comprobó que la cantidad de Csa (carbono soluble en agua) depende no solamente de su concentración en los residuos de cultivos sino también de la cantidad de MS incorporada al suelo por los CC. En los últimos años se encuentran en la bibliografía internacional trabajos de investigación conducidos con diferentes especies de CC, en especial con avena y vicia. Existe una coincidencia de resultados entre los diferentes autores, sugiriendo a la avena como una excelente opción para la producción de biomasa, además de tener una elevada persistencia de sus residuos en el suelo luego de su eliminación química o mecánica. No obstante, la disponibilidad de N para el maíz en sucesión, está frecuentemente comprometida en función de la inmovilización microbiana de N durante la descomposición de su material orgánico con elevada relación C:N. La vicia tiene ventajas por su capacidad de fijar el N₂ atmosférico y su eficiencia en reciclar N para el maíz. Sin embargo, la rápida

descomposición de sus residuos la hacen poco eficiente en la protección del suelo contra los efectos de erosión.

Existe una necesidad de reunir las características intrínsecas a cada especie para proporcionar una producción de biomasa de otoño/invierno que provea, simultáneamente, protección al suelo contra la erosión y abastecimiento de N al maíz en sucesión en cantidad y momento oportuno. Una de las estrategias para buscar esta coincidencia consiste en la asociación de CC de suelo. La caracterización de CC a través de la información sobre el contenido de fibra medida por medio del método de fibra detergente ácido (FDA), utilizada para discriminar entre materiales similares, excluye otras fracciones de igual o mayor relevancia en la valoración de la calidad de un forraje. El contenido relativo de carbohidratos solubles (CHne, lignina y carbono) son también indicadores importantes de la calidad, los que analizados junto con los contenidos de proteína bruta (PB) y FDA permiten una mejor valoración del potencial de cada recurso (Pordomingo *et al.*, 2004). La información sobre la producción y el perfil de calidad de CC de otoño/invierno en la región subhúmeda pampeana es escasa, en especial incluyendo los CHne, lignina y la relación LIG:N. Se ha comprobado que los CC pueden realizar un aporte significativo de C, incidiendo tanto sobre la cantidad como calidad de la MO (Wander & Traina, 1996; Andriulo *et al.*, 2001; Álvarez *et al.*, 2006a).

1.1. Hipótesis

La hipótesis principal de este estudio es que los componentes de calidad de los cultivos de cobertura son afectados por el ambiente y el sistema de cultivo. Para validar, se utilizó la avena, vicia y trébol en el otoño/invierno, puros y asociados.

1.2. Objetivo

Evaluar la producción y los parámetros de calidad de la biomasa aérea de los cultivos de cobertura de invierno bajo el sistema de siembra directa. Complementariamente se evaluaron parámetros de calidad de los residuos aportados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Características del área bajo estudio (ver cap. II)

Las características de los diferentes sitios de ensayo se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Condiciones de muestreo de los CC evaluados en el experimento. Características de los sitios de ensayos

Ensayo	MO	pH	P (ppm)	F.S.	CC evaluado	Lluvias	Días de crecimiento
E1	3,41	6,77	14	01/04/05	Vicia, Avena, Av. + Vic., Tr. Cob., Tr. Past.	187	252
E2	4,64	6,79	27,8	01/03/06	Vicia, Avena, Av. + Vic., Tr. Cob., Tr. Past.	369	239
E3	3,52	6,44	10,5	01/03/07	Vicia, Av. Fert., Av. S/Fert., Av. + Vic.	348	237
E4	3,41	6,48	21	07/03/07	Vicia, Av. Fert., Av. S/Fert., Tr. Bal.	415	237
E5	2,74	6,81	14	07/03/07	Vicia, Av. Fert., Av. S/Fert.	414	237

Avena + vicia; (Av. + Vic.), trébol cobertura (Tr. Cob.), trébol pastoreo; (Tr. Past.) trébol balanza (Tr. Bal.); avena fertilizada (Av. Fert.) avena sin fertilizar (Av. S/Fer.) Profundidad de muestreo (0-20cm)

2.2. Cultivos de cobertura (ver cap. II)

Todos los sitios de ensayo provenían de una rotación con antecesor trigo en SD. En los momentos de evaluación final la avena se encontraba en estado de plena floración y la vicia en inicio.

Las muestras fueron recolectadas con un marco de 0,25 m² con tres submuestras por tratamiento y repetición en los meses de junio y octubre de cada año. El material fue recolectado en bolsas y pesado en húmedo. Se midió peso verde en el campo y luego se llevó una alícuota a estufa con circulación de aire forzado a 60°C hasta lograr un peso constante y determinar contenido de materia seca (MS). Posteriormente, fue molido en un triturador de forraje, se tomaron submuestras de lo obtenido y nuevamente se realizó el proceso con el

molino Willey equipado con maya de 40 mesh. Sobre esa fracción seca y molida se procedió a realizar las siguientes determinaciones: a) Producción de forraje (Mg MS ha^{-1}), b) contenido de materia seca (%), c) nitrógeno total por el método de Kjeldahl (Bremner, 1996), d) composición química en laboratorio a través de los parámetros de fibra detergente neutra (FDN) y ácida (FDA, Goering & Van Soest, 1970), carbohidratos no estructurales (CHne, Bailey, 1958; Ovejero, 1987) y lignina (LIG.), e) carbono (C %, Analizador automático LECO Carbon analyzer, LECO Corporation St. Joseph, MI, USA) y f) celulosa (CEL.) y la relación LIG:N y C:N.

El análisis de la variancia (ANOVA) se realizó, para cada año por separado. Para los factores de naturaleza cualitativa (CC puros o asociados), las medias de los tratamientos fueron comparadas a través del Test de Diferencias Mínimas Significativas de Fisher LSD a 5 %. Para todos los ANOVAs dobles y simples fue utilizado el programa INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008). Para el factor cuantitativo (dosis de N-urea) se realizó análisis de regresión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Producción de materia seca de los cultivos de cobertura.

En todos los tratamientos, la producción de MS del año 2005 fue inferior a la obtenida en los años 2006 y 2007 (Tabla 19 y 20). Comparando en forma individual las especies utilizadas como CC, se obtuvieron valores medios de MS (2006 y 2007) que superaron en un 67% a la media de las mismas especies cultivadas en el año 2005. La MS total producida por la asociación de especies (avena + vicia), común a los tres años, resultó que la MS de 2006 fue 90 y 50 % mayor que la media de 2005 y 2007, respectivamente. Estas especies expresaron su máximo potencial de producción en el año 2006, en relación a los demás años y puede ser atribuido a dos factores: a) por un lado, las precipitaciones acumuladas durante los meses de marzo a octubre en los años 2006 y 2007 superaron a las del 2005 en 200 y 300 mm y b) por otro lado, la siembra de los CC en el año 2005 se realizó 30 días más tarde que en los años siguientes, 2006 y 2007. La emergencia de los CC fue muy lenta y tuvo, posteriormente, en otoño e invierno lluvias muy por debajo de la media histórica, que se normalizaron en los meses de septiembre y octubre y permitieron el desarrollo normal de los CC.

Considerando la media de los tres años, en los muestreos del mes de julio de 2005 y 2006, se observó que entre los cultivos de coberturas individuales, la avena sin fertilizar, presentó una producción de MS ($1,27 \text{ Mg ha}^{-1}$) inferior a la de vicia ($1,73 \text{ Mg ha}^{-1}$) y superior al trébol ($0,41$ y $0,39 \text{ Mg ha}^{-1}$, como cobertura o pastoreo, respectivamente). En los muestreos del mes de octubre, en promedio de los tres años y cinco sitios de ensayos, la avena obtuvo una producción de MS ($3,36 \text{ Mg ha}^{-1}$) superior a la de vicia ($2,45 \text{ Mg ha}^{-1}$) y a la de los tréboles ($1,09 \text{ Mg ha}^{-1}$). La superioridad de la avena sobre la vicia también fue observada por otros autores (Aita *et al.*, 1994; Da Ros & Aita, 1996; Heinrichs *et al.*, 2001) en estudios realizados en suelos del sur de Brasil. En Argentina, en condiciones similares de suelo y clima, los resultados fueron semejantes a los obtenidos por Barraco *et al.* (2009) y Quiroga *et al.* (2009). Se refuerza también la afirmación de Monegat (1991): la avena es un cultivo de mayor rusticidad y agresividad que el de las leguminosas, además de presentar la característica y capacidad de macollar. La elevada producción de MS de la avena en el segundo año ($6,43 \text{ Mg ha}^{-1}$) fue inferior a los $8,04 \text{ Mg ha}^{-1}$ obtenidos por Capurro *et al.* (2009) en Argiudoles típicos de la zona Marcos Juárez (Pcia. de Córdoba), bien provistos de materia orgánica. Quiroga *et al.* (2009), trabajando con centeno fertilizado ($4,91 \text{ Mg ha}^{-1}$) reportó valores superiores en Hapludoles de la región subhúmeda pampeana.

La MS total de los tratamientos con especies asociadas entre avena y vicia fueron en promedio de 2,27 y 3,34 Mg ha⁻¹ en las evaluaciones de julio y octubre de 2005 y 2006 respectivamente, superando a la de vicia y a la de avena pura en un 37 y 10 % cuando fueron las evaluaciones realizadas durante el mes de octubre. Comportamientos similares fueron obtenidos tanto por Baigorria & Cazorla (2009) en Argentina como por Amado *et al.* (2000) y Heinrichs *et al.* (2001) en la asociación entre avena + vicia en el sur de Brasil. También en condiciones de clima templado, las asociaciones de centeno (*Secale cereale* L.) y trébol encarnado (*Trifolium incarnatum* L.) y de centeno y vicia villosa (*Vicia villosa* Roth.), proporcionaron más MS a las de leguminosas y semejante a las de gramíneas, que cuando fueron cultivadas solas (Ranells & Waggoner, 1996; Vaughan & Evanylo, 1998). La mayor producción de la avena sola o asociada con vicia en el año 2006 y las diferencias en relación a los resultados obtenidos por Baigorria & Cazorla (2009) y Quiroga *et al.* (2009) puede ser atribuida a tres factores. En primer lugar, la mayor disponibilidad de N en el suelo en el E₂ del año 2006 como consecuencia de la fijación biológica de N por parte de la leguminosa, asociado a un nivel más alto de MO y fertilidad del suelo que en los sitios del año 2005 y 2007. Otro factor importante fue la alta acumulación de precipitaciones durante el período de crecimiento y desarrollo de los CC. Por último la presencia de plantas guachas de trigo en el área, provenientes del cultivo anterior en SD, aumentó la población de gramíneas en la mezcla y, consecuentemente, su competitividad en relación a la vicia, no ocurriendo lo mismo cuando la vicia fue sembrada sola en altas densidades.

El efecto benéfico de la disponibilidad de N sobre la performance de gramíneas, cuando están asociadas a leguminosas, es relatado en diversos trabajos (Vaughan & Evanylo 1998). Estos resultados indican que, además de la densidad de siembra de cada especie en la asociación entre avena + vicia, la mayor producción de MS de vicia en el año 2006, en los dos muestreos realizados, con respecto a la producción de esta misma especie en los años 2005 y 2007, son atribuidos a precipitaciones superiores a la media de los últimos 30 años (Tabla 19 y Tabla 20).

A través de estos resultados se puede inferir que en años con elevadas precipitaciones pluviométricas en el período anterior a la eliminación de los CC, la producción de MS de vicia en la asociación de avena + vicia puede ser equivalente o superior a la de leguminosa pura. La producción media en la evaluación de octubre de 2006 de los tréboles cobertura y pastoreo (1,57 Mg ha⁻¹) y en el 2007 de trébol balanza (1,18 Mg ha⁻¹), superaron en más del 100 % a la producción del año 2005. En la evaluación de julio de 2005 comparada con la de octubre del mismo año, la disminución en la producción de MS de los tréboles fue debido a las escasas

precipitaciones que se produjeron durante el ciclo de crecimiento. Estos factores determinaron una competencia de malezas y plantas guachas que hicieron disminuir su producción. Estas especies fueron poco estudiadas en la Argentina como CC. Estos resultados indican que, probablemente, en suelos con mayor disponibilidad de N, como en el 2006, en el caso de la avena del corte de octubre ($6,43 \text{ Mg ha}^{-1}$) presentó mayor tasa de crecimiento que la vicia, siendo su producción de MS en un 25 y 50 % superior a la avena + vicia y vicia respectivamente, compitiendo de esta manera mejor por los nutrientes del suelo, por el agua disponible y por la luz. Es de destacar que ninguno de estos CC fue fertilizado, reflejando aún más la buena fertilidad del suelo. La producción media de MS de los CC, en los tres años, fue de $2,49 \text{ Mg ha}^{-1}$, siendo de $2,21 \text{ Mg ha}^{-1}$ en los CC sembrados solos, sin fertilizar y de $3,03 \text{ Mg ha}^{-1}$ en los fertilizados, y de $3,34 \text{ Mg ha}^{-1}$ en aquellos asociados (avena + vicia) (Tabla 19 y Tabla 20). Estos resultados indican que los CC asociados son una alternativa viable en relación a los cultivos puros de cada especie, ya que fue posible aumentar la producción de MS en un 51% en los no fertilizados y solo en un 10% en los fertilizados. Resultados semejantes fueron obtenidos por Giacomini *et al.* (2001) trabajando con CC fertilizados y asociados (avena + vicia).

Tabla 19. Producción media de materia seca de la biomasa aérea de las especies de cultivos de coberturas del suelo, de otoño/invierno solas y asociadas.

MS Mg ha ⁻¹						
Año	Corte/sitio	Vic.	Av. S/Fert.	Av. + Vic.	Tr. Cob.	Tr. Past.
2005 E ₁	Julio	0,51 ab	0,47 ab	0,57 a	0,19 b	0,32 ab
	Octubre	1,29 c	3,4 a	2,11 b	0,56 d	0,56 d
2006 E ₂	Julio	2,95 a	2,06 c	2,56 b	0,63 d	0,46 d
	Octubre	3,22 bc	6,43 a	5,31 ab	1,83 c	1,32 c

Vicia (Vic.), avena sin fertilizar (Av. S/Fert.), avena + vicia, (50% + 50%) (Av. + V.), trébol cobertura (Tr. Cob.), trébol pastoreo (Tr. Past.). Medias seguidas de la misma letra en la fila, en cada año y época, no difieren entre sí por el test de Fischer 5%.

Tabla 20. Producción media de materia seca de la biomasa aérea de las especies de cultivos de coberturas del suelo, de otoño/invierno solas y asociadas.

MS Mg ha ⁻¹					
Año	Ensayo	Vic.	Av. Fert.	Av. S/Fert.	Tr. Bal.
2007	E ₃	3,13 a	3,34 a	1,89 b	
	E ₄	1,73 a	1,81 b	1,25 b	1,18 b
	E ₅	2,92 ab	3,93 a	2,4 a	

Vicia (Vic.), (avena sin fertilizar) (Av. S/Fert.), avena fertilizada, (Av. Fert.) trébol balanza (Tr. Bal.). Medias seguidas de la misma letra en la fila, en cada año y época, no difieren entre sí por el test de Fischer 5%.

A continuación, en la Tabla 21 se muestran los resultados de los parámetros de calidad de los CC estudiados, siendo luego analizados cada uno de ellos en forma particular.

Tabla 21. Parámetros de calidad de los CC evaluados durante tres años en sector de ventania. Concentración de celulosa (Cel.), hemicelulosa (Hemi.), lignina, carbohidratos no estructurales solubles (CHne), nitrógeno (N) de la biomasa aérea, C en g kg⁻¹ MS, LIG:N y C:N de las especies de cultivos de cobertura de otoño/invierno solas y asociadas en los años 2005/6/7.

Año	Corte/ Ensayo	CC	MS kg ha ⁻¹	Parámetros de calidad g kg ⁻¹ MS							
				Cel.	Hemi.	Lignina	CHne	N	LIG:N	C:N (Leco)	C Leco
2005 (E1)	Julio	Vic.	510 ab	248 ab	408 b	80,8 a	263,2 b	29,7 a	2,7ab	13,6 b	401,6
		Avena	470 ab	192 c	411 b	35,1 c	361,9 a	21,2 c	1,7 c	20,1 a	427
		Av.+ Vic.	570 a	198 c	408 b	37,9 bc	356,1 a	22,0 bc	1,7 c	19,2 a	421,2
		Tr. Cob.	190 b	291 ab	435 ab	51,4 b	222,6 b	26,2 ab	1,9 bc	14,9 b	383,8
		Tr. Past.	320 ab	319 a	458 a	78,5 a	144,5 b	22,5 bc	3,4 a	16,9 b	381,9
	Oct.	Vic.	1290 c	306 a	592 a	75,4 a	26 b	28,2 a	2,8 bc	15,0 b	424
		Avena	3400 a	295 a	608 a	48,6 b	48 b	11,5 b	4,3 a	36,3 a	417,5
		Av.+ Vic.	2110 b	292 a	616 a	51,5 b	40 b	14,7 b	3,5 ab	29,2 a	430,4
		Tr. Cob.	560 d	214 b	332 b	50,4 b	403 a	26,6 a	1,9 c	15,4 b	416,2
		Tr. Past.	560 d	227 b	370 b	58,4 b	344 a	29,8 a	1,9c	14,2 b	421,4
2006 (E2)	Julio	Vic.	2950 a	219 a	432 c	64,5 a	284,5b	35,1 a	1,8 a	11,26 c	395,2
		Avena	2060 c	229 a	550 a	47,2 a	173,8c	15,6 d	3,2 a	25,5 a	398,5
		Av.+ Vic.	2560 b	226 a	489 ab	39,7 a	244,4b	21,2 c	1,9 a	18,5 b	392
		Tr. Cob.	630 d	165 b	469 bc	71,5 a	293,7b	29,5 b	2,6 a	13,2 c	391,4
		Tr. Past.	460 d	131 b	377 d	68,7 a	422,1a	32,4 ab	2,1 a	12,35 c	400,4
	Oct.	Vic.	3220 bc	254 a	491 c	95,9 ab	157,9c	32,2 a	2,9 bc	12,36 c	398,3
		Avena	6430 a	279 a	644 a	68,9 bc	8,1d	10,2 d	6,8 a	39,06 a	398,5
		Av.+ Vic.	5310 ab	261 a	553 a	65 bc	121c	19,1 c	3,4 bc	19,1 b	364,9
		Tr. Cob.	1830 c	168 b	438 d	107,5 a	286,5b	26,9 b	3,9 b	14,7 bc	394,2
		Tr. Past.	1320 c	177 b	356 e	55,3 c	411,7a	28,1 b	1,9 c	14,07 c	395,4
2007	Ensayo 3	Vic.	3130 a	257 a	618 a	61,1 c	63,9 b	39,6 a	1,5 c	11 c	434,8
		Avena Fert.	1890 b	209 b	619 a	110,2 ab	61,8 b	18,5 d	5,9 a	22,2 b	411,8
		Avena S/Fert.	3340 a	235 ab	509 b	92,87 bc	163,7 a	21,8 c	4,3 b	19,6 a	427,5
		Av. + Vic.	2610 ab	180 b	610 a	135,30 a	74,7 b	35,4 b	3,8 b	12,3 c	433
	Ensayo 4	Vic.	1730 a	215 a	520 a	61,1 c	66,9 c	42,3 a	3,7 a	9,4 b	397,4
		Avena Fert.	1810 a	211 a	615 ab	110 ab	48,1 c	22,2 c	2,9 a	18,07 b	401,2
		Avena S/Fert.	1250 b	209 a	497 b	92,8 bc	201,2 a	21,1 b	2,9 a	20,13 a	424,9
	Ensayo 5	Tr. Balan.	1180 b	194 a	571 b	135,3 a	99,7 b	31,53 b	4,1 a	13,4 b	424,5
		Vic.	2920 ab	248 a	625 a	74,7 a	52,3 b	44,47 a	1,7 b	9,5 b	422,3
		Avena Fert.	2400 b	235 ab	629 a	81,3 a	54,7 b	17,77 b	5,1 a	23,06 a	409,8
		Avena S/Fert.	3930 a	213 b	535 b	92,3 a	159,7 a	16,03 b	5,3 a	26,02 a	417,2

Medias seguidas de la misma letra en la columna, en cada año y época, no difieren entre sí por el test de Fischer 5%. Vicia, (Vic.); Avena + vicia (Av. + Vic.), trébol cobertura (Tr. Cob.), trébol pastoreo (Tr. Past.), trébol balanza (Tr. Balan.), avena fertilizada (Av. Fert.) avena sin fertilizar (Av. S/Fert.).

3.2 Nitrógeno acumulado en la biomasa aérea de los cultivos de cobertura

La cantidad de nutrientes acumulada en la biomasa aérea de los CC depende de la concentración de estos nutrientes o compuestos carbonados en el tejido vegetal y de la MS producida (Barraco *et al.*, 2009). En cultivos puros, la cantidad de N acumulada por la vicia, en el 2005, 2006 y 2007 fue superior a la avena con y sin fertilizante y en la mayoría de las mediciones a los diferentes tréboles utilizados (Tabla 22 y 23). En promedio, en los tres años y los 5 sitios de ensayos evaluados, la vicia acumuló cerca de 90 kg ha⁻¹ de N, 67 kg ha⁻¹ en la avena fertilizada, 63,6 kg ha⁻¹ en avena + vicia, 38 kg ha⁻¹ en la avena sin fertilizar y 25,31 kg ha⁻¹ en los tréboles.

La elevada cantidad de N aportado por la vicia y los tréboles en relación a la avena sin fertilizar se debe a la capacidad que tienen estas especies de fijar el N₂. Las cantidades de N acumuladas por la avena dependen, principalmente, de la capacidad de absorber el N aportado por el suelo. La vicia acumuló 105 kg ha⁻¹ de N en la media de las dos evaluaciones realizadas en el segundo año y 43,5 kg ha⁻¹ de N en el primer año (Tabla 22). Esta diferencia, también observada en la producción de MS, probablemente fue consecuencia de dos factores, por un lado a la acumulación de lluvia inferior al promedio histórico durante el período de crecimiento de los CC en el primer año y por otro, a la siembra realizada en el mes de abril. Ya en el segundo año, las precipitaciones acumuladas durante todo el período de crecimiento superaron en más del doble a las del primer año (ver capítulo 2) y la fecha de siembra se realizó 30 días antes que en el primer año. Las lluvias de otoño influyeron directamente en la inmediata implantación de los CC y en su producción de MS. Resultados similares a este estudio fueron obtenidos por Acosta (2009).

La cantidad de N acumulado por la asociación de avena + vicia en los dos primeros años no difirió de la vicia pura en la mayoría de los muestreos realizados, y en general, siempre fueron superiores a la avena fertilizada, sin fertilizar y a los tréboles. En el segundo año la cantidad de N en la asociación de avena + vicia fue superior en un 50% a la avena sin fertilizar y en un 20% a la fertilizada en el último año (Tabla 22 y 23). Estudios realizados por Basso (1999), Amado *et al.* (2000) y Heinrichs *et al.* (2001) evidencian que la asociación de avena + vicia, puede proporcionar una acumulación de N equivalente al de las leguminosas puras, y superior al de las gramíneas. Estas características, junto con la producción de MS, indican que la asociación entre avena y vicia es una alternativa promisoriosa para sistemas que necesitan, simultáneamente, de la protección del suelo contra los procesos erosivos y oferta de N a los cultivos en sucesión. En los tres años de experimentación la cantidad de N acumulado por la mezcla de leguminosa y

gramínea (50% avena + 50 % vicia) se alcanzó en promedio el 78% del N acumulado por la vicia sola. Estos resultados son semejantes a los obtenidos por Giacomini *et al.* (2004) que obtuvo un 79% del N acumulado por la vicia, utilizando una mezcla 45% de avena y 55% de vicia. Estos valores evidencian el potencial de la vicia en producir MS y fijar N₂, enriqueciendo la biomasa aérea en N.

En cuanto a los tréboles utilizados, el promedio de aporte de N al sistema fue de tan solo un 28 % del obtenido con vicia. Según resultados obtenidos por Giacomini (2001), las diferencias en las cantidades de MS y de N de la avena y la vicia, asociadas en diferentes proporciones deben condicionar la dinámica de descomposición y liberación de N después de su eliminación. De esta manera Giacomini *et al.* (2004) concluyen que la definición de las densidades a utilizar de cada especie depende de los objetivos priorizados. Si la mayor necesidad es de protección del suelo contra la erosión, a través de la persistencia de los residuos en superficie, se debe aumentar la proporción de avena en la asociación. Por otro lado, si la prioridad es mejorar el balance de N en el suelo se debe aumentar la densidad de semillas de vicia. Analizando las cantidades de N acumulado por la avena (Tabla 23), cuando se fertiliza se obtiene un 76% más de N que sin fertilizar. Tales resultados confirman aquellos obtenidos por Aita *et al.* (2001) demostrando que la avena, además de contribuir con la incorporación de MS y carbono al suelo, también, puede contribuir para la disminución de las pérdidas de N por lixiviación de nitratos en el perfil del suelo durante el otoño/invierno. Los resultados obtenidos en la acumulación de N por los CC evidencian la superioridad de la vicia en relación a la avena, cuando se presenta en cultivos puros. Cuando estas dos especies son asociadas, es posible combinar la capacidad de la avena en absorber el N disponible del suelo y de la vicia en fijar el N₂ atmosférico, resultando esto en una acumulación de N en la biomasa aérea equivalente al de la leguminosa pura.

Tabla 22. Producción media de nitrógeno de la biomasa aérea de las especies de cultivos de cobertura del suelo, de otoño/invierno solas y asociadas.

		N kg ha ⁻¹				
Año	Corte/sitio	Vic.	Av. S/Fert	Av. + Vic.	Tr. Cob.	Tr. Past.
2005 E ₁	Julio	53,1 a	32,8 b	43,8 ab	23,7 b	26,1 b
	Octubre	33,9 a	38,6 a	31 a	15,1 b	16,6 b
2006 E ₂	Julio	104 a	32,1 c	54 b	22,3 b	15 d
	Octubre	106 a	65,8 b	96,1 a	48,3 bc	37 c

Vicia (Vic.), avena sin fertilizar (Av. S/Fert.), avena + vicia, (50% + 50%) (Av. + Vic.), trébol cobertura (Tr. Cob.), trébol pastoreo (Tr. Past.). Medias seguidas de la misma letra en la fila, en cada año y época, no difieren entre sí por el test de Fischer 5%.

Tabla 23. Producción media de nitrógeno de la biomasa aérea de las especies de cultivos de cobertura del suelo, de otoño/invierno solas y asociadas.

N kg ha ⁻¹					
Año	Ensayo	Vic.	Av. Fert.	Av. S/Fert.	Tr. Bal.
2007	E ₃	124 a	71,5 b	35 c	
	E ₄	74 a	60,1 a	27,7 b	37,5 b
	E ₅	130 a	70 b	38,3 b	

Vicia (Vic.), avena sin fertilizar (Av S/Fert.), avena fertilizada, (Av. Fert.) trébol balanza (Tr. Bal.). Medias seguidas de la misma letra en la fila, en cada año y época, no difieren entre sí por el test de Fischer 5%.

3.3 Producción de C en los cultivos de cobertura

La producción de C de los CC es uno de los parámetros de calidad de mayor importancia para la sustentabilidad de los sistemas y el contenido de C estaría directamente relacionado con los niveles de MO en el suelo (Wander & Traina, 1996; Andriulo *et al.*, 2001; Giacomini, 2001; Álvarez *et al.*, 2006b). En las Tablas 24 y 25 se muestran los contenidos de C medios en porcentajes y determinados por el Analizador automático (LECO), confirmando que no existen grandes variaciones entre diferentes especies y momentos (40 y 42%), resultados similares a los obtenidos por Acosta (2009). El valor más bajo obtenido en el trébol pastoreo de julio de 2005, se debe a su escaso crecimiento por falta de precipitaciones y por haber estado la muestra contaminada con suelo.

Tabla 24. Contenido de carbono (C) de la biomasa aérea de las especies de cultivos de cobertura del suelo, de otoño/invierno solas y asociadas. Año 2005/06

Año	Corte	Carbono (%)				
		Cultivos de cobertura				
		Vic.	Avena	Av. + Vic.	Tr. Cob.	Tr. Pas.
2005	Julio	40,16	42,7	42,12	38,38	34,19
	Octubre	42,4	41,75	43,04	41,62	42,14
2006	Julio	39,52	39,85	39,2	39,14	40,04
	Octubre	39,83	39,85	34,49	39,42	39,54

Vicia (Vic.), Avena + vicia (50 % + 50 %) (Av. + Vic.), trébol cobertura (Tr. Cob.) y trébol pastoreo (Tr. Past.).

Tabla 25. Contenido de carbono (C) de la biomasa aérea de las especies de cultivos de cobertura del suelo, de otoño/invierno solas. Año 2007

Año	Ensayo	Carbono (%)	
		Cultivos de cobertura	
		Vicia	Avena
2007	E3	43,48	42,75
	E4	39,74	42,49
	E5	42,23	41,72

3.4 Contenido de celulosa, hemicelulosa, carbohidratos no estructurales solubles (CHne) y lignina

Una característica todavía poco estudiada en los CC es la concentración en la biomasa de los parámetros de calidad de un forraje como son: celulosa, lignina y carbohidratos no estructurales solubles (CHne). Estos parámetros son esenciales en la tasa de descomposición de los residuos de cultivos en el suelo. Considerando la media de los dos primeros años (2005 y 2006) y las dos épocas de muestreo, las concentraciones de celulosa del tejido vegetal de la vicia en comparación con la de avena, estuvo en función de la cantidad de MS total producida. En el primer muestreo de julio para vicia y avena fueron de 233 vs 210 g kg⁻¹ MS y en el segundo muestreo de octubre, para las mismas, fue de 280 vs 287 g kg⁻¹ MS (Tabla 21 y Figura 28). Cuando se analizó la concentración de lignina para los mismos años y momentos de muestreos se observó que la vicia superó en promedio a la avena en 72,68 vs 41,2 g kg⁻¹ MS y 85,66 vs 58,82 g kg⁻¹ MS, representando un 43 y 31% más de concentración de lignina en vicia que en avena (Tabla 21).

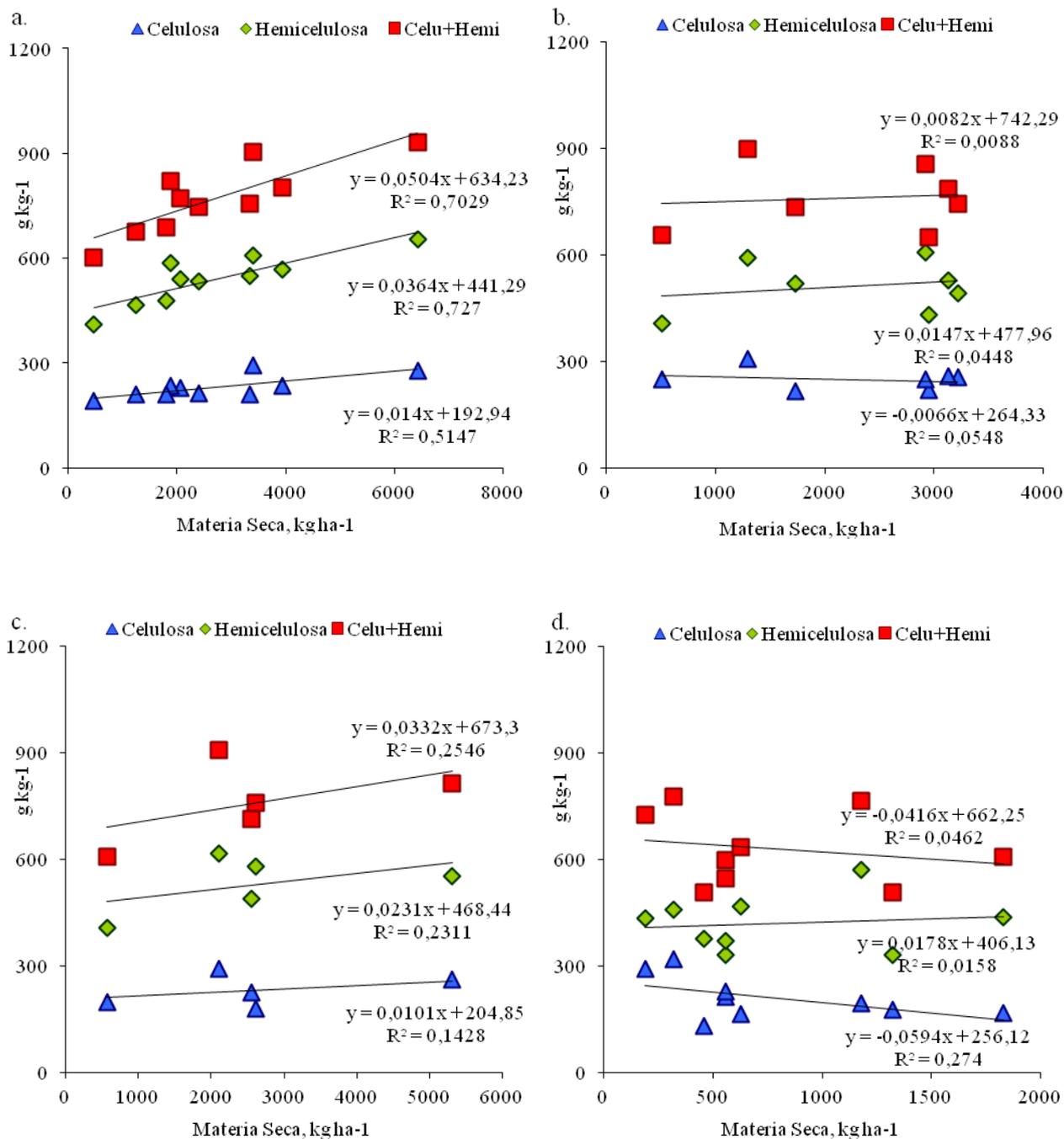


Figura 28. Concentración de celulosa, hemicelulosa y celulosa + hemicelulosa de los diferentes cultivos de cobertura en función de la cantidades de residuos aportados al suelo. Media del 2005, 2006 y 2007. a) avena, b) vicia, c) avena + vicia, d) trébol.

En cuanto a los CHne evaluados en el año 2005 los niveles de concentración fueron superiores en la avena con respecto a la vicia, inferiores en el 2006 y sin diferencias significativas en el 2007 (Tabla 21). Estas variaciones en la concentración de los parámetros de calidad de los CC deben estar relacionadas a las variedades analizadas en cada estudio, como así también, al estadio de crecimiento y desarrollo en que las mismas fueron recolectadas. Los

cultivos en los dos primeros años soportaron un promedio de 90 heladas. La proporción de tallos con respecto a hojas en el primero y segundo año fue mayor, en especial en el segundo muestreo. La vicia creció durante todo el otoño en óptimas condiciones e ingresó al invierno con una planta cuyo desarrollo fue el adecuado, permitiéndole así soportar las heladas del invierno y retomar su crecimiento en primavera. Esta especie acumuló mayor cantidad de tejido lignificado al momento del segundo corte (floración). En el caso de la avena, presentó un óptimo crecimiento en los primeros meses del otoño, pero las primeras heladas de otoño/invierno lo detuvieron. Cuando retomó su desarrollo, en la primavera, la proporción de hojas con respecto a tallos era mayor, teniendo una gran cantidad de macollos nuevos con alta proporción de hojas y tejidos más blandos en prefloración. La velocidad de descomposición, a su vez, está relacionada con el tenor de lignina y con la relación C:N de los residuos (Heinrichs *et al.*, 2001). Cuanto mayores son la concentración de lignina y la relación C:N en la MS, más lenta es la descomposición (Aulakh *et al.*, 1991; Mary *et al.*, 1996). Esta constatación, vinculada a los resultados del presente estudio, permite prever que los residuos de cultivos con elevadas concentraciones de lignina serán descompuestos más lentamente. Esto puede explicar en parte la mayor lentitud en la degradación de la vicia principalmente en el año 2006, a pesar de que su relación C:N fue baja. Cuando se analiza la concentración de lignina en la asociación de avena + vicia en los años 2005 y 2006 y en promedio de las dos época evaluadas, se encuentra un 31 y 46 % menos de lignina en esta mezcla cuando es comparada con la vicia pura. Esto indicaría que, para las condiciones de este estudio, la inclusión de la avena en la mezcla reduce los contenidos de lignina en la biomasa aérea de la asociación avena + vicia.

Para el caso de la avena, se puede inferir que cuando no se tienen datos de la calidad de los residuos en base a los resultados obtenidos en este estudio, es posible realizar una estimación de su contenido de celulosa y hemicelulosa. Como la proporción de lignina fue aproximadamente constante para las distintas cantidades de MS, los CHne mostraron una variación inversa a los contenidos de celulosa y hemicelulosa (Figura 29 a).

3.5 Relación C:N y LIG:N

Con la asociación de avena + vicia, además de incorporar nitrógeno, se proporcionó una producción de MS con una relación C:N intermedia a la de aquellas especies en cultivos puros. Con esta asociación, se procura interferir en la tasa de descomposición de los residuos de cultivos proporcionados y al mismo tiempo en la cobertura de suelo, en concordancia con el ofrecimiento y demanda de nutrientes por los cultivos de cosecha.

La vicia, los tréboles cobertura, pastoreo y balanza puros fueron las especies que presentaron la menor relación C:N (media 14,6, 14,3 y 13,4) comparada con la avena que fue de 30,5 (Tabla 21) para los tres años y las dos épocas de evaluación. La relación C:N de la avena + vicia se situó en un valor intermedio a la avena y las leguminosas (media 21,5). Tales resultados están de acuerdo con aquellos obtenidos en diversos trabajos que se realizaron bajo diferentes condiciones edafoclimáticas (Das Ros, 1993; Ranells & Wagger, 1996, Clark *et al.*, 1997; Amado *et al.*, 2000; Heinrichs *et al.*, 2001; Giacomini *et al.*, 2004).

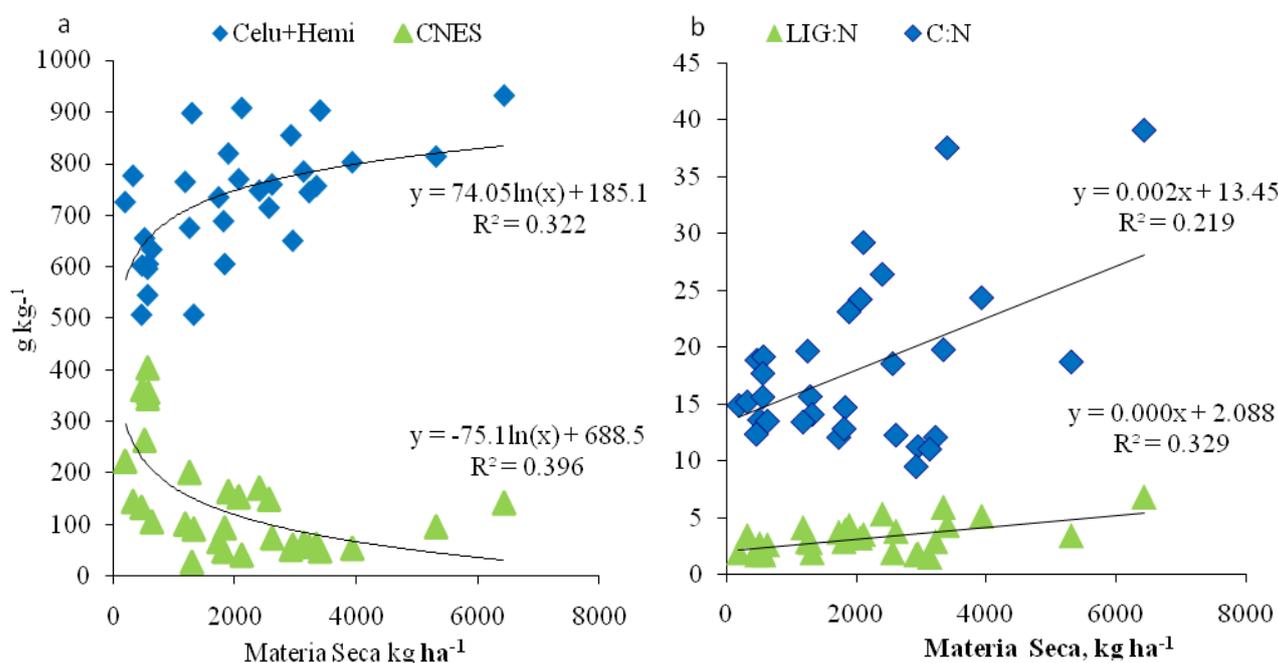


Figura 29. a) Concentración de celulosa + hemicelulosa y CHne) en función de las cantidades de residuos aportados al suelo. b) Relación C:N y LIG:N. Media de todos los cultivos de cobertura para los años 2005, 2006 y 2007.

La incorporación de la asociación de avena + vicia, provocó un aumento de los valores de C:N en la biomasa aérea. Con una mezcla de 50 % vicia y 50 % de avena, la relación C:N aumentó de 12,9 a 21,4 (Tabla 21). La influencia de la avena en la relación C:N de la asociación con vicia fue demostrada por Heinrichs *et al.* (2001) donde C:N aumentó de 18,2 con un 10% de avena hasta 27,2 cuando la proporción de avena se incrementó hasta un 75%. Resultados similares fueron obtenidos por Barraco *et al.* (2009), trabajando con mezclas de triticale + vicia y centeno + vicia (26,7 y 24,5). La relación C:N de los materiales orgánicos ha sido el parámetro más estudiado para prever la ocurrencia de mineralización o inmovilización de N disponible durante su descomposición. Para Allison (1966) cuando la relación C:N se sitúa entre los valores de 25 y 30, hay un equilibrio entre mineralización e inmovilización.

Utilizando estos valores como base, Giacomini *et al.* (2004) infirieron que en los tratamientos con vicia y nabo la mineralización, podían superar a la inmovilización, resultando en un aumento de la disponibilidad de N en el suelo durante la descomposición de los residuos de cultivos. Además del valor absoluto de la relación C:N, la calidad de los constituyentes carbonados y nitrogenados del tejido vegetal ejercen una fuerte influencia sobre la dinámica del N en el suelo (Handayanto *et al.*, 1997). A pesar de esto, todavía son escasos los resultados de investigación donde se tiene en cuenta la composición bioquímica de los CC y su influencia en la tasa de descomposición de los residuos de cultivos. En el primero y segundo año, la presencia de avena en la asociación con vicia, presentó valores de relación C:N inferiores a la avena sembrada sola (Tabla 21 y Figura 30 a,c). Tales resultados pueden ser atribuidos al aumento en la concentración de N en la avena cuando se asocia con vicia. Allí la población de plantas es menor que cuando se siembra sola; por esto, habría una menor competencia entre plantas por el N disponible en el suelo. Además, la senescencia precoz de nódulos, la descomposición de tejido vegetal, especialmente de hojas más viejas, y la excreción de exudados radiculares ricos en N de la leguminosa pueden favorecer la acumulación de N por parte de la gramínea (Ta & Farris, 1987). Esa disminución de la relación C:N de la avena con el aumento en la proporción de vicia disminuye el potencial de inmovilización de N durante la descomposición de los residuos, proceso que se observa, frecuentemente, con residuos de gramíneas.

Los valores en la relación LIG:N fueron siempre menores a los obtenidos en la relación C:N en todas las especies evaluadas (Figura 29 b y Figura 30 a,b,c,d), observándose una tendencia similar a la relación C:N. En la Tabla 21 se muestra que la relación LIG:N de los CC donde alcanzó un valor máximo de 6,76, exclusivamente, en avena del corte de octubre del 2006 E₂ y un mínimo de 1,51 con vicia como cultivo puro en el año 2007 E₃. En la asociación de avena + vicia, la relación LIG:N varió de acuerdo con la especie predominante. En el segundo corte del año 2006 E₂, esa relación fue de 3,43 mientras que, alcanzó el valor de 3,83 en el año 2007 E₃ (Tabla 21). Este aumento en la relación LIG:N fue causado por una mayor presencia de esta gramínea en la asociación con la leguminosa. Estas relaciones están dentro de los rangos críticos obtenidos por Quemada & Cabrera (1995).

Aunque diversos estudios indiquen que la tasa de descomposición de los residuos de cultivos es inversamente proporcional a su concentración de lignina (Ranells & Wagger, 1996; Trinsoutrot *et al.*, 2000), esto no fue observado en el presente estudio. Tomando como ejemplo los CC puros de avena y vicia, se observó que la gramínea, a pesar de haber presentado menor proporción de lignina (58,4 g kg⁻¹) que la vicia (76,3 g kg⁻¹), fue más lentamente descompuesta

que la leguminosa (ver cap. 5). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Aita & Giacomini (2003). Por otro lado, se observó que la relación entre LIG:N y la concentración de CEL de los residuos de CC fueron los mejores indicadores en la dinámica de su descomposición (Figura 29 a,b y Figura 30 a,b). Tales resultados ponen en evidencia que la concentración de lignina puede no ser un buen indicador de la velocidad de descomposición de los residuos de CC.

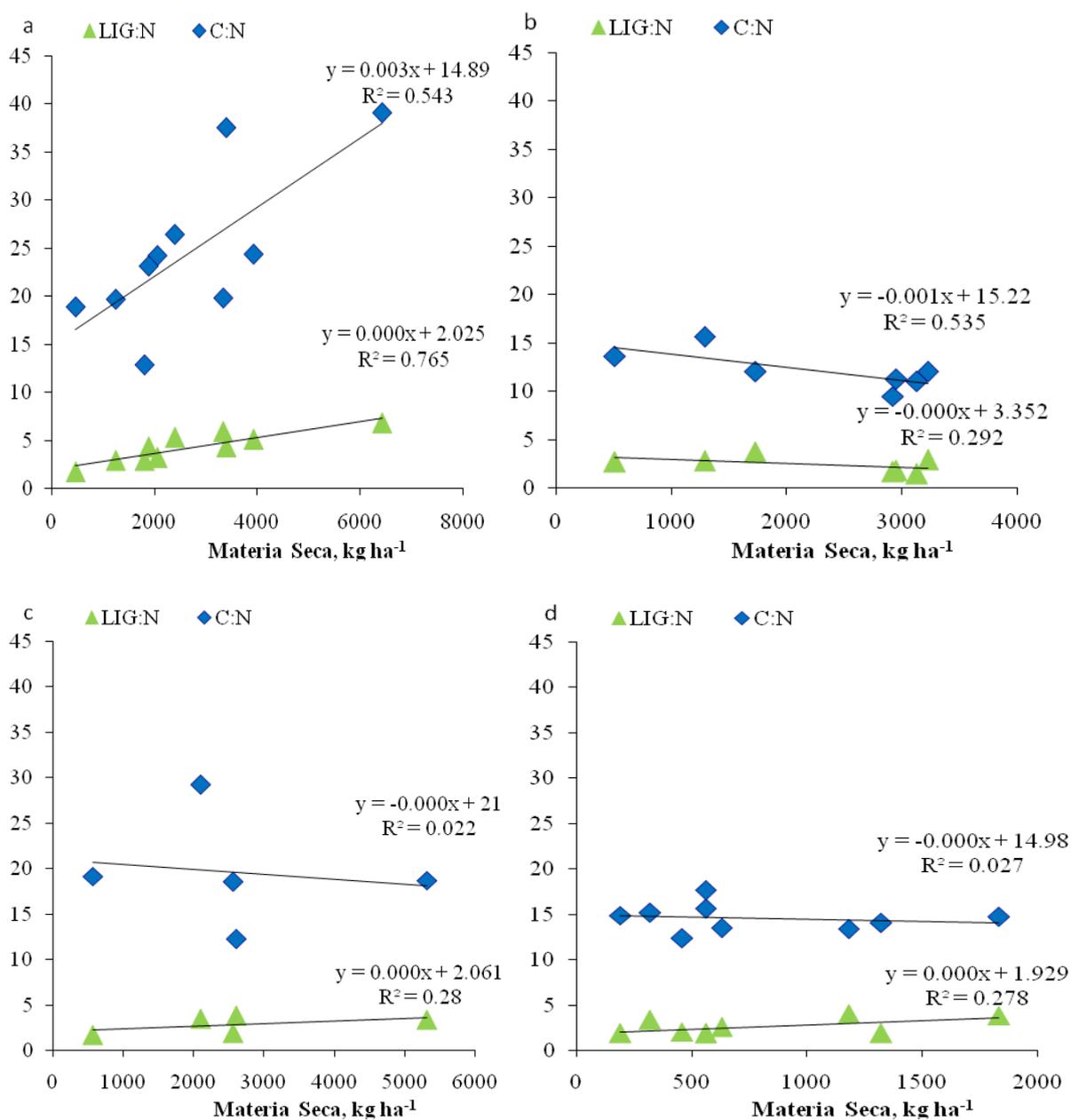


Figura 30. Relación C:N y LIG:N de los diferentes cultivos de cobertura en función de las cantidades de residuos aportados al suelo. Media del 2005, 2006 y 2007. a) avena, b) vicia, c) avena + vicia, d) trébol.

4 CONCLUSIONES

- La biomasa aérea de avena presentó las menores concentraciones de N y las mayores correspondieron a vicia en todos los años evaluados.
- Cuando la avena fue fertilizada se lograron incrementar los niveles de residuos aportados al suelo con respecto a la avena sin fertilizar. La cantidad de MS fue un buen indicador de su calidad.
- Los diferentes CC presentaron relaciones de C:N y LIG:N y contenidos de celulosa, hemicelulosa y carbono que estuvieron en función a las cantidades de MS producida por la biomasa aérea del cultivo.
- La biomasa aérea de vicia, en promedio de los tres años analizados, presentó las mayores producciones y concentraciones de lignina, debido al estado de crecimiento en el momento del corte y a las condiciones climáticas favorables.
- Los parámetros evaluados caracterizaron la calidad de los residuos de CC y estos podrían tener su efecto en la disponibilidad de N y C en el suelo para el cultivo siguiente.
- La asociación entre diferentes especies de CC de otoño/invierno afectó la producción y la composición química de la biomasa producida en relación a los cultivos puros. Con el aumento de la producción de MS se modifica la calidad del material en forma variable, según las especies que integran la asociación y su proporción.

CAPÍTULO V

DINÁMICA DE DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS DE CULTIVOS DE COBERTURA COMO ANTECESORES DE MAÍZ BAJO SIEMBRA DIRECTA

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la descomposición de residuos de cultivos, de la liberación de carbono y nitrógeno junto con el rol de los microorganismos en un sistema agrícola, es fundamental para la comprensión de procesos como la formación de materia orgánica (MO), el mantenimiento de la fertilidad y la sustentabilidad de los suelos (Cordone *et al.*, 1996; Gonçalves *et al.*, 2010b).

La dinámica de descomposición de los residuos es un aspecto muy complejo y poco estudiado todavía, aspecto que se refleja en la bibliografía, donde varios trabajos intentaron explicar dicha complejidad (Mary *et al.*, 1996).

Según Alvarenga *et al.* (2007), la tasa de descomposición del material de cobertura depende de los factores que influyen directamente en el metabolismo de los organismos descomponedores de suelo, los principales responsables. En particular, las condiciones climáticas, precipitaciones y temperatura, la naturaleza del residuo (composición química, relación de C:N, tamaño, etc.) y el manejo que se realice.

Los rastrojos de los cultivos representan la fuente más importante para retornar MO al suelo, y mediante un adecuado manejo permiten conservar el agua, reducir el riesgo de erosión y proveer nutrientes durante su descomposición. Para lograr estos objetivos, es necesario conocer el ritmo de descomposición, los factores que lo modifican y en qué forma lo hacen (Cordone *et al.*, 1991; Cordone & Galantini, 1994; Alvarenga *et al.*, 2007). De esta forma, se puede modificar mediante el manejo la cantidad de partida o su calidad.

El sistema de SD tiene como base el no movimiento de suelo. El mantenimiento de una cobertura vegetal sobre el mismo, a través del aporte de residuos de cultivos es clave para el éxito del sistema. La velocidad de descomposición de los residuos de cultivos determina el tiempo de permanencia de la cobertura en la superficie del suelo. Este tiempo es variable, conforme a la constitución de los diferentes tejidos vegetales, existiendo especies consideradas de descomposición rápida, como las leguminosas y de descomposición lenta, como son las

gramíneas (Wieder & Lang, 1982; Gregorich *et al.*, 1994; Álvarez & Lavado, 1998; Rasmussen, 1999; Hevia *et al.*, 2003; Klienmann *et al.*, 2006; Sá *et al.*, 2009).

La concentración de nutrientes, carbohidratos estructurales y otros componentes (Ej: lignina y otros polifenoles) han sido utilizados para caracterizar la calidad bioquímica de los residuos de cultivos (Heal *et al.*, 1997). Se determinaron carbohidratos solubles (Oglesby & Fownes, 1992; Kuo & Sainju, 1998), celulosa (Bending *et al.*, 1998), la relación C:N (Tian *et al.*, 1992; Jama & Nair, 1996; Janssen, 1996; Mary *et al.*, 1996) y la lignina (Müller *et al.*, 1988; Giller & Cadisch, 1997), LIG:N (Buchanan & King, 1993). Ejemplos de la aplicación de estos componentes lo constituyen los modelos CENTURY (Parton *et al.*, 1994) y GRAPLANT (Hunt, 1977), donde para caracterizar diferentes tipos de residuos, utilizaron una división en compartimentos metabólicos y/o funcionales (“lábil”) (Ej: carbohidratos, concentración de nutrientes) y estructurales y/o morfológicos (“resistentes”) (Ej: celulosa y lignina), siendo función de dichos compartimentos e indicadores de calidad la relación LIG:N y C:N (Cotrufo *et al.*, 2010).

Otros factores como el régimen hídrico (Parton *et al.*, 2007), la temperatura (Koenig *et al.*, 1994) y el contenido de N en el tejido vegetal (Mary *et al.*, 1996; Parton *et al.*, 2007) han sido aplicados para describir la descomposición de residuos y/o tasas de mineralización de C y N. Tian *et al.* (1993) y Sá *et al.* (2009) destacan que la descomposición es inversamente proporcional al tenor de lignina y a la relación C:N. Los residuos con relación C:N mayores de 25 forman coberturas más estables en el suelo y menores de 25 se descomponen más rápidamente (Ej: leguminosas). Diversos autores han sugerido niveles críticos, principalmente de relación C:N, entre 30 y 40:1 (Vigil & Kissel, 1988), y entre 15 y 25:1 (Enwezor, 1967), que separan el predominio de la inmovilización o de la mineralización, durante la descomposición. No obstante, estos varían con el tipo de planta y estadio de maduración en que estas son adicionadas al suelo (Monteiro *et al.*, 2002).

Los carbohidratos (CH) son un pool del carbono orgánico (CO) que está relacionado con los atributos físicos y biológicos del suelo, ya que estos compuestos afectan positivamente la estructura del suelo y son fuente de energía para los microorganismos. Los carbohidratos solubles en agua caliente (CHs) representan una fracción carbonada altamente lábil de los carbohidratos totales (CHt) y corresponden a los polisacáridos extracelulares o no celulósicos predominantes de origen microbiano (Gregorich *et al.*, 1994).

En general, los carbohidratos presentan una variabilidad temporal más pronunciada que el CO, asociada a los cambios de la humedad del suelo, la temperatura y las precipitaciones (Haynes, 2005), así como a la cantidad y calidad de los residuos vegetales aportados al suelo.

Esta fracción carbonada es más influenciada por las prácticas de manejo que el CO, pero la asociación con la fracción arcilla puede prevenir que sean degradados rápidamente por los microorganismos, debido a la protección física que esta ejerce. Kuo *et al.* (1997) y Ball *et al.* (1996) encontraron que esta fracción puede ser un buen indicador de la calidad de la MO, en cortos períodos.

En trabajos de investigación llevados adelante por Hevia *et al.* (2008) a lo largo de dos años de muestreo de un Hapludol éntico de la región semiárida pampeana, y luego de cinco años de efectos acumulados de la SD con escaso aporte de residuos en comparación a sistemas de labranza vertical (LV) y labranza convencional (LC), concluyeron que, la mayor variabilidad temporal que presentaron los carbohidratos totales en SD, que en LV y LC, estaba más asociada a los diferentes tipos de residuos vegetales (rastros) que se incorporan al suelo en cada estadio de la rotación y no tanto al tipo de labranza.

En modelos como el CENTURY (Parton *et al.*, 1994) se utilizó la relación lignina:N como indicador para el fraccionamiento de los residuos de cultivos fácilmente descomponibles (carbohidratos solubles y proteínas), carbohidratos estructurales insolubles (fibras y lignina). Quemada & Cabrera (1995) trabajando con residuos de hojas y tallos de diferentes especies obtuvieron niveles críticos de lignina:N entre 1 y 1,5:1 para hojas “lábil” y entre 10 y 15:1 para tallos (resistentes). Estos componentes bioquímicos controlan los cambios de descomposición de residuos en el tiempo. Los nutrientes solubles son más importantes en estadios tempranos de descomposición y carbohidratos estructurales insolubles y lignina en estadios más tardíos (Wieder & Lang, 1982; Heal *et al.*, 1997). Bertol *et al.* (1998, 2004) y Acosta (2009), verificaron que la avena negra después de 160 días de incorporada al suelo, presentó una disminución superior al 50% de la materia seca remanente (MSR) y que el aporte de N aceleró estos procesos. Silva *et al.* (1997) evaluaron la velocidad de descomposición de diferentes CC en suelos descubiertos de los cerrados nativos (Brasil), utilizando bolsas de descomposición de residuos colocadas en la superficie del suelo y obtuvieron disminuciones de MSR que variaron desde 60 a 78% en los primeros 60 días.

Comparando sistemas de SD con LC, Gonçalves *et al.* (2010a) concluyeron que en SD la descomposición de residuos de soja y maíz fue más lenta que en LC y al final del ciclo de estudio el remanente de residuos fue un 16 a 17 % superior en SD. Resultados similares a estos fueron obtenidos por Cordone *et al.* (1991, 1996) al evaluar la dinámica de residuos de avena.

Algunos estudios, relacionando la persistencia de residuos vegetales en la superficie del suelo, con la temperatura y la humedad, han mostrado que esa relación es de tipo exponencial negativa (Hunt, 1977; Wieder & Lang, 1982) con pequeña influencia de esas variables sobre la

descomposición de residuos. En otros trabajos, se ha observado relación exponencial negativa entre cantidades de residuos vegetales sobre la superficie y el tiempo de exposición de esos residuos en el suelo (Stroo *et al.*, 1989; Bertol *et al.*, 1998) y en otros se observó relación lineal negativa (Douglas Jr. *et al.*, 1980; Stott *et al.*, 1990) con gran influencia de la variable tiempo sobre la descomposición de residuos. De la misma forma, surgieron modelos y estudios para la obtención de tasas de descomposición que tienen en cuenta el rol de la temperatura, la humedad, niveles de nutrientes y sus interacciones (Schomberg & Steiner, 1994; Ruffo & Bollero, 2003b; Quemada, 2004). Específicamente, en el caso de estudios de descomposición de residuos de cultivos, algunos modelos que se encuentran en la literatura fueron también descritos por Gregory *et al.* (1985) y Gilmour *et al.* (1998) para la descomposición de residuos de soja, maíz, trigo y girasol.

En los estudios de descomposición es común colocar residuos vegetales en bolsas de fibra de nylon utilizando una apertura de malla de 2 mm de diámetro. Douglas Jr. *et al.* (1980) y Henrot & Brussaard (1997) verificaron que estas prácticas no promueven alteraciones significativas cuando son comparadas con condiciones a campo. No obstante, Stroo *et al.* (1989) afirmaron que estas bolsas causan un impedimento físico a la entrada de ciertos componentes de la fauna y micro-fauna del suelo, la colonización por hongos, la disminución en la lixiviación de la paja y la protección contra las gotas de lluvia. Schunke (1998) en una amplia revisión bibliográfica destaca que, a pesar de que el método puede subestimar la descomposición real, se tiene asumido que los resultados de estos estudios reflejan con cierta confiabilidad la característica de descomposición del material en su hábitat normal, pudiendo ser utilizado para comparaciones entre especies, regiones y otras evaluaciones más sofisticadas.

Aún no existe consenso en la bibliografía en relación al mejor método para evaluar la dinámica de descomposición de residuos, siendo la concentración de N, las relaciones C:N y lignina:N sugeridas por algunos autores (Melillo *et al.*, 1982; Berg, 1986). Otros autores evalúan la descomposición por medio de incubación del material vegetal con suelo, en laboratorio o a campo, siendo la tasa estimada por la pérdida de peso como consecuencia de la liberación de C en forma de CO₂ (Silva *et al.*, 1997; Schunke, 1998).

Ecuaciones exponenciales que explican la descomposición de CC fueron obtenidas por Cordone & Galantini (1994), Cordone *et al.* (1996), Amado *et al.* (2000), Acosta (2009) y Gonçalves *et al.* (2010b). De esta manera, muchos trabajos han sido realizados con el objetivo de simular la descomposición de residuos vegetales, teniendo en cuenta diferentes factores. En Argentina, son escasos los estudios de incubación de residuos de CC en períodos cortos de tiempo y bajo condiciones de temperatura y humedad controlada.

En la bibliografía existe un número considerable de trabajos que evalúan la descomposición de residuos donde los suelos son alterados y/o se incorporan los residuos en bolsas y las condiciones reales de descomposición son tenidas en cuenta parcialmente. De esta manera, resulta de especial importancia para los sistemas de SD obtener resultados en las mismas condiciones de campo con instrumentos que permitan extraer muestras de suelo inalterados.

Por lo expuesto, es importante la determinación de ecuaciones exponenciales simples para la descripción de procesos que ocurren en la naturaleza, pues, permiten su utilización en modelos matemáticos.

1.1 Hipótesis

Los cultivos de cobertura modifican el balance de carbono en la secuencia Trigo-CC-Maíz, aumentando sólo el contenido de la fracción lábil de la materia orgánica en períodos cortos de tiempo. La velocidad de descomposición de los residuos de CC varía en función de la relación C:N de cada uno de ellos. El grado de descomposición es afectado por la temperatura y las precipitaciones.

1.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo fue el de ajustar ecuaciones matemáticas simples, con potencial de utilización en modelos, que expliquen la evolución de la dinámica de descomposición de residuos de CC y las transformaciones de las formas lábiles del CO del suelo bajo condiciones controladas de humedad y temperatura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó con un suelo que corresponde a un Argiudol típico de textura franco-arcillosa (INTA, 1972) serie Cascada (37° 23' 13" latitud sur y 62° 11' 27" longitud oeste) con 2,74% de MO, 14 mg kg⁻¹ de P y pH 6,5.

En el mes de octubre se tomaron muestras de planta, cuando los CC se encontraban en estado de prefloración-floración, y de suelos no disturbadas de 15 cm de profundidad y 10 cm de diámetro, utilizando un extractor que se coloca en el tres puntos del tractor (Sá Pereira & Krüger, 2008b) (Figura 31). En el interior del cilindro muestreador se colocó un caño de PVC (1570 cm³) de 20 cm de altura, quedando 15 cm con suelo y 5 cm de borde.

Las muestras no disturbadas, 120 macetas en total, fueron colocadas al azar en un invernáculo (CERZOS, CCT-Bahía Blanca del CONICET).

Se seleccionaron los residuos de los CC ubicados en las mismas parcelas en las que se tomaron los suelos, con avena, vicia y trébol. Los mismos se secaron y se cortaron a un tamaño entre 1 y 3 cm.

A las macetas tomadas en cada uno de los tratamientos se les agregó los residuos cortados de avena (con el equivalente a 6 Mg de MS ha⁻¹), vicia (equivalente a 6 Mg ha⁻¹) y trébol (equivalente a 3 Mg ha⁻¹), mientras que al barbecho no se le aplicó nada.

En cada uno de los CC fueron analizados sus componentes de calidad: Fibra detergente neutra (FDN) y ácida (FDA), proteína bruta (PB), contenido de nitrógeno, carbohidratos no estructurales (CHne) y lignina. Se determinó el contenido de cenizas para lo cual, se utilizó una mufla a 550°C por 3 horas, realizando las determinaciones de peso correspondientes, antes y después de la calcinación.

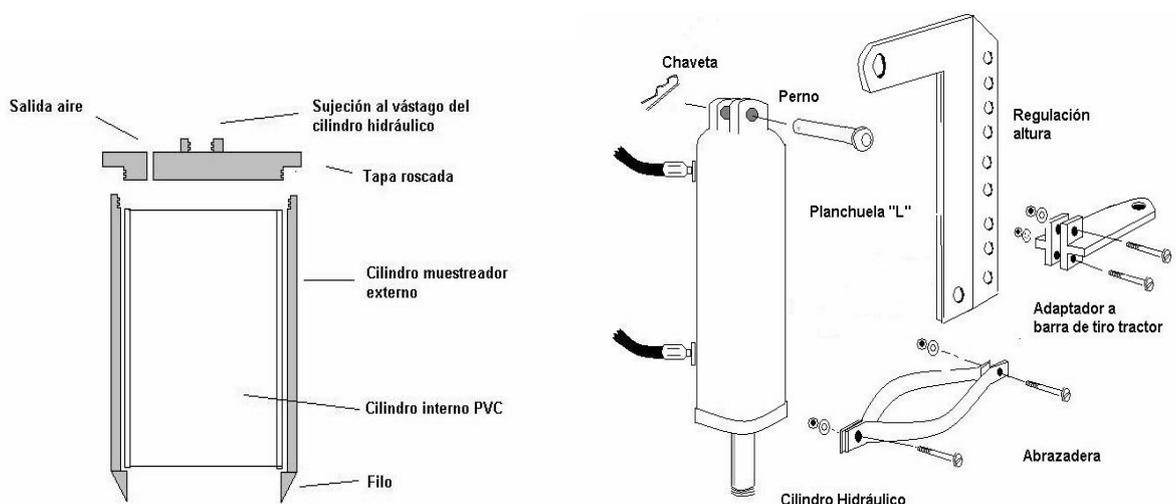


Figura 31. (a) Vista lateral del recipiente muestreador y sus componentes (b) brazo adaptador y sus componentes.

Las relaciones C:N de la materia seca de avena, vicia y trébol fueron 25:1, 9:1 y 12:1, respectivamente. Los contenidos de CHne, celulosa y hemicelulosa y lignina fueron 36, 55 y 9%; 53, 39 y 8%; 42, 47 y 11%, para avena, vicia y trébol, respectivamente.

Se controló periódicamente la humedad de las macetas, regando entre una y dos veces semanales según la estación. La temperatura fue controlada con el equipamiento disponible y nunca superó los 28°C.

Los muestreos se realizaron en un intervalo de tiempo de 370 días desde noviembre de 2007 hasta noviembre de 2008 con intervalos más cortos al inicio (tres semanas) y más largos al final (tres meses).

Se tomaron muestras destructivas, 3 repeticiones por tratamiento y por fecha, a los 21, 59, 93, 130, 201, 270 y 362 días desde el inicio de la experiencia. En cada una de las tres macetas extraídas por fecha se determinó el peso del residuo superficial remanente y se tomó el suelo.

Las muestras de suelo se dividieron en dos capas, 0-5 y 5-15 cm, las que fueron secadas al aire y tamizadas por 2 mm, para la posterior determinación de las diferentes fracciones de MO en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Ambiente (LabSPA, CERZOS – Agronomía UNS).

Las muestras de residuo remanente se secaron, se pesaron y posteriormente fueron molidas para determinar el contenido de cenizas.

La cantidad de material remanente en cada uno de los tratamientos se expresó como material orgánico libre de cenizas, para evitar las contaminaciones por las partículas de suelo adheridas al material, las que aumentaron en la medida que disminuía el material remanente

A las muestras de suelo se les aplicó un fraccionamiento físico de tamizado en húmedo descrito por Galantini (2008), el que consistió en: pesar aproximadamente 50 g de suelo, agregar 10 bolitas de vidrio y 100 ml de agua, se agitó 16 horas a 30 rpm y se tamizó por 100 µm.

Se obtuvieron de esta forma las fracciones gruesa (100 a 2000 µm) y fina (0-100 µm). En la fracción gruesa se determinó la cantidad de carbono orgánico particulado (COP) mediante combustión seca, utilizando un analizador automático de carbono SOC, total soil organic carbon by dry combustion (LECO Carbon analyzer, LECO Corporation St. Joseph, MI, USA). Los valores obtenidos fueron expresados con porcentaje de suelo, utilizando el valor de fracción gruesa determinado en cada muestra.

A las muestras de suelo de cada una de las fechas se les determinó los carbohidratos totales (CHt) y solubles (CHs) utilizando la metodología de Puget *et al.* (1999).

La estructura básica del modelo aplicado corresponde al modelo PAPRAN de Seligman & van Keulen (1981) descrito en detalle por Godwin & Jones (1991). El modelo es una descripción simple de los procesos de mineralización e inmovilización del N resultante de la descomposición del material orgánico del suelo. Para simular los cambios en la cantidad de residuos remanente se utilizó como base las ecuaciones de PAPRAN en una planilla de Cálculo del curso de postgrado “Modelos matemáticos de simulación aplicados a la investigación Agropecuaria” dictado por el Dr. Juan A. Galantini (Escuela de Graduados de la UNS). Sintéticamente, el modelo considera al “material orgánico fresco” constituido por tres componentes diferentes: Carbohidratos no estructurales (CHne), celulosa más hemicelulosa (C+H) y lignina (LIG). Cada uno de estos compartimentos tiene una velocidad de descomposición distinta. Se utilizaron los valores propuestos por Seligman & van Keulen (1981). Ellos son los que demostraron buen ajuste en experiencias previas (Galantini *et al.*, 1990).

$$\text{CHne} = 0,80 \text{ día}^{-1}$$

$$\text{C + H} = 0,05 \text{ día}^{-1}$$

$$\text{Lignina} = 0,0095 \text{ día}^{-1}$$

El paso de tiempo del modelo es diario. Estos valores asumen que los CHne serán muy rápidamente degradados, la celulosa y la hemicelulosa lo harán a una velocidad intermedia y con el paso del tiempo el remanente será solo la lignina.

Cada unidad de tiempo se calcula, en base al remanente de material de la unidad de tiempo anterior y la descomposición potencial. Teniendo en cuenta la temperatura, la humedad y la relación C:N del material, se calculan los factores (con valores entre 0 y 1) que reducen esa velocidad potencial, según sea la estación del año, la humedad o la disponibilidad de N. Cada uno de estos aspectos fue calculado según Godwin & Jones (1991).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Transformación de los residuos: ensayo en macetas

La evolución de los residuos de avena, vicia y trébol remanentes en las macetas a lo largo del período estudiado (Figura 32) presentó una dinámica coincidente con la reportada en la literatura (Wieder & Lang, 1982; Gregory *et al.*, 1985; Gilmour *et al.*, 1998), donde la mejor descripción es la de tipo exponencial negativa. La dinámica del material remanente sobre el suelo, o materia orgánica grosera (MOG), es importante por la protección que le brinda (Sà *et al.*, 2009).

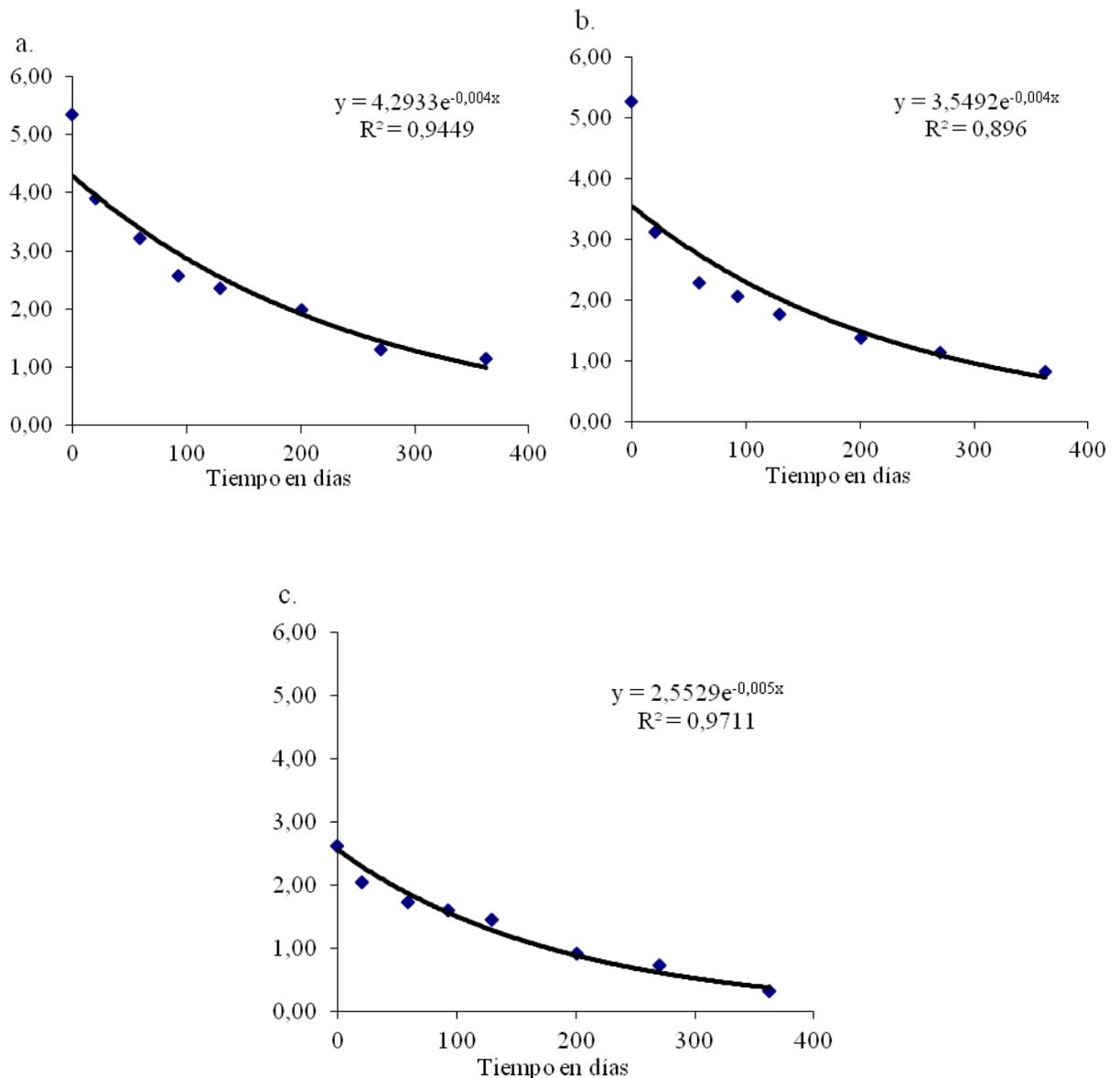


Figura 32. Evolución de la descomposición del material orgánico de los CC durante un período de 360 días de a) avena b) vicia c) trébol.

Las diferencias en la pérdida del residuo de avena, vicia y trébol fueron variando con el tiempo. El material remanente de avena, vicia y trébol fue 73, 59 y 78% a los 21 días, fue superior al 49, 38 y 60% a los 100 días y 23, 18 y 19% a los 300 días. La velocidad de descomposición fue mayor en vicia. El cambio más importante estuvo marcado por los compuestos fácilmente degradables, a los que corresponde la mayor caída observada en el primer muestreo. Surgen del análisis dos momentos claves que son importantes destacar, el primero es referente al primer intervalo de muestreo (0-21 días) donde se nota una mayor tasa de descomposición en vicia que en avena y trébol. El segundo punto es entre los 130 y 201 días donde, se destaca una elevada tasa media de descomposición en avena y trébol que tienden a igualar a la de vicia. Tasas de descomposición más rápida fueron observados por Sá *et al.* (2009) entre los 107 y 133 días en el sur de Brasil trabajando con residuos de avena a campo.

En el caso de los residuos de trébol, la mayor proporción de tallos y flores con mayor contenido de tejido lignificado debido al momento de eliminación de la cobertura vegetal, podría ser la posible causa de una más lenta descomposición inicial.

Resultados obtenidos por Cordone *et al.* (1991, 1992 y 1996), Cordone & Galantini (1994) y Gonçalves *et al.* (2010a), trabajando con residuos de avena y trigo, mostraron material orgánico remanente del 50 y 25 % en SD luego de 100 y 400 días, respectivamente.

Si bien el material orgánico remanente decreció exponencialmente y mostró cambios entre los diferentes residuos a lo largo de la experiencia, los valores finales oscilaron entre el 12 y 21 % de residuos remanentes. Las ecuaciones obtenidas fueron:

Avena	$y = 4,293 e^{(-0,0040 * t)}$	$R^2 = 0,95$
Vicia	$y = 3,549 e^{(-0,0044 * t)}$	$R^2 = 0,97$
Trébol	$y = 2,553 e^{(-0,0053 * t)}$	$R^2 = 0,90$

Donde y, es la cantidad de material remanente y t, es el tiempo transcurrido en días que está multiplicada por la constante k.

El valor de k, que marca la velocidad de descomposición promedio de cada uno de los residuos, fue 0,0040, 0,0044 y 0,0053 para avena, vicia y trébol, respectivamente. Es decir, que si bien en trébol la descomposición inicial fue lenta, después de los 150 días se aceleró respecto de los otros dos residuos utilizados.

Los resultados demuestran que si bien fue posible obtener una ecuación con un buen ajuste que permite predecir la descomposición de los residuos en el largo plazo, existen desfasajes entre los datos observados y predichos en la etapa inicial de la descomposición. Seguramente,

la mayor velocidad de pérdida del material fácilmente utilizable por los microorganismos sea la responsable de estas diferencias. Debido a esta dinámica tan particular, se torna más complejo obtener un ajuste perfecto aplicando un modelo de un solo compartimento (residuos) que cuando se consideran varios (componentes del residuo: lignina, carbohidratos, compuestos solubles, etc.).

En este sentido, los modelos matemáticos tienden a considerar otros factores involucrados en el proceso de descomposición, como pueden ser la calidad del material y las condiciones de humedad y temperatura.

3.2. Aplicación de modelo

Los resultados de la aplicación del modelo matemático para la simulación de la descomposición de los diferentes residuos de los CC pusieron de manifiesto un buen ajuste con los datos reales (Figura 33).

Analizando los resultados de la descomposición de diferentes CC se observaron patrones distintos en la dinámica de descomposición en función de cada tipo de residuo, principalmente en la fase inicial de descomposición, en la cual el mayor contenido de N y la menor relación C:N de la vicia favorecieron a una mayor tasa de descomposición (Figura 33a). A lo largo de los 360 días que duró el experimento, los residuos de vicia presentaron siempre mayor velocidad de descomposición, con una disminución de 40 a 50% de la MS en 30 días, después de colocados los residuos en las macetas. Los residuos de avena presentaron mayor persistencia, aún después de 130 días en que permanecía un remanente de material orgánico de 45%, reafirmando que el menor contenido de N y la mayor relación C:N deben haber dificultado su degradación. En experiencias conducidas en el sur de Brasil por Acosta (2009) trabajando con bolsas de descomposición de residuos de avena y vicia colocadas a campo, fueron necesarios 164 y 49 días para alcanzar un 50 % de descomposición, respectivamente. De la misma forma, cuando fue comparada con los residuos de avena y vicia, la composición de trébol, con valores intermedios de N y relación C:N, presentó tasas de descomposición intermedias.

Cuando se estima mediante el modelo el N liberado de la descomposición de los residuos (Figura 33b), teniendo en cuenta que hasta que no llega a una relación C:N igual a 20, el N contenido en los residuos es retenido y a partir de allí comienza a ser liberado al ritmo en que se pierde material orgánico. El mayor aporte de residuos influyó en el proceso de mineralización e inmovilización de N en función de la relación C:N de cada CC. A su vez, los

residuos de vicia con elevado contenido de N y baja relación C:N liberaron hasta el 32% del N acumulado en sus residuos en los primeros 30 días (Figura 33b), pudiendo ofrecer al suelo cantidades que varían de 35 a 130 kg ha⁻¹ de N, según las mediciones realizadas a campo. Estas características de los residuos de vicia podrían reemplazar hasta un 50% de la fertilización nitrogenada y promover un incremento de hasta un 100% en la producción de granos. Estos resultados se observaron en los ensayos a campo durante los tres años (Capítulo 4). Con los residuos de avena se observó una inmovilización inicial, siendo intensificada a medida que hubo aumento del aporte de residuos. La re-mineralización parcial al suelo, según el modelo, ocurrió a partir de los 60 días de incorporados los residuos en las macetas. Tasas de mineralizaciones de N de hasta un 50 % en los primeros 30 días, fueron obtenidas por Acosta (2009) en función de la cantidad de residuos de vicia colocados en bolsas de descomposición.

Si se asume que la dinámica de la descomposición del residuo a campo fue similar al valor obtenido en macetas, podemos comprender por qué la fertilización del maíz en V4-V6 con antecesor avena tuvo mayor respuesta a campo que con antecesor vicia. Los resultados obtenidos en macetas indicarían que la disponibilidad de N en el suelo estuvo directamente relacionada con la dinámica de descomposición de residuos controlada por la calidad de los mismos e influenciada por las oscilaciones de humedad y temperatura. Entretanto, residuos de leguminosas, con seguridad, ofrecen mayores cantidades de N y el cultivo de maíz en sucesión podrá recibir menos dosis complementaria, pudiendo ser manejadas más tardíamente. En cambio, el maíz sembrado en sucesión a los residuos de gramíneas, con mayor relación C:N y descomposición más lenta, caracterizado por procesos de inmovilización y menor disponibilidad de N en el suelo, deberán ser manejados con mayores dosis de N, principalmente, en la fase inicial de crecimiento del cultivo, coincidiendo con la fase de mayor inmovilización microbiana. Resultados de descomposición de residuos y liberación de N descritos por Cordone *et al.* (1996); Amado *et al.* (2000) y Acosta (2009) indican que diferentes sistemas de labranza presentan potencial de sincronía entre la liberación de N de los residuos y la demanda de los cultivos.

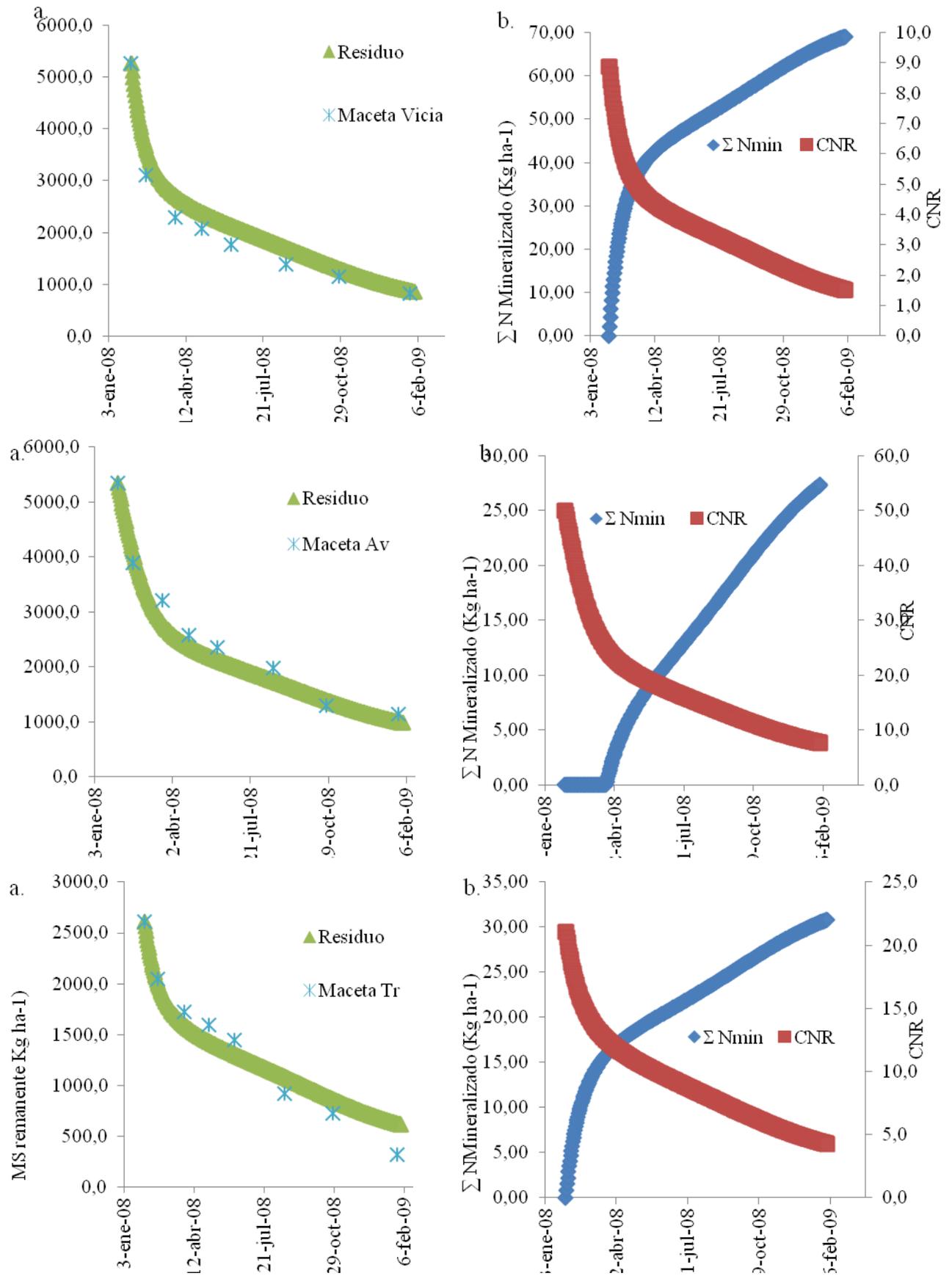


Figura 33. a) MS remanente observada (*) y simulada (Δ) en las macetas con residuos en superficie para vicia, avena y trébol. (b) Liberación acumulada de N mineralizado en kg ha^{-1} y relación C:N para cada uno de los CC.

Como ejemplo de posible aplicación de estos datos, se puede plantear la utilización de gramíneas y leguminosas como CC antecesores de maíz. En las gramíneas, el aporte de N para el cultivo siguiente, si se cuantifica, es el resultado de reducir las pérdidas del nutriente que ocurren durante el período de barbecho. En las leguminosas existe un aporte adicional de N, producto de la fijación simbiótica que aumenta con la cantidad de materia seca acumulada. Como esto está asociado a cambios en la composición bioquímica de los tejidos, al avanzar el estado de madurez se reduce la concentración de N, lo que condiciona el momento de aporte de N para el maíz (sincronización entre oferta y demanda de N). En los CC leguminosas aunque se reduce la concentración de N en los tejidos, su cantidad aumenta con los días de crecimiento. Por el contrario, en CC gramíneas, la compensación puede determinar que la cantidad de N absoluta no se modifique (Vaughan & Evanylo, 1998).

3.3. Dinámica de descomposición de la materia orgánica, carbohidratos solubles y totales

El conocimiento de los cambios producidos en la dinámica de la MO y carbohidratos solubles y totales, es muy importante porque constituye uno de los procesos reguladores de la capacidad productiva de los suelos.

Luego del secado de los CC, la descomposición potencial de la MOP en la capa superficial de cada uno de los suelos se puede observar en la Figura 34. La mayor descomposición se encontró en el suelo con avena y vicia como CC. Posiblemente, el mayor aporte de material orgánico de fácil descomposición pudo haber estimulado la pérdida, mientras que en el suelo en barbecho luego de un período prolongado sin aportes aumenta la proporción de material más resistente. En el caso del trébol como CC, la cantidad de material aportado fue menor y en un estado de madurez más avanzado, aspectos que pueden haber disminuido la velocidad de descomposición y aumentado la variabilidad. Las muestras de las macetas fueron tomadas en cada uno de los sitios de ensayo y tienen diferencias de partida, asociada a lo que aconteció en cada uno de los tratamientos en el campo.

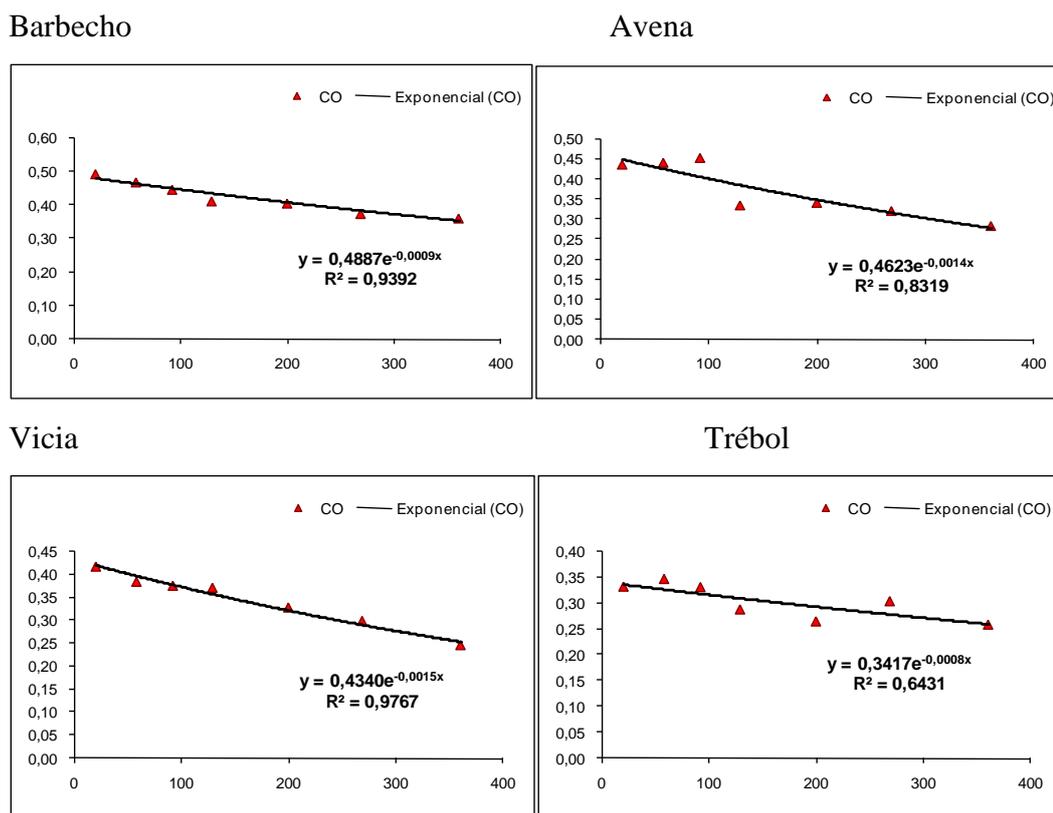


Figura 34. Dinámica del carbono orgánico particulado (COP, %) en la profundidad 0-5 cm con diferente antecesor; a) barbecho o con cultivo de cobertura de b) avena, c) vicia y d) trébol

La velocidad de descomposición del COP, o valores del k, obtenidos en cada uno de los tratamientos se presenta en la Tabla 26.

Tabla 26. Velocidad de descomposición del carbono orgánico particulado (COP) en el suelo con diferentes antecesores.

Antecesor	Velocidad de descomposición (k)		R ²
	Diaria	Anual	
Barbecho	0,0009	0,324	0,94
Avena	0,0014	0,504	0,83
Vicia	0,0015	0,540	0,98
Trébol	0,0008	0,288	0,64
Todos	0,0011	0,396	0,47

Los cambios en el contenido de CH totales (CHt) y solubles (CHs) del suelo en barbecho siguió una tendencia semejante a la descomposición del COP (Figura 35). Esto pone en evidencia que estos materiales son fácilmente utilizados por los microorganismos como

sustrato y van agotándose con el tiempo. Cuando se analizan las figuras correspondientes al contenido de CHt y CHs en los diferentes CC se detectaron aumentos y disminuciones a lo largo de la experiencia. En el caso de la avena, se observó una disminución inicial con un aumento posterior. En vicia, un aumento inicial, disminución y finalmente otro aumento, mientras que en trébol, los valores fueron relativamente uniformes en el tiempo (Figura 35). Evidentemente, estos cambios estarían asociados a los procesos de transformación de los residuos y la utilización por la biota edáfica de los materiales más lábiles, donde la calidad del material y la disponibilidad de N son importantes reguladores. Estos resultados sugieren que la dinámica de descomposición está íntimamente ligada a los tamaños de cada compartimento y no necesariamente a las constantes de descomposición que varían con las condiciones climáticas conforme a lo observado por Acosta (2009) en Santa María-RS-Brasil.

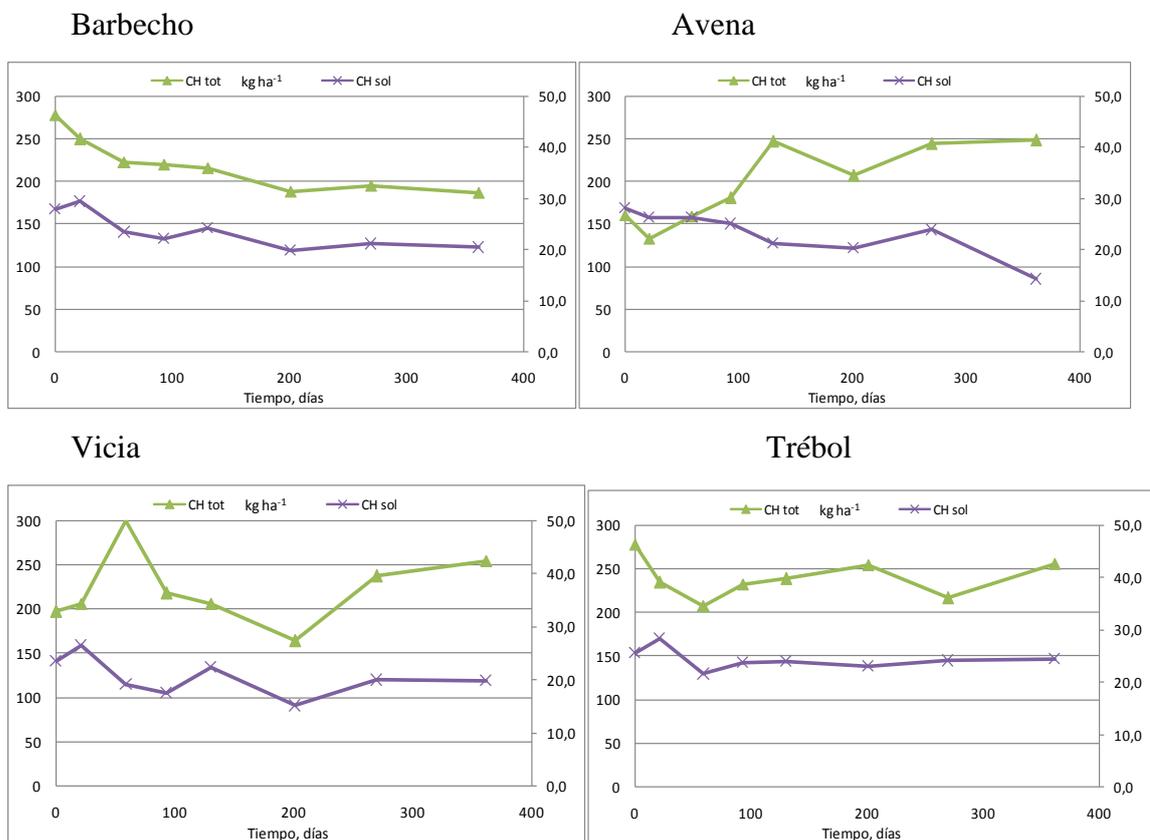


Figura 35. Dinámica del contenido de carbohidratos totales (CH tot) y solubles (CH sol) en kg ha⁻¹ en la profundidad 0-5 cm con diferente antecesor (barbecho y con cultivos de cobertura de avena, vicia y trébol).

Suponiendo que la dinámica de los CHt del suelo con barbecho fue semejante a la que se produce en los suelos con CC, sería posible estimar el aporte proveniente de los residuos incorporados. En la Figura 36 se presentan las estimaciones para el suelo con avena y con vicia,

donde la línea con cuadros indica los CHt en el suelo con barbecho, la línea con rombos los CHt en el tratamiento con residuos y la diferencia, triángulos, corresponderían a los CHt provenientes de la descomposición de los residuos. Se observa claramente que en el caso de la gramínea el aporte de material carbonado a los CHt del suelo se demora en el tiempo, mientras que en el caso de la vicia tiene dos momentos importantes, al comienzo de la descomposición, y al final del período considerado. Esta fracción puede ser un buen indicador de la calidad de la MO, en cortos períodos de tiempo como concluyeron Kuo *et al.* (1997) y Ball *et al.* (1996). Más recientemente, Hevia *et al.* (2008) concluyeron que la mayor variabilidad que presentan los CH totales en SD está asociada a los diferentes tipos de residuos vegetales utilizados.

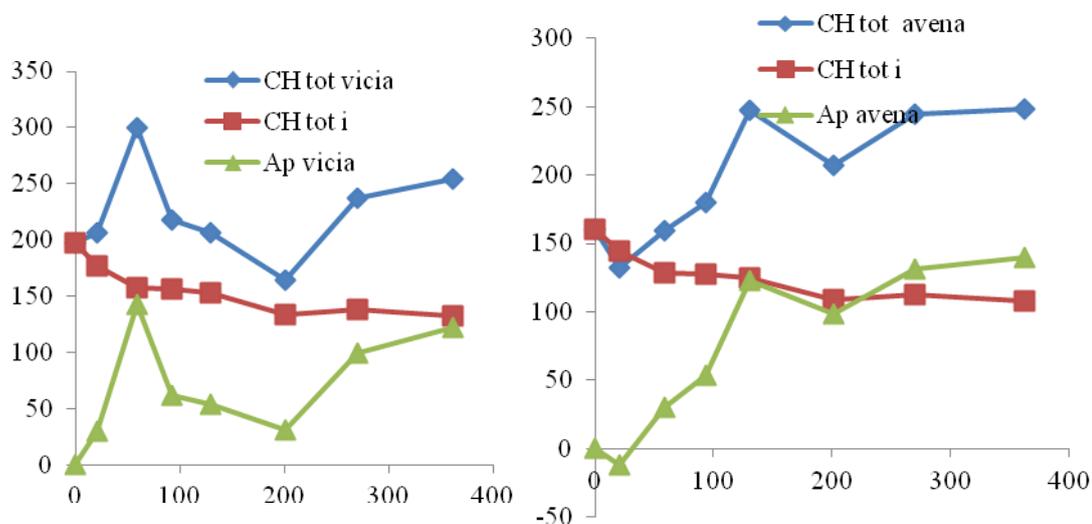


Figura 36. Dinámica del contenido de carbohidratos totales (CH tot, kg ha⁻¹, azul) en la profundidad 0-5 cm con antecesor avena y vicia, remanente del inicial (rojo) y aporte del CC (verde).

En la Figura 37 se muestran los resultados obtenidos a campo (2007/08) de contenidos de MOP de 0-20 cm de profundidad con los diferentes CC antecesores de maíz. Se observó claramente a la siembra de maíz un mayor contenido de MOP con antecesor vicia y avena fertilizada (Av. Fert.) y menores con avena sin fertilizar (Av. S/Fert.) y barbecho, seguramente esto se debió a un mayor aporte de residuos de más rápida descomposición en los primeros y de lenta descomposición en los segundos. En investigaciones llevadas adelante con anterioridad por Wander & Traina (1996), Ding *et al.* (2005), Alvarez *et al.* (2006a) y Scianca *et al.* (2006a,b) comprobaron que los CC pueden realizar un aporte significativo de C, incidiendo tanto en la cantidad como en la calidad de la MO.

En los estadíos fenológicos de R3 (grano lechoso) y cosecha, las diferencias no existieron posiblemente debido a los efectos de aporte de residuos del cultivo de maíz.

Estos resultados pondrían de manifiesto un importante efecto de los residuos de vicia sobre el cultivo de maíz bajo SD, en forma coincidente con valores más elevados de MOP y en el caso del antecesor avena y barbecho, estos residuos habrían producido una importante inmovilización del N disponible causando deficiencias en el maíz posterior, que se reflejaron en el menor rendimiento de MS, siendo necesario recurrir a la aplicación de N para contrarrestar los efectos negativos en el maíz.

El aumento de la dosis de N en maíz con antecesor vicia no disminuyó la eficiencia con que la materia seca del cultivo absorbió el N disponible (N a la siembra más el fertilizante) en los tres ensayos. Los valores más altos de materia seca y absorción de N del maíz sin fertilizar con antecesor vicia sugieren un aporte extra de N (mineralizado de la MO lábil durante el cultivo) de mayor importancia en los tres ensayos, en forma coincidente con los valores más altos de MOP.

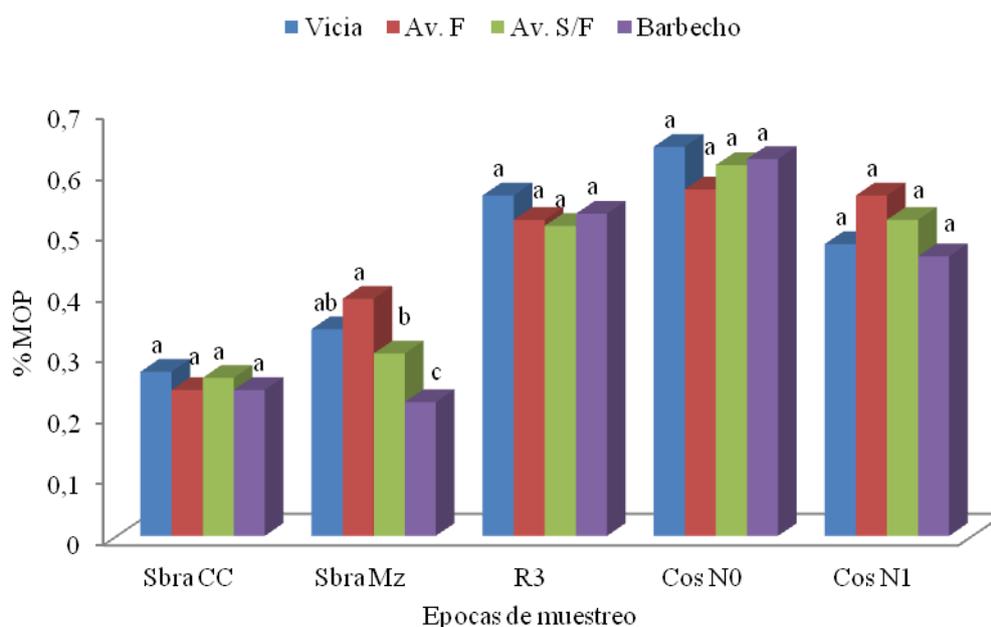


Figura 37. Contenidos de materia orgánica particulada (MOP) (%), en la profundidad de 0-20 cm con diferentes antecesores (barbecho y con cultivo de cobertura de vicia y avena), en los distintos momentos del ciclo CC/maíz (485 días). Promedio de 3 ensayos durante la campaña 2007-08. Medias seguidas por la misma letra no difieren del test LSD 5 %.

3.4. Persistencia de los residuos de cultivos de cobertura

El tiempo de permanencia de los residuos en la superficie del suelo después de la eliminación de las especies de CC, está determinado por la velocidad de descomposición.

Cuanto más rápida es su descomposición, mayor es la velocidad de liberación de nutrientes; en consecuencia, es menor la protección ofrecida al suelo. La velocidad de descomposición está relacionada con el contenido de lignina y con la relación C:N de los residuos. Cuanto mayor es el tenor de lignina y la relación C:N, más lenta es su descomposición (Aulakh *et al.*, 1991; Mary *et al.*, 1996). En este sentido se determinó que la relación LIG:N está íntimamente relacionada con su degradación, al igual que la relación C:N. Por otro lado, se observó que la relación C:N está directamente relacionada a la proporción de avena con vicia (ver Cap. 4). Además, a medida que aumentan la relación C:N y LIG:N de los CC, en la asociación entre gramínea y leguminosa, aumenta, también la cantidad de residuo remanente.

4. CONCLUSIONES

- Los residuos de vicia presentaron elevada tasa de descomposición inicial, perdiendo más del 40% de la cantidad de residuo en los primeros 21 días después de colocados en las macetas de incubación, pudiendo promover una elevada disponibilidad de N al suelo.
- Los residuos de avena presentaron menor tasa de descomposición, causando inmovilización temporaria de N del suelo, con liberación tardía y parcial entre 3 y 4 meses después de colocados los residuos en las macetas.
- El tamaño de los compartimentos de descomposición de los residuos de avena, vicia y trébol fueron diferentes, mientras que los procesos de mineralización e inmovilización fueron intensificados por la relación C:N de cada cultivo de cobertura.
- Para la descripción de la dinámica de la descomposición de los CC se pueden utilizar ecuaciones simples en el mediano plazo o un modelo matemático simple para las descripciones más precisas en el corto plazo.
- Las fracciones más lábiles del CO del suelo (CHt, CHs y COP) fueron afectadas por el tipo de residuo en períodos cortos de tiempo.
- Los contenidos de MOP fueron superiores con antecesor vicia y Av. Fer. que con Av. S/Fert. y barbecho.

CAPÍTULO VI

CONSIDERACIONES FINALES

1. PRINCIPALES CONTRIBUCIONES

Los resultados de la presente tesis demuestran la influencia del ambiente caracterizada principalmente por el régimen de humedad údico de los Argiudoles típicos (Udol) del sistema de Ventania con orientación NO-SE, el cual está determinado por cada sitio bajo estudio (CRA y precipitaciones) y sobre el impacto y la viabilidad de las distintas especies utilizadas como CC sobre la producción de materia seca, calidad, eficacia en la utilización del agua de suelo y disponibilidad para el cultivo siguiente.

La pérdida de MO del suelo es un indicador de degradación del mismo, debido a que interviene en la mayoría de los procesos químicos, físicos y biológicos. Sin embargo, existen muy pocos datos de la evolución de la MO en los suelos de la región subhúmeda pampeana (sector de Ventania) bajo SD. En esta zona, existe el concepto generalizado de que el barbecho limpio, es la mejor manera de conservar la humedad en el perfil del suelo para el cultivo siguiente. Se deja el suelo con rastrojo, mayormente de soja en superficie, que no disminuye el efecto erosivo de la gota de lluvia.

Los resultados de este estudio evidencian que la utilización adecuada de fertilizantes junto con la implantación de CC de suelo en invierno y la introducción del cultivo de maíz en rotación con trigo, son una alternativa viable y pueden proporcionar incrementos en la materia orgánica joven del suelo.

Los datos manifiestan que los cultivos invernales de cobertura disminuyen las pérdidas de carbono orgánico de los suelos ubicados en el sector de Ventania dentro de la región subhúmeda pampeana. Por lo tanto, la rotación de cultivos y de CC minimizan los impactos de los agrosistemas de producción, que juntas al sistema de SD como un sistema integrado de producción, sus efectos benéficos son potenciados, inclusive con disminución de costos de producción, aumento y estabilidad de la producción. De esta manera los agrosistemas de producción conservacionista que incluyen la SD asociada a la diversificación de cultivos y la utilización de CC tienden a ofrecer menores riesgos a la producción agropecuaria.

2. CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados obtenidos permitieron analizar durante el período de marzo a noviembre, en la mayoría de los años, que el suelo se mantuvo cercano a capacidad de campo en el tratamiento barbecho testigo, en especial, en los meses de otoño y primavera. En tanto, el tratamiento CC utilizó agua, en especial en los 25 días previos a la aplicación del herbicida. En este momento y en promedio para los dos primeros años, mientras que el tratamiento barbecho, tenía el 67% del agua útil almacenada, el CC consumió el 33%. Las lluvias ocurridas durante el período de barbecho químico permitieron recargar el perfil, realizándose la siembra de maíz con la misma reserva de agua en el suelo. Dos características parecen determinantes de los resultados: por un lado, la profundidad del perfil considerada y por otro, el régimen de lluvias de la estación. Para las condiciones del partido de Coronel Suárez con Argiudoles típicos de textura más fina, es normal mantener el suelo cercano a capacidad de campo durante todo el invierno y la posibilidad de recarga del perfil a inicios de la primavera es alta, lo que permitiría implementar la siembra de CC sin aumentar en forma excesiva el riesgo de no poder sembrar cultivos de verano a inicios de la estación de crecimiento con el perfil recargado con agua. Los resultados obtenidos en estos estudios confirman que para el partido de Coronel Suárez y entre los meses de agosto a octubre, se obtuvo un 80% de probabilidad de superar las precipitaciones con respecto a la media histórica, que permitieron durante los años que duró la experiencia, una recarga del perfil del suelo y un mayor crecimiento de los CC hasta fecha próxima a la siembra del cultivo siguiente. Durante el ciclo del cultivo, hubo suficientes precipitaciones entre los estadios V6-R1 de maíz, manteniéndose la humedad de suelo con el aporte de las coberturas que determinaron una conservación importante en la cantidad de agua útil en los primeros 45cm del perfil en ambos manejos. Un retraso en la aplicación del herbicida puede significar un aporte cuantitativo mayor de N en etapas tardías del ciclo del cultivo pero agrega incertidumbre sobre la cantidad de agua almacenada en el suelo. El balance diario de agua en el suelo y el conocimiento de su capacidad de almacenarla y la utilización de modelos de probabilidades de ocurrencia de lluvias, son herramientas aplicables al momento de definir la factibilidad de la implantación de CC, como así también aspectos claves de su ciclo, momentos de secado y fechas más adecuadas para implantar el cultivo siguiente. El cultivo de maíz en secano, sembrado a continuación de los CC sin limitaciones de nutrientes, el agua acumulada a la siembra, la cantidad y distribución de las precipitaciones, en particular las ocurridas en enero, fijaron los rendimientos máximos alcanzados por el maíz.

Este trabajo de tesis también ha pretendido enfocar algunos de los aspectos más importantes de la calidad de los CC que modifican la dinámica del C y N en suelos de la región subhúmeda pampeana. La producción de MS de los CC varió entre 0,46 y 6,43 Mg ha⁻¹ y su contenido de N entre 15 y 130 Kg ha⁻¹. La biomasa aérea de avena presentó las menores concentraciones de N en la MS producida y las mayores correspondieron a la vicia en todos los años evaluados. La cantidad de MS fue un buen indicador de su calidad. Otros parámetros de calidad de CC analizados en esta tesis fueron: celulosa, hemicelulosa, lignina y carbohidratos no estructurales solubles (CHne). Estos parámetros son esenciales en la tasa de descomposición de los residuos de cultivos en el suelo. Las concentraciones de celulosa del tejido vegetal de la vicia vs. avena está en función de la cantidad de MS total producida. La vicia superó en promedio a la avena en 37% más de concentración de lignina. Como la proporción de lignina fue aproximadamente constante para las distintas cantidades de MS, los CHne mostraron una variación inversa a los contenidos de celulosa y hemicelulosa. Las concentraciones de CHne fueron superiores en la avena con respecto a la vicia. Estas variaciones en la concentración de los distintos parámetros de calidad de los CC están relacionadas a las especies analizadas en cada estudio, como así también, al estado de crecimiento y desarrollo en que las mismas fueron recolectadas. Los diferentes CC presentaron relaciones C:N y LIG:N y contenidos de celulosa, hemicelulosa y carbono que estuvieron en función de las cantidades de MS producida por la biomasa aérea. Las leguminosas presentaron una relación C:N promedio de 14 y la avena de 30. Los valores de LIG:N siempre fueron menores a los obtenidos de C:N en todas las especies evaluadas. La relación LIG:N de los CC alcanzó un valor máximo de 6,76 en avena y un mínimo de 1,51 en vicia como cultivo puro. Los parámetros de calidad evaluados afectaron la calidad de los residuos de los CC y estos podrían tener su efecto en la disponibilidad de N y C en el suelo para el cultivo siguiente. Debido a una alta probabilidad de excesos de precipitaciones durante las estaciones de otoño y primavera, en suelos con alta capacidad de retención de agua, existe una alta acumulación de N-NO₃⁻, con posibles riesgos de lixiviación durante períodos largos de barbecho, resultando clave la realización de cultivos de cobertura para capturar el nitrógeno inorgánico y transformarlo en N orgánico.

La calidad de los residuos aportados al suelo influyó fuertemente en las variaciones de disponibilidad de N en el suelo durante prácticamente todo el ciclo del cultivo de maíz, siendo esto determinante en la absorción de N y en el rendimiento de maíz. Los rendimientos del cultivo sucesor a los CC variaron entre 8022 y 9627 kg ha⁻¹ para los tratamientos con vicia como CC y entre 4753 y 9222 kg ha⁻¹ para los tratamientos testigos sin fertilizar. El rendimiento de maíz fue superior en las parcelas con CC (vicia) que sin CC (barbecho);

además, la fertilización del CC entre V4 y V6 tuvo una respuesta positiva en los rendimientos del maíz, cuando el antecesor fue avena o barbecho. Estos resultados preliminares muestran la posibilidad de: reducir el uso del fertilizante nitrogenado con antecesor vicia, capturar C, mantener y/o incrementar los niveles de MO y posibilitar mayores rendimientos de maíz. Otro resultado es que las calidades de residuos adicionados al suelo no influyeron significativamente en las tasas de descomposición, pero intensificaron los procesos de mineralización e inmovilización de N, indicando que los microorganismos, responsables de la descomposición, aumentaron su actividad con el aporte de residuos, manteniendo la tasa de descomposición prácticamente constante, e intensificando en forma variable sus efectos sobre el N, sean ellos positivos (mineralización) o negativos (inmovilización). El aporte y la dinámica de descomposición de los residuos afectaron directamente la acumulación de MS y N en la planta de maíz, en comparación con el testigo barbecho.

A diferencia de los residuos de avena, los residuos de vicia tuvieron un efecto positivo en la planta de maíz, promoviendo una elevada acumulación de N, así, se puede concluir que la disponibilidad de N en la planta es una resultante de múltiples interacciones entre la MOS, el aporte de residuos, el crecimiento microbiano, la absorción por las plantas y el aporte externo de N, afectados por las condiciones climáticas a lo largo del ciclo del maíz.

A partir de una evaluación general, se concluyó que el potencial de acumulación de N está asociado con las características entre especies utilizadas como CC y que la tasa de descomposición está directamente asociada con la relación C:N de sus residuos. Entre tanto, una información adicional que se puede acrecentar es que la tasa de descomposición, independientemente del tipo de residuos, fue semejante. A su vez, las diferentes velocidades de descomposición estuvieron asociadas al tamaño de los compartimentos descomponibles (lábil y recalcitrante) de cada tipo de residuo. La diferencia más importante se halló en la cantidad de MOP aportada por la vicia al suelo, al momento de la siembra de maíz, duplicando los valores obtenidos con testigo barbecho sin CC y confirmando que esta fracción es un buen indicador de la calidad de la MO, en cortos períodos.

Los resultados obtenidos en los ensayos de incubación permitieron analizar tres aspectos diferentes de la descomposición de residuos en estos suelos: desde el punto de vista de la velocidad de descomposición, la vicia se descompuso más rápidamente que la avena, pudiendo promover una elevada disponibilidad de N al suelo. Desde el punto de vista de la descripción de la dinámica de descomposición de los CC, se pueden utilizar ecuaciones simples en el mediano plazo o un modelo matemático simple para las descripciones más precisas en el corto plazo. Desde el punto de vista de la composición de las fracciones lábiles del CO del suelo,

CHt, CHs y COP fueron las variables más afectadas por el tipo de residuo en períodos cortos de tiempo. Con estas conclusiones quedan demostradas las hipótesis planteadas en los capítulos 3, 4 y 5, habiéndose rechazada la hipótesis planteada en el capítulo 2. Particularmente sobre este tema existen pocos trabajos en la Argentina. Por lo expuesto hasta aquí, surge la necesidad de acrecentar investigaciones futuras, donde se amplíe el estudio del impacto de la incorporación de CC sobre los cambios que estos introducen en la dinámica de la MOP y sus diferentes fracciones en el corto plazo; en agrosistemas agrícolas bajo SD de la región subhúmeda pampeana dedicados al cultivo de maíz y soja, principalmente.

BIBLIOGRAFIA

- Acosta J.A.A. 2009. Dinâmica do nitrogênio sob sistema plantio direto e parâmetros para o manejo da adubação nitrogenada no milho. 200p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.
- Acosta, J.A.A.; Amado, T.J.C.; Neergaard, A. De; Vinther, M.; Da Silva, L.S. & Da Silveira, R.N. 2011. Effect of ¹⁵N labeled hairy vetch and nitrogen fertilization on maize nutrition and yield under no tillage. *R. Bras. Ci. Solo.* 35: 1337-1345.
- Aita, C.; Ceretta, C. A.; Thomas, A. L.; Pavinato, A. & Bayer, C. 1994. Espécies de inverno como fonte de nitrogênio para o milho no sistema de cultivo mínimo e feijão em plantio direto. *Revista Bras. Ci. Solo. Campinas.* 18(1):101-108.
- Aita C. 1997. Dinâmica do nitrogênio no solo durante a decomposição de plantas de cobertura: efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para a cultura em sucessão. In: Fries, M.R.; Dalmonlin R.S.D. Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto. UFSM/Dpto de Solos. Santa Maria. 76-111.
- Aita, C.; Basso, C.J.; Ceretta, C.A.; Gonçalves C.N. & Da Ros, C.O. 2001. Plantas de cobertura de solo como fontes de nitrogênio ao milho. *R. Bras. Ci. Solo.* 25:157-165.
- Aita, C. & Giacomini, S.J. 2003. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. *R. Bras. Ci. Solo.* 27:601-612.
- Alvarenga, R.C.; Cruz, J.C. & Novotny, E.H. 2007. Plantas de cobertura de solo. Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção. Disponível em 13/fev/2007: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho/ferverde.htm>.
- Allison, F.E. 1966. The fate of nitrogen applied to soils. *Adv. Agron.* 18:219-258.
- Álvarez, R. & Lavado R. S. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils. Argentina. *Geoderma* 83:127-141.
- Alvarez, C.; Scianca, C.; Barraco, M. & Díaz-Zorita, M. 2006a. Impacto de cereales de cobertura sobre propiedades edáficas y producción de soja. En: XXI Congreso argentino de la ciencia del suelo. Resúmenes. Anales, Salta .AACS.
- Alvarez, C.; Barraco, M.; Díaz-Zorita, M. & Scianca, C. 2006b. Uso de cultivos de cobertura en rotaciones con base soja: efecto sobre algunas propiedades edáficas y rendimiento de los cultivos en un Hapludol típico del noroeste bonaerense. En: XXI Congreso argentino de la ciencia del suelo. Resúmenes. Anales, Salta .AACS, CD-ROM.

- Álvarez R. & Steninbach H. S. 2006. *Materia orgánica, valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 1ª ed. Cap. 3, 256p.
- Álvarez J. & Scianca, C. 2007. *Cultivos de cobertura en Molisoles de la Región Pampeana. Aporte de carbono e influencia sobre las propiedades edáficas*. EEA INTA General Villegas. Boletín para profesionales. Jornada profesional agrícola, 28 y 29 de Septiembre del 2007.
- Amado T.J.C. 1997. *Disponibilidade de nitrogênio para o milho em sistemas de cultura e preparo do solo*. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo), Programa de Pósgraduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 201 f.
- Amado T.J.C.; Mielniczuk, J.; Fernandes, S. B. V. & Bayer, C. 1998. *Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade de milho*. UFRG – Faculdade de Agronomia – Porto Alegre-RS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 23(3):679-686.
- Amado T.J.C.; Mielniczuk, J. & Fernandes, S.B.V. 2000. *Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o milho em sistemas de preparo do solo*. *Revista Bras. Ci. Solo*, Campinas. 24:179-189.
- Amado T. J. C.; Santi A. & Acosta J. A. A. 2003 *Adubação nitrogenada na aveia preta. II - Influência na decomposição de resíduos, liberação de nitrogênio e rendimento de milho sob sistema plantio direto*. *Revista. Bras. Ci. Solo*, 27:1085-1096.
- Amado, T.J.C.; Mielniczuk, J. & Aita, C. 2002. *Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema de plantio direto*. *Revista Bras. Ci. Solo*. 26:241-248.
- Amado, T.J.C.; Bayer, C.; Conceição, P.C.; Spagnollo, E.; Campos, B.C. & Da Veiga, M. 2006. *Potential of carbon accumulation in zero tillage soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil*. *J. Environ. Quality*, forthcoming.
- Andrada, M.C. 2000 *Consortiacao de plantas de cobertura. III. Dinâmica do N no solo durante a descomposição da fitomasa y productividad de milho*. In: FERTBIO 2000, Santa María. Anais...Santa Maria. CD-ROM
- Andrade F.H. 1995. *Analysis of growth and yiled of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina*. *Field Crop Research*. 41: 1-12.
- Andriulo A. & Cordone G. 1998. *Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos de la Región Pampeana Húmeda 1998*. En: *Siembra Directa*, Cap. 5 pp. 65 - 96. Editores: Panigatti, J.; H. Marelli; Buschiazzo D. & Gil R. Editorial Hemisferio Sur.

- Andriulo, A.; Sasal C. & Rivero M. 2001. Los sistemas de producción conservacionistas como mitigadores de la pérdida de carbono edáfico. En Siembra Directa II, INTA. 17-28.
- Andriulo, A. Sasal C.; Irizar A.B.; Restovich S.B. & Rimatori F. 2008. Efectos de diferentes sistemas de labranza, secuencias de cultivo y de la fertilización nitrogenada sobre los stocks de C y N edáficos. En: Juan A. Galantini. Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. 1ª edn. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. 309pp.
- AAPRESID/INTA 2010. Boletín de divulgación técnica. Bifolio.
- Argenta, G.; Silva, P. R. F. Da; Bortolini, C. G.; Strieder, M. L. & Forsthofer, E. L 2000. Efeito de sistemas de manejo da ervilhaca comum sobre a cultura do milho semeada em sucessão. In: Congresso nacional de milho e sorgo,23, Resumos Uberlândia. (Impressao eletronica).
- Aulakh, M.S.; Doran, J.W.; Walters, D.T.; Mosier, A.R. & Francis, D.D. 1991. Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization. Soil Sci. Soc. Am. J., 55:1020-1025.
- Baigorria, T. & Cazorla, C. 2009. Evaluación de especies como cultivo de cobertura en sistemas agrícolas puros en siembra directa. In: jornadas nacionales de sistemas productivos sustentables. AACCS. Bahía Blanca.
- Bailey R.W. 1958. Reactions Of Pentoses With Anthrone. Bioch. J. 68:669.
- Baker, J.M. & Griffis, T.J. 2009. Evaluating the potential use of winter cover crops in corn–soybean systems for sustainable co-production of food and fuel. Agricultural and forest meteorology. 149:2120–2132
- Ball, B. C.; Cheshire, M.V.; Robertson, E.A.G. & Hunter, E.A. 1996. Carbohydrate composition in relation to structural stability, compactibility and plasticity of two soils in a long-term experiment. Soil Tillage Res. 39:43-160.
- Balota, E.L.; Colozzi-Filho, A.; Andrade, D.S. & Hungria, M. 1998. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. Revista Bras. Ci. Solo. Campinas, San Pablo. 22:641-649.
- Barbosa O.A., Taboada M.A., Rodríguez M.B. y Cosentino D.J. 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un Argiudol franco limoso de la Pampa Ondulada, Argentina. Ciencia del Suelo 15 (2): 81-86.
- Barraco, M; Álvarez, C. & Scianca C. 2009. Aportes de nutrientes y rastrojos de diferentes especies utilizadas como cultivos de cobertura. In: Jornadas nacionales de sistemas productivos sustentables. AACCS. Bahía Blanca.

- Basso C.J. 1999. Épocas de aplicação o de nitrogênio para o milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de solo, no sistema plantio direto. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maríá. 91pp.
- Bending, G.D.; Turner, M.K. & Burns, I.G. 1998. Fate of nitrogen from crop residues as affected by biochemical quality and themicrobial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 30:2055–2065.
- Berg B. 1986. Nitrogen release from litter and humus in coniferus forest soil a mini review. *Scandanavian Journal of Forestry Research.* 1:359 –369.
- Bertol, I.; Ciprandi, O.; Kurtz, C. & Baptista, A.S. 1998. Persistência dos resíduos culturais de aveia e milho sobre a superfície do solo em semeadura direta. *Revista Bras. Ci. Solo.* 22: 705-712.
- Bertol, I.; Leite, D. & Zoldan Jr. W.A. 2004. Decomposição do resíduo de milho e variáveis relacionadas. *Revista Bras. Ci. Solo.* 28(2):369-375.
- Bodner G.; Loiskandl W. & Kaul H.P. 2007. Cover cropevapotranspiration under semi-arid conditionsusing. *FAO dual crop coefficient method with water stresscompensation. Agricultural water management.* 93:85 – 98.
- Boehm, M. & Anderson, D. 1997. A landscape-scale study of soil quality in the three prairie farming systems. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61:1147-1159.
- Bojanich, M.; Baigorria, T. ; Lardone, A. & Cazorla, C. 2010. Análisis económico del cultivo de maíz sobre vicia utilizada como cultivo de cobertura. Informe técnico, EEA INTA Marcos Juárez. 6 pp.
- Bono, A. & Romano, N. 2007. Métodos de diagnóstico de fertilización. Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Publicación Técnica N° 71. EEA INTA Anguil.
- Bono A., Sá Pereira E. de, Romano, N. & Montoya, J. 2007. Girasol, tiempo de barbecho y momentos y formas de aplicación de fósforo. V Congreso de ASAGIR 2007. Mayo. Buenos Aires.
- Bortolini, C.G.; Silva, P.R.F. & Argenta, G. 2000. Sistemas consociados de aveia preta e ervilhaca comum como cobertura de solo e seus efeitos na cultura do milho na sucessão. *Revista Bras. Ci. Solo.* 24:887-903.
- Bremner JM. 1996. Nitrogen, Total. En DL Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.*, SSSA-ASA, Madison, WI, USA. 1085-1123.
- Brown, S.M; Whitwell, J.T.; Touchton, J.T. & Burmester, C.H. 1985 Conservation tillage systems form cotton production. *Soil Science Society of American Journal.* 49:1256-1260.

- Buchanan, M. & King, L.D. 1993. Carbon and phosphorus losses from decomposing crop residue in no-till and conventional till agroecosystems. *Agronomy journal madison*. 85:631-638.
- Burke, W. D. & G.J. Bouma (eds.). 1986. Soil structure assessment. Rotterdam, A.A. Balkema. 92p
- Calegari, A.; Mondardo, A.; Bulisani, E.A.; Wildner, L.P.; Costa, M.B.B.; Alcântara, P.B.; Miyasaka, S. & Amado, T.J.C. 1993. Adubação verde no sul do Brasil. 2a. Edição. Assessoria e Serviços a Projetos em Agricultura Alternativa (AS-PTA), Rio de Janeiro, RJ. 346 pp.
- Calegari, A. & Peñalva, M. 1994. Abonos verdes. Importancia agroecológica y especies con potencial de uso en el Uruguay. Canelones, Uruguay MGAP (JUNAGRA)-GTZ.
- Calegari A. 2007. Sequestro de carbono, atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de manejo em um latossolo argiloso do sul do Brasil. Tese de doutorado em agronomía apresentada ao curso de pós-graduação em agronomia da Universidade estadual de Londrina Pr-Brasil.
- Calviño, P. A. & Sadras, V. O. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field crops research* 63:237-246.
- Cantero Martínez, C.O.; O'Leary, G.J. & Connor, D.J. 1995. Stubble retention and nitrogen fertilization in a fallow-wheat rainfed cropping system 1. soil water and nitrogen conservation, crop growth and yield. *soil tillage research* 34:79-94.
- Capurro, J.; Surjack, J.; Andriani, J.; Dickie, M. J.; Gonzalez C. & Vernizzi A. 2009. Evaluación de cultivos de cobertura, 2º Año. En: Jornadas Nacionales de Sistemas Productivos Sustentables. CD-ROM AACS. 10 y 11 de Agosto de 2009. Bahía Blanca. 3 pp.
- Carfagno, P. 2008. Cultivos de cobertura en agricultura de secano en región pampeana. Informe técnico. .
- Carfagno, P.; Eiza, M.; Quiroga, A. & Babinec, F. 2008. Cultivos de cobertura: Efecto sobre la dinámica del agua en el suelo. En: XXI Congreso argentino de la ciencia del suelo. Resúmenes. Anales, San Luis. AACS, CD-ROM.
- Casas, R. 2007a. Preservar la calidad y salud de los suelos: una oportunidad para la Argentina. Instituto de Suelos del CIRN. Informe Técnico (Inédito).
- Casas, R. 2007b. Cultivos de Cobertura: una agricultura sustentable. Suplemento Campo. La Nación. 24 de febrero de 2007.

- Clark, A.J.; Meisinger, J.J.; Decker A.M. & Mulford F.R. 2007. Effects of a grass-selective herbicide in a vetch-rye cover crop system on nitrogen management. *Agronomy Journal* 99(1):36-42.
- Clark, A.J.; Decker, A.M. & Meisinger, J.J. 1997. Seeding rate and kill date effects on hairy vetch-cereal rye cover crop mixtures for corn production. *Agron. J.* 86:1065-1070.
- Coelho, A.M. & França, G.E. De. 2003. Seja Doutor do seu milho: nutrição e adubação. São Paulo: Potafos. 1995 (Informações Agronomicas, 71). Coelho, A.M agricultura de precisión: Manejo Da Variabilidade especial e temporal dos solos e das culturas. Tópico emciência do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 3:209-248.
- Corak, S.J.; Frye, W.W. & Smith, M.S. 1991. Legume mulch and nitrogen fertilizer effects on soil water and corn production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1395-1400.
- Cordone, G. & Hansen, 1984. Utilización de cultivos invernales como abonos verdes o cobertura en la producción de maíz. *Carpeta de producción vegetal. Maíz. INTA Pergamino Información N° 64. Tomo VI. 6 pp.*
- Cordone, G. & Hansen, O. 1986. Los abonos verdes y el efecto sobre el rendimiento. *Carpeta de maíz. EERA-Pergamino. Tomo VIII CVP N° 77. 4 pp.*
- Cordone G. 1990. Efecto de las especies invernales utilizadas como abono verde o cobertura en la producción de maíz. Resultados de tres campañas. *Inf. 96. Carpeta de Producción vegetal, Tomo IX. Serie Maíz. EEA INTA Pergamino.*
- Cordone, G.E.; Galetto, M.L. R. De & Coca, G. 1991. Mineralización de los residuos de avena en dos sistemas simulados de labranza. XIII Congreso argentino de la ciencia del suelo. San Carlos de Bariloche. *Actas: 149-150.*
- Cordone, G.; Galetto, M.L. R. De & González, G. C. De. 1992. Estudio de la descomposición de residuos vegetales. I. La avena como abono verde o cobertura. *Inf. N° 94. Tomo XI. Serie Generalidades. Carpeta de producción vegetal. EEA INTA Pergamino. Octubre. 7 pp.*
- Cordone, G.E. & Galantini, J.A. 1994. Simulación de la dinámica de los residuos de la cosecha de trigo bajo dos sistemas de labranza in actas III Congreso Nacional de Trigo. Bahía Blanca, 26-28 de Octubre. 61-62.
- Cordone, G. E.; Andriulo, A. E. & Sylvie Recous. 1996. Evolución de los residuos de cosecha de maíz, girasol, soja y trigo según su ubicación en el suelo. XIII Congreso latinoamericano de ciencia del suelo. Aguas de Lindoia, SP, Brasil. *Actas en CD-Rom.*
- Corsi W.C. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. Centro de Investigaciones Agronómicas Dr. "Alberto Böerger" *Micelanea N° 40.*

- Cotrufo M.F.; Del Galdo I. & Piermatteo D. 2010. Litter decomposition: Concepts, Methods and future perspectives. In: Soil Carbon Dynamics. An Integrated Methodology. Ed. Kutsch W.L.; Bahn M. & Heinemeyer A. Cambridge University Press. New York.
- Da Silva D.A. 2004. Cultura antecessora e adubação nitrogenada na produção do milho em um sistema de plantio direto. Dissertação de mestrado. Dourados. MS Brasil: UFMS. Campus de Dourados.
- Da Silva, A.A.; Da Silva, P.R.F.; Suhre, E.; Argenta, G.; Strieder, M.L. & Rambo, L. 2007. Sistemas de coberturas de solo no inverno e seus efeitos sobre o rendimento de grãos do milho em sucessão. *Ciência Rural*. Santa María. 37(4):928-935.
- Daliparthi, J.; Herbert, S. & Veneman, P. 1994. Dairy manure application to alfalfa: Crop response, soil nitrate, and nitrate in soil water. *Agron. J.* 86:927– 933.
- Dardanelli J.L. 1998. Eficiencia en el uso del agua según sistemas de labranzas. En: J.L. Panigatti; H. Marelli; D. Buschiazzo y R. Gil (eds), *Siembra Directa*. INTA-SAGyP, pp. 107-115.
- Das Ros C.O. 1993. Plantas de inverno para cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto. Tese de Mestrado Santa María, EFSM, CPG em Agronomía, 85 pp.
- Das Ros, C. O. & Aita, C. 1996. Efeito de espécies de inverno na cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto. *Revista Bras. Ci. Solo*. Campinas. 20(1):135-140.
- Della Magiora, A.I.; Gardiol, J.M. Irigiyen, A.I. & Echarte, L. 2000. Estimación de la evapotranspiración de referencia con el método de pennman-monteith en Balcarce. *Revista de la Fac. de Agron.* 17:123-126.
- De María, I.C. & Castro, O.M. 1993. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um latossolo roxo, sob sistemas de manejo com milho e soja. *Revista Bras. Ci. Solo*. Campinas, SP, 17:471–477.
- Derpsch, R.; Rith, C.H.; Sidiras, N.; Kopke, U.; Krause, R. & Blanken. J. 1991. Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Londrina, IAPAR. 269 pp.
- Derpsch, R. & Calegari, A. 1992. Plantas para adubação verde de inverno. Londrina, Pr, Brasil, 2a. ed.. Instituto Agrônômica do Paraná (IAPAR. Circular Técnica, 73), 80pp.
- Díaz-Ambrona, C.G.H.; O’leary, G.J.; Sadras V.O.; O’connell M.G. & Connor D.J. 2005. Environmental risk analysis of farming systems in a semi-arid environment: effect of

- rotations and management practices on deep drainage Field Crops Research. 94:257-271.
- Diaz-Roselló, R. 1992. Evolución de la materia orgánica en rotación de cultivos con pasturas. Revista INIA de Investigaciones Agronómicas. 1:103-110.
- Ding, G.; Novak J.M; Amarasiriwardena D.; Hunt P.G. & Xing, B. 2002. Soil Organic Matter as affected by tillage management. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 421-429.
- Ding G.; Liu X.; Herbert S.; Novak J.; Dula A. & Xing B. 2005. Effect of cover crop management on soil organic matter. Geoderma. Article in Press.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. & Robledo C.W. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doran, J.W. & Parkin, B.T. 1994. Defining soil quality for a sustainable environment. Soil science society of America, inc. Special publication, N° 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Doran J.W. 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 44:765-771.
- Douglas Junior, C.L.; Allmaras, R.R.; Rasmussen, P.E.; Raming, R.E. & Roager Junior, N.C. 1980. Wheat straw composition and placement effects on 26 decomposition in dryland agriculture of the Pacific Northwest. Soil. Sci. Soc. Am. J. 44:833-837.
- Duarte G. 2002. Sistemas de producción de girasol en la región húmeda de argentina. en manual práctico para el cultivo de girasol. Editores Díaz-Zorita & Duarte. Pp. 313.
- Ebelhar, S.A.; Fye, W.W. & Blevins, R.L. 1984. Nitrogen from legume cover crops for no-tillage corn. Agronomy Journal. Madison. 76:51-55.
- Echeverría. H.E. 2009. Eficiencia de uso de nitrógeno en cultivos extensivos in: jornadas nacionales de sistemas productivos sustentables. CD-ROM AACCS. 10 y 11 de Agosto de 2009. Bahía Blanca. Pp. 21.
- EMBRAPA. 1999. Centro nacional de pesquisa de solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa produção de informações; Rio de Janeiro, Embrapa Solos. Pp. 412.
- EMBRAPA. 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2da edn. Rio de Janeiro, Embrapa Solos. 306 pp.
- Enwesor, W.O. 1967. Significance of the C: organic p ratio in mineralization of soil organic phosphorus. Soil sci., Baltimore. 103(1).

- Ernst, O. 2004. Efecto de la incorporación de una leguminosa invernal como cultivo de cobertura sobre Las necesidades de nitrógeno de maíz sembrado sin laboreo. Tesis, Especialización en siembra directa. UBA. Buenos Aires, Argentina.
- Ernst, O.; Mazzilli, S. & Siri-Prieto, G. 2009. Manejo de la reserva de agua del suelo para situaciones de estrés hídrico , Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A, Cassinoni. Paysandú, Uruguay.
- Espínola, J.I.A. 2006. Descomposição e liberação de nutrientes acumulados em leguminosas herbáceas perenes consorciadas com bananeira. Revista Bras. Ci. Solo. Vol. 30. Pp. 321-328.
- Fageria N.K.; Baligar, V.C. & Bailey, B.A. 2005. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. Communications in soil science and plant analysis. 36: 2733–757.
- Farahani H.; Peterson G. & Westfall D. 1998. Dryland cropping intensification: a fundamental solution to efficient use of precipitation. Adv. In. Agron. 64:197-223.
- FAO 1997. Inland Water Resources and Aquaculture Service, Fishery Resources Division Review of the state of world aquaculture.
- FAO Fisheries Circular. No. 886, Rev.1. Rome, FAO. 163 p.
- FAO, 2010. FaoStat - Producción - Productos por región - Argentina. En: <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx> PageID=339&lang=es. Consultado: 09-06-2012.
- Fernandes, L.A.; Furtini Neto, A.E.; Vasconcelos, C.A. & Guedes, G.A.A. 1998. Preparo do solo e adubação nitrogenada na produtividade do milho em latossolo sob vegetação de cerrado. UFL – Universidade Federal de Lavras – Lavras-MG. Revista Bras. Ci. Solo. Viçosa-MG. 22(2):247-254.
- Fernandez, R. J. 2001. Impacto global de las actividades agropecuarias. 2001. En: Impacto Ambiental en Agroecosistemas. L. Giuffre (Coord.). Ed. Facultad de Agronomía. UBA. Bs. As., Argentina
- Fernández, R.; Funaro, D. & Quiroga, A. 2005. Influencia de cultivos de cobertura en el aporte de residuos, balance de agua y contenido de nitratos. Boletín de divulgación técnica N° 87. Aspectos del manejo de los suelos en sistemas mixtos de las regiones semiárida y subhúmeda Pampeana.
- Fernández, R.; Galantini Já; Landriscini Mr.; Marinissen, A. & Enrique, M. 2007. Fertilización con N y S en trigo con distinto antecesor: efecto sobre la nutrición, el rendimiento y la calidad. Revista Invest. Agrop. (RIA) – INTA 36 (2):29-48.

- Fernández, R. & Quiroga A. 2009. Cultivos de cobertura. Costo hídrico de su inclusión en sistemas mixtos. En: I Jornadas Nacionales de Sistemas productivos sustentables. AACCS, UNS, CERZOS, CRIBABB. Bahía Blanca. CD ROM 2009. Pp. 2.
- Forte Lay, J.A., Quintela, R.M., Troha, A. y Suárez, S., 1984. Características bioclimáticas de las regiones subhúmedo-secas y semiáridas de la llanura y bosque pampeanos centrales, VIII Reunión Nacional para el estudio de las regiones áridas y semiáridas, Trelew, Chubut, 38 pág.
- Franzluebbbers A. J.; Hons F.M. & Zubere D. A. 1994. Long term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1639-1645.
- Franzluebbbers, A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66: 95-106.
- Frenquelli, J. 1955. Loess y limos pampeanos. Serie técnica y didáctica del Museo de La Plata, N°7
- Galantini, J.A.; Rosell, R.A.; Andriulo, A.E. & Iglesias, J.O. 1990. Crop residues and potentially mineralize nitrogen in semi-arid Argentina. XII Int. Soil Sci. Proc., Kyoto (En prensa, *Sci. Total Environ.*).
- Galantini, J.A.; Iglesias, J.O.; Cutini, H.; Krüger, S. & Venanzi S. 2004. Sistemas de labranzas: efecto sobre las fracciones orgánicas. XIX Congreso argentino de la ciencia del suelo. Paraná, Resumen Pp. 80, CD-ROM.
- Galantini, J.A.; Iglesias, J.O.; Maneiro, C.; Santiago, L. & Kleine, C. 2005. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso del suelo. *RIA*, 35 (1):15-30.
- Galantini, J.A. & Rosell, R.A. 2006. Long-term fertilization effects on SOM quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampeana soils. *Soil Tillage Res.* 87:72-79.
- Galantini J.A. & Landriscini, M.; 2007. Sistemas Productivos del Sur y Sudoeste Bonaerense. Momento de fertilización y la dinámica del N: Un caso de estudio. *Revista técnica especial. AAPRESID.*
- Galantini J.A.; Landriscini M.; Minoldo G. & Fernandez R. 2007. Sistemas productivos del Sur y Sudoeste Bonaerense. Las fracciones orgánicas como herramienta de diagnóstico. *Revista técnica especial. AAPRESID.*
- Galantini, J.; Iglesias, J.; Landriscini, M.; Suñer, L. & Minoldo, G. 2008. Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en sistemas naturales y cultivados. En: Estudio de las

- fracciones orgánicas en suelos de la argentina. Ed. Juan Alberto Galantini. 1ra edn. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. 309 pp.
- Galantini J. 2008. Cereales de invierno como cultivo de cobertura: su contribución al balance de carbono. En: VII Congreso Nacional Trigo y V Simposio Cereales Otoño Invernales, Resúmenes Santa Rosa. Universidad de La Plata, CD-ROM.
- Giacomini, S.J. 2001. Consorciação de plantas de cobertura no outono/inverno e fornecimento de nitrogênio ao milho em sistema plantio direto. Dissertação de Mestrado. Pp.115. Universidade Federal de Santa María. Pp. 91.
- Giacomini S. J.; Aita C. Chiapinotto I. C.; A. P Hübner; Marques M. G. & Cadore F. 2004. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto: II – Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de graos. Rev Revista Bras. Ci. Solo. 28:751-762.
- Giller, K.E. & Cadisch, G. 1997. Driven by nature: A sense of arrival or departure? In. Cadisch, G. & Giller, K.E. (ed.) Driven by nature: Plant litter quality and decomposition. Int., Cambridge, UK. 393–499.
- Gilmour, J.T; Mauromoustakos, A.; Gale, P.M. & Norman, R.J. 1998. Kinetics of crop residue decomposition: variability among crops and years. Soil Science Society of America Journal. 62:750-755.
- Glabe, A. E. 1979. El barbecho para trigo en la región semiárida pampeana. Información técnica N° 15. INTA, EEA Bordenave. 13 pp.
- Godwin, D. C.; & Jones, D. C. 1991. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. In: J. Hanks and J. T. Ritchie (eds.) Modeling plant and soil systems. Agronomy Monographs N° 31. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. 287-321.
- Goering, H. K. & Van Soest, P.J. 1970, Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications). Agric. Handbook 379. ARS, USDA, Washington, DC.
- Gonçalves S. L.; Saravia O. P.; Franchini J.C. & Torres E. 2010a. Decomposição de resíduos de milho e soja em função do tempo e do manejo do solo / Londrina: Embrapa Soja Pp. 19. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / ISSN 1678-6114; n.3).
- Gonçalves, S. L. Saravia, O. P.; Ferreira, O. & Torres, E. 2010b. Influência de fatores climáticos na decomposição de resíduos culturais de aveia e trigo /Londrina: Embrapa Soja, (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Soja, ISSN: 2178-1680; n.5).
- Gregorich, E.G.; Carter, M.R.; Angers, D.A.; Monreal, C.M. & Ellert, B. H. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soil. Can.J. of Soil Sci. 74:367-385.

- Gregory, J. M. Mc Carty, T. R; Ghidey F. & Alberts E. E. 1985. Derivation and evaluation of a residue decay equation. *Transactions of the ASAE* 28(1): 98-101.
- Green, D.G. & Read, W.L.1983. Water use efficiency of corn, sunflower and wheat with limiting soil moisture. *Can. J. Plant Sci.* 63:747-749.
- Handayanto, E.; Cadisch, G. & Giller, K.E. 1997. Regulating N mineralization from plant residues by manipulation of quality. In: Cadisch, G. & Giller, K.E. (org.) *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*. London: University of London; CAB International. 175-185.
- Hargrove, W.L. 1986. Winter legumes as a nitrogen source for no-till grain sorghum. *Agron. J.*79:281-286
- Havlin, J.I.; Beaton, J.D.; Tisdale SI & Nelson WI. 2005. *Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management*. Seventh Edition. Pearson-Pentice Hall, New Jersey, EUA.
- Haynes, R.J. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zeland. *Soil Biol. Biochem.* 32: 211-219.
- Haynes, R. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An Overview. *Adv. Agronomy.* 85: 221-268. Ity of mixed leguminous and non-leguminous cover crop residues in soil. *Biol. Fertil. Soils* 22:310–317.
- Heal, O.W.; Anderson, J. M. & Swift, M. J. 1997. Plant litter quality approaches. and decomposition: An historical overview. En: Cadisch, G. & Giller, K.E. (ed.) *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition*. CAB Int., Cambridge, UK. 3- 30.
- Heinrichs, R.; Aita, C.; Amado, T.J.C. & Fancelli, A. L. 2001. Cultivo consorciado de aveia e ervilhaca: Relação C/N da fitomasa e produtividade do milho em sucessão. *Revista de Ciência do Solo.* 25:331-340.
- Henry, D.C. 2011. Nitrogen contribution from red clover for corn following wheat in western Ohio. Thesis, Ohio State University.
- Henrot, J. & Brussaard, L. 1997. Determinants of *flemingia congesta* and *dactyladenia barteri* mulch decomposition in alley-cropping systems in the humid tropics. *Plant and soil.* 191:101–107.
- Heinzmann, F.X. 1985. Resíduos culturais de inverno e assimilação de nitrogênio por culturas de verão. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira, Brasilia.* 20:1021-1030.
- Hevia, G.; Buschiazzo, D.; Hepper, E.; Urioste, A. & Antón, E. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, texture, management. *Geoderma.* 116:265-277.

- Hevia, G. G.; Buschiazzo, D. & Montserrat Díaz Raviña. 2008. Variación estacional de compuestos orgánicos del suelo en diferentes sistemas de labranza. En: Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. Editor: Galantini, J. A. Universidad Nacional del Sur.
- Hicks, S.K.; Wendt, C. W.; Gannaway, J.R. & Baker, R.B. 1989. Allelopathic effects of wheat straw on cotton germination, emergence, and yield. *Crop Sci.* 1057-1061.
- Huggins, D.R.; Allamaras R.R.; Lamb J.A. & Radall G.W. 2006. Corn-soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 145-154.
- Hunt, H.W. 1977. A simulation model for decomposition in grasslands. *Ecology.* 58:469-84.
- Incerti, M.; Sale, P.W.G. & O'Leary, G.J. 1993. Cropping practices in the Victorian Mallee. 1. The effect of direct drilling and stubble retention on the soil water economy and yield of wheat. *Australian journal Experimental Agriculture.* 33:877-883.
- INTA/CIRN 1989. Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires, escala 1:500000. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, INTA, CIRN-Instituto de Evaluación de Tierras.
- Jama, B.A. & Nair, P.K.R. 1996. Decomposition- and nitrogen- mineralization patterns of *Leucaena leuccephala* na *Casia siamea* mulch under tropical semiarid conditions in Kenia. *Plant and Soil, Netherland.* 179: 275-285.
- Janssen, B.H. 1996. Nitrogen mineralization en relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and soil. Netherland.* 181:39-45.
- Jensen, E.S. 1997. Nitrogen immobilization and mineralization during initial decomposition of ¹⁵N-labelled pea and barley residues. *Biologic Fertility Soils, Berlin.* 24:39-44.
- Karlen, D.L.; Kramer, L. A. & Logsdon, S.D. 1998. Field-scale nitrogen balances associated with long-term continuous corn production. In: *Agron. J.* 90:644-650. KLUTE, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. p. 635-661. In: A. Klute (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd edition Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
- Kliemann, H.J.; Braga Braz, A. J. P. & Silveira, P.M. 2006. Taxas dedecomposição de resíduos de espécies de cobertura em latossolo vermelho distroférico. *Pesquisa Agropecuária Tropical.* 36(1):21-28.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. In *Methods of Soil Analysis, Part 1. 2nd Ed. A. Klute (ed.) Agron. Monogr. No.9. ASA, Madison WI, pp.653-661.*
- Koeing, R.T. & Cochran, V.L. 1994. Descomposition and nitrogen mineralization from legume and non-legume crop residues in a subarctic agricultural soil. *Biologic Fertility Soil, Berlin.* 17:269-275.

- Kumar, K. & Goh, K.M. 2003. Nitrogen Release from crop residues and organic amendments as affected by biochemical composition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. v.34, n. 17, p. 2441-2460.
- Kuo, S. & Sainju, U.M. 1998. Nitrogen mineralization and availability of mixed leguminous and non-leguminous cover crop residues in soil. *Biol. Fertil. Soil*. 26:346-353.
- Kuo, S.; Sainju, U.M. & Jellum, E.J. 1997. Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:145-152.
- Krüger, H.R. 1993. Barbecho para cultivo de verano y humedad del suelo en Bordenave (Pcia. de Bs. As.). XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza. 295-296.
- Li, C. 1995. Modeling Impact of Agricultural Practices on Soil C and N₂O emissions. In: Lal, R.; Kimble, J.; Levine, E. & Stewart, B.A., Eds. *Soil management and greenhouse effect*. Boca Raton, Advances in Soil Science, CCR Lewis Publishers. 101-112.
- Loomis, R.S. & Connor, D.J. 1996. *Crop ecology. Productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press, Cambridge. 538 pp.
- Lorenzatti, S. 2008. Tendencias en la producción. XVI Congreso de Aapresid. Rosario.
- Magie, C.A.; Pearson, R.W. & Hiltbold, A.E. 1967. Toxicity of decomposing crop residues to cotton germination and seedling growth. *Agronomy Journal* 59:197-199.
- M.A.A 2008. Nuestra Provincia. Nuestro Campo. El sector agropecuario de la provincia de Buenos Aires. Provincia de Buenos Aires-Estadísticas. Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires.
- MAIZAR 2006. En: <http://www.maizar.org.ar/vertext.php?id=116> Consultado: 09-06-12
- Mansoer, Z.; Reeves, D.W. & Wood, C.W. 1997. Suitability of sunn hemp as an alternative late-summer legume cover crop. *Soil Science Society of American Journal* 61: 246-253.
- M.A.P. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Ministerio de Agricultura y Pesca. Tomo III. 452 pp.
- Martinazzo, R. 2006. Diagnostico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, Brasil.
- Marelli H.J., 1998. La siembra directa como práctica conservacionista. En: J.L. Panigatti; H. Marelli; D. Buschiazzo y R. Gil (eds), *Siembra Directa*. INTA-SAGyP, pp. 127-140.
- Mary, B.; Recous, S.; Darwis, D. & Robin, D. 1996. Interactions between decompositions of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil*, v. 181, p. 71-82, 1996.
- Melillo, J.M.; Aber, J.D. & Muratore, J.F. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*. 63(3):621-626.

- Micucci F.G. 2004 Impacto de las practicas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua en los cultivos extensivos de la region pampeana argentina. Cátedra de Fertilidad de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
- Miguez, F.; Villami, M.; Crandall, S.; Ruffo, M. & Bollero, G. 2009. Los efectos de los cultivos de cobertura sobre los rendimientos de maíz. Actas Simposio "Fertilidad 2009". IPNI Cono Sur y Fertilizar AC. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Miguez, F.E. & Bollero, G.A. 2005. Review of corn yield response under winter cover cropping systems using meta-analytic methods. *Crop Sci.* 45:2318-2329.
- MINAGRI. 2012. Producción y área sembrada de Maíz en la Provincia de Buenos Aires. <http://www.siaa.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>. Consultado: 09-06-2012.
- Mitchell, W.H. & Tell, M.R. 1977. Winter-annual cover crops for no tillage corn production. *Agronomy Journal*. Madison. 69:569-573.
- Monegat, C. 1991. Plantas de cobertura do solo. Características y manejo en pequeñas propiedades. Ed. do autor. Chapecó. 337 pp.
- Monteiro, H.C.F.; Cantarutti, R.B.; Nascimento J.R, d.; Regazzi, A.J. & Fonseca, D.M. 2002. Dinâmica de decomposição e mineralização de nitrogênio em função da qualidade de resíduos de gramíneas e leguminosas forrageiras. *R. Bras. Zootec.*, 31:1092-1102,
- Monzon, J.P.; Sadras, V.O. & Andrade, F.H. 2006. Fallow soil evaporation and water storage as affected by stubble in sub-humid (Argentina) and semi-arid (Australia) environments. *Field Crops Research*. 98: 83-90.
- Müller, M.M.; Sundman, V.; Soininvaara, O. & Meriläinen A. 1988. Plant Soil. 158:263–274. Effect of chemical composition on the release of nitrogen from methods for agricultural plant materials decomposing in soil under fields conditions *Biol. Fertil. Soils*. 6:78–83.
- Müller, D.; Saluzzio M. & De Battista J. 2008. Comparación de distintos CC en un suelo Vertisol. XXI Congreso AACCS, San Luís.
- Muñoz-Carpena, R.; Ritter, D.D.; Bosch; Schaffer T.L. & Potter. 2008. Summer cover crop impacts on soil percolation and nitrogen leaching from a winter corn field. *Agricultural water management*. 95:633–644.
- Muzilli, O.; Oliveira, E.L. & Calegari, A. 1989. Adubação do milho. Fundação Cargil, Campinas. 29 pp.
- Nyakatawa, A. E.; Reddy, K. & Sistani, K. 2001. Tillage, cover cropping, and poultry litter effects on selected soil chemical properties. *Soil. Tillage Res.* 58:69-79.

- Oglesby, K.A. & Fownes, J.H. 1992. Effects of chemical composition on nitrogen mineralization from green manures of seven tropical leguminous trees. *Plant Soil* 143(1):127–132.
- Ohland, R.A. A. 2002. Adubos verdes e nitrogênio em cobertura na cultura do milho (*Zea mays* L.) em plantio direto. Dissertação de mestrado. Dourados: UFMS, 2002, MS, Brasil.
- O'Leary, G.J. & Connor, D.J. 1997. Stubble retention and tillage in a semi-arid environment. 3. Response of wheat. *Field Crops Research* 45: 39-50.
- Ovejero, F. 1987. Evaluación química, biológica de los forrajes. Dirección de desarrollo de recursos humanos. COMCAL.
- Palm, C.A. & Sanchez, P.A. 1991. Nitrogen release from de leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biologic Biochemistry*. 23(1):83-88.
- Panigatti, J.L.; Marelli, H.; Buschiazzo, D. & Gil, R. 1998. Siembra Directa Vol I. Editorial Hemisferio Sur, Buenos Aires. 333 pp.
- Panigatti, J.L.; Marelli, H. & Buschiazzo, D. 2001. Siembra directa Vol II. Editorial INTA. Buenos Aires. 377 pp.
- Parton, W. J.; Silver W.L. & Burkel I.C. 2007 Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*. Vol.315. 19 de Janeiro de 2007.
- Parton, W.J.; Ojima, D.S.; Cole, C.C. & Schimel, D.M. 1994. Rate of nitrogen mineralized from general model for soil organic matter dynamics: Sensitivity to litter incorporated crop residues as influenced by temperature. p. 147–167. In R.B. Bryant and R.W. Arnold (ed.) *Quantitative modeling of soil forming processes*. *Plant Soil* 125:213–220. SSSA Spec. Publ. 39. SSSA, Madison, WI.
- Paustian K.L.; Six J.; Elliot E.T.; Hunt H.W. 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*. 48:147-163.
- Pedrol, H.; Castellarin, J. & Salvagiotti, F. 2004. Importancia del maíz en la rotación de los cultivos. Sustentabilidad y diversificación de riesgos productivos. EEA INTA Oliveros. Santa Fe. I día XXI. 141-146.
- Pordomingo, A.J.; Podomingo, A.B.; Barbeito, V.A.; Volpi Lagreca G.; Gatti M. & Quiroga A. 2004. Producción y calidad del forraje de verdes de invierno en siembra directa bajo fertilización nitrogenada y fosforada. En: *Producción y calidad de verdes de invierno*. Boletín de Divulgación técnica N° 80. Ediciones INTA.
- Puget, P.; Angers, D.A. & Chenu, C. 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biol. Biochem*. 31:55–63.

- Puget, P. & Lal, R. 2005. Soil organic and nitrogen in a mollisol in central ohio as affected by tillage and land use. *Soil Tillage Res.* 80:2001-213.
- Puriccelli, C.A. 1977. Eficiencia hídrica de los barbechos y sus efectos sobre los rendimientos de los cultivos en un sector de la República Argentina. Comisión Nacional para la conferencia de ls Naciones Unidas sobre el agua. INTA, EERA, Marcos Juarez – Córdoba. Reuniones técnicas y Científicas. Mar del Plata, 14 al 25 de Marzo. 18 pp.
- Quemada, M. & Cabrera, M.L. 1995. Carbon and nitrogen mineralized from leaves and stems of four cover crops. *Soil Sci. Am. J.* 59:471-477.
- Quemada, M. 2004. Predicting crop residue decomposition using moisture adjusted time scales. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70: 283-291.
- Quiroga, A.; Ormeño, O.; Bono, A.; Rodríguez, N.; Montoya, J. & Babinec F. 1999. Aspectos del manejo de suelo y productividad del girasol en la región semiárida pampeana. *Bol. Tec.* N° 63 EEA Anguil.
- Quiroga, A.; Fernández, R.; Funaro, D. & Peinemann, N. 2008. Materia orgánica en molisoles de la región semiárida pampeana. Influencia sobre propiedades físicas y productividad. En: *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la argentina*. Ed. JA Galantini. 1ra edn. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Pp. 309.
- Quiroga, A.; Fernández, R.; Frasier, I. & Scianca C. 2009. Cultivos de cobertura. Análisis de su inclusión en distintos sistemas de producción. En: *I Jornadas Nacionales de Sistemas Productivos Sustentables*. Bahia Blanca. CD-ROM AACS 2009. Pp. 9.
- Ranells, N.N. & Wagger, M.G. 1996. Nitrogen release grass and legume cover crop monocultures and bicultures. *Agron. J.* 88:777-782.
- Rasmussen, H.J. 1999. Impacto of ploughless soil tillage on yiel and soil quality: a scandinavian riview. *Soil Till. Res.* 53:3-14.
- Ravelo, A.C. & Seiler R.A. 1978. Agroclima de la provincia de Córdoba: Probabilidades de lluvia. *RIA* 3(XIV):71-136.
- Reeves, D.W. 1994. Cover crops and rotation. Rio de Janeiro, assessoria e serviços e projetos em agricultura alternativa AS-PTA, 1993. 346 pp.
- Reeves, D.W.; Wood C.W. & Touchton, J.T. 1993. Timing nitrogen application for corn. In: *A winter legume conservation-tillage system*. *Agronomy Journal.* 85:30-85.
- Rego, P.G. 1994. Economia das rotações de culturas em plantio direto. *Revista Mensal Batavo*. Fundação ABC, ed.31, p.20-28.

- Reicosky, D.C. & Forcella, F. 1998. Cover Crop And Soil Quality Interactions In agroecosystems. *J. Soil Water Conserv.* 53:224-229.
- Reicosky D. 2007. Beneficios ambientales globales del manejo del carbono del suelo. XII Congreso AAPRESID, 41-48pp.
- Restovich, S.B.; Andriulo, A.E. & Améndola, C. 2006. Definición del momento de secado de diferentes cultivos de cobertura en la secuencia Soja-Maíz. In; XXI Congreso argentino de la ciencia del suelo. Resúmenes. Anales, Salta. AACCS. Pp. 7.
- Restovich, S.B.; Andriulo, A.E.; Irizar, A.B.; Amendola, C. 2012. Efecto de corto plazo de cultivos de cobertura sobre el carbono lábil del suelo. *Experimental Agropecuaria Pergamino*, INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). XIX Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo XXIII congreso argentino de la ciencia del suelo Mar del Plata, Argentina - Resúmenes. Anales, Pp. 6.
- RIAN 2010. Boletín mensual. Red de información agropecuaria Nacional- Área del Centro Regional Buenos Aires del INTA.
- Richards, L.A. 1947. Pressure-membrane apparatus-construction and use. *Agricultural Engineering* 28: 451-454.
- Rojas, A.C.de & Conde A.A. 1980. Determinación del Índice de Erosividad de las lluvias (segunda aproximación). *Actas IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Tomo II Paraná (Entre Ríos).* 873-880
- Ruffo, M.L. 2003. Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura en Argentina. *Actas XI Congreso de AAPRESID.* 171-176.
- Ruffo, M. & Bollero, G.A. 2003a. Residue decomposition and prediction of carbon and nitrogen release rates based on biochemical fractions using principal-component regression. *Agronomy Journal.* 95:1034-1040.
- Ruffo, M. & Bollero, G.A. 2003b. Modeling rye and hairy vetch residue decomposition as a function of degree-days and decomposition-days. *Agronomy Journal.* 95:900-907.
- Ruffo, M. 2004. Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura en Argentina. *Actas XI Congreso nacional de AAPRESID. Tomo 1: 171-176.* Rosario, Argentina.
- Sá, J.C.M. 1989. Efeito das doses e época de aplicação de nitrogênio na produção de milho, após resteva de aveia preta, sobre plantio direto. *Fundação ABC. Castro-PR (Boletín técnico nº 4. 1989).*
- Sá, J.C.M. 1996. Manejo de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto. *Passo Fundo, Aldeia Norte.* Pp. 23.

- Sá , J. C. M.; Carli, R. S; Antunes, E. A. P.; Briedis, C.; Simon L.; Romko, M.L; Siebert, F. & Elias S. 2009. Índice de extratificación do C como indicador de qualidade do plantio direto. Congreso de AAPRESID. Rosario.
- Sá Pereira, E. de; Venanzi S. & Krüger H. 2004. Verdeo de invierno previo al cultivo de Girasol. Su influencia sobre el agua del suelo. XIX Congreso argentino de la ciencia del suelo. Paraná. AACCS, CD-ROM Pp.10.
- Sa Pereira, E. de. 2006. La soja en el partido de Coronel Suárez y el sudoeste bonaerense. 3º Congreso de Soja de Mercosur, Merco soja 2006. Rosario
- Sá Pereira, E. de; Quiroga, A. & Galantini J. 2008a. Posibilidades de utilización de gramíneas y leguminosas invernales como cultivos de cobertura. VII Congreso nacional trigo y V Simposio Cereales otoño invernales. Santa Rosa. CD-ROM.
- Sá Pereira E. de & Kruger, H. 2008b. Construcción de un instrumento de bajo costo para la obtención de muestras de suelo inalterado. En; XXI Congreso argentino de la ciencia del suelo. Resúmenes. Anales. San Luis. AACCS, CD-ROM Pp.3.
- Sá Pereira E. de; Duval M.; Iglesias J. & Galantini J. 2013. Efecto de diferentes manejos sobre las fracciones orgánica en un argiudol. Jornadas Nacionales de Manejo y Conservación de Suelos. Resúmenes. Buenos Aires. 2, 3 y 4 de Julio. AACCS. Buenos Aires. CD-ROM.
- Sadras, V. O. 2002. Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis. *Field Crops Research* 77: 201-215.
- Sadras, V. O.; O'leary G. J. & Roget D. K. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation *Field Crops Research* 91:131-148.
- SAGPyA. 2010. Agricultura - Series y estadísticas - Maíz. En:<http://190.220.136.179/index.php/series-por-tema/agricultura>.
- Saiju, U.M. & Singh B.P. 2001. Tillage, cover crop and kill-planting date effects crop yield and soil nitrogen. *Agronomy Journal*. 93:878-886.
- Sainz Rozas, H.; Echeverría, H.; Eyherabide, M.; Barraco, M.; Ferraris, G. & Angelini, H. 2012. Niveles de boro disponible en suelos de la Región Pampeana. En: XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Salas, H. P.; Lovera, E.F.; Basanta, M.; Giubergia, J.P; Martellotto, E. & Salinas, A. I. 2005. Producción de soja y maíz en función de la rotación y del sistema de manejo en un haplustol típico de la región central de Córdoba. *Boletín Técnico EEA Manfredi*. 1-11.

- Salton, J.C.; Mielniczuk, J. 1995. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um solo podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). *Revista Bras. de Ciên. do Solo*. 19:313-319.
- Sawchik, J. 2001. Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo-pastura bajo laboreo convencional y siembra directa. En: Díaz-Rosello, R. (Ed) *Siembra Directa en el Cono Sur*. PROCISUR.
- Schomberg, H.H. & Steiner, J.L. 1994. Nutrient dynamics of crop residues decomposing on a follow no-till surface. *Soil Science Society America Journal*, Madison. 63:607-013.
- Schnitzer, M. 2000. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. *Adv. Agron.* 68:1-58.
- Schunke, R.M. 1998. Qualidade, decomposição e liberação de nutrientes da liteira de quatro cultivares de panicum maximun. Tese (Doutorado em Solos), UFRRJ, Seropédica-RJ. 88 pp.
- Scianca, C. M.; Álvarez C.; Barraco M.; Quiroga A. & Zalba. P. 2006a. Cultivos de cobertura. Aporte de carbono e influencia sobre propiedades edáficas. En: XX Congreso Argentino de la ciencia del suelo. AACs Salta. CD-ROM. Pp. 369.
- Scianca, C. M.; Alvarez C.; Barraco, M.; Pérez, M. & Quiroga, A. 2006b. Cultivos de cobertura en sistemas orgánicos. Aporte de carbono y dinámica de malezas. XX Congreso AACs, Salta. CD-ROM.
- Scianca, C. M. 2010. Cultivos de cobertura en molisoles de la región pampeana. Producción de materia seca, eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno e incidencia sobre el cultivo de soja. Tesis de Magister en Cs. Agrarias. Universidad Nacional del Sur
- Scian, B.V and J.O.Pierini, 2013. Variability and trends of extreme dry and wet seasonal precipitation in Argentina. A retrospective análisis, *Atmósfera* 26 (1), 3-26.
- Seligman, N.G. & Van Keulen, H. 1981. PAPRAN: A simulation model of anual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In: Frissel, M.J. & Van Veen JA (eds). *Simulation of nitrogen bahaviour of soil plant system*. Wageningen. Pudoc. 192-220.
- Silva, M. L. N.; Curi N.; Blancaneaux P.; Lima, J. M. & Carvalho A .M. 1997. Rotação adubo verde – milho e adsorção de fósforo em Latossolo Vermelho-Escuro. *Pesq. Agrop. Bras.*, Brasília, v. 32, nº6, p. 649 – 654.
- Silva, P.R.F.; Argenta, G.; Sango, L.; Strieder, M.L. & Silva, A.A. 2006. Estratégias de manejo de cobertura de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema de semeadura direta. *Ciência Rural*, Santa Maria. Vol.36. Nº3. Pp.1011-1020.

- Siri-Prieto, G.; Ernst, O.; Ingold, J.; Feller, M. & Bastos, M. 2006. Cover crop and maturity group effects on soil water content and soybean yield. XVII ISTRO Conference, Kiel University. En: International soil and tillage research organization. Proceedings of the 17th ISTRO Conference, August 2006, Kiel, Germany <http://iworx5.webextra.net/~istroorg/download/ISTRO2006.zip>. Consulta agosto 2009.
- Sisti, C.P.J.; Santos, H.P.; Kochhann, R.A.; Alves, B.J.R.; Urquiaga, S. & Boddey, R.M. 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*. 76:39-58.
- Six, J.; Callewaert, P.; Lenders, S.; De Gryze, S.; Morris S.J.; Gregorich E.G.; Paul E.A & Paustian K. 2002. Measuring and Understanding Carbon Storage in Afforested Soils by Physical Fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1981:1987.
- Smith, M.S.; Frye, W.W, & Varco, J.J. 1987. Legume Winter Cover Crops. In: B.A. Stewart (Ed.) *Advances in Soil Science*. 7:95-139. Springer-Verlag, New York.
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 365 pp.
- SSSA. 1997 *Glossary of Soil Science Terms*. Soil Science Society of America (SSSA), Madison, WI, USA.
- Stott, D.E; Stroo, H.F.; Elliott, L.F.; Papendick, R.I. & Unger, P.W. 1990. Wheat residue loss from fields under no-till management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:92 –98.
- Stroo, H. F.; Bristow, K.L.; Elliot, L.F.; Papendick, R.I. & Campbell, G.S. 1989. Predicting rates of wheat residue decomposition. *soil science society of America journal*. 53(1):91-99.
- Studdert, G.A.; Echeverria, H.E. & Casanovas, E.M. 1997. Crop-Pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a typic argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1466-1472.
- Studdert, G.A.; Dominguez, M.E.; Videla, C. & Echeverria, H. 2008. Materia orgánica particulada y su relación con la fertilidad nitrogenada en el sudeste bonaerense. En: *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la argentina*. Ed. Juan Alberto Galantini. 1ra edn. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. 309 pp.
- Sullivan, P.G.; Parrish, D.J. & Luna, J.M. 1991. Cover crop contributions to N supply and water conservation in corn production. *Am. J. Alter. Agric.* 6:106-113.
- Ta, T.C. & Farris, M.A. 1987. Species variation in the fixation and transfer on N from legumes tu associated grasses. *Plant and Soil*. 98:265-274.
- Tan, Z.; Lal R.; Owens L. & Izaurralde R.C. 2007. Distribution of light and heavy fraction of soil organic carbón as related to land use and tillage practice. *Soil Till. Res.* 92: 53-59.

- Thom, H. 1958. A note on the Gamma distribution. *Monthly Weather Review* 86, 117-122.
- Thorn, H.C.S. 1966. Some Methods of Climatological Analysis. WMO Technics/Note Number No. 81, 81 16-22.
- Tian, G.; Kang, B.T. & Brussaard, L. 1992. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions-decomposition and nutrient release. *Soil Biologic Biochemistry Exter.* 24:1051-1060.
- Tian, G.; Kang, B.T. & Brussard, B.L. 1993. Mulching effect of plant residues with chemically contrasting compositions on maize growth and nutrients accumulation. *Plantand Soil. Tha Hagua.* 153:179 – 187.
- Torres, D. & Del Pino A. 1995. Dynamics of soil nitrogen in agroecosystems with addition of fertilizer and incorporation of legumes. En: Ljunggren, H; Favelukes, G, & Dankert, M.A.; (eds) SAREC, Conference Efficient use of Biological Nitrogen Fixation: Accomplishments and Prospects. Buenos Aires. 5 y 7 de December de 1995.
- Torbert, H.A.; Donald, W.; Reeves, R. & Mulvaney, L. 1996. Winter legume cover crop benefits to corn: rotation vs. fixed-nitrogen effects. *Agron. J.* 88:527-535.
- Touchton, J. T.; Rickerl, D.H.; Walker, R.H. & Snipes, C.E. 1984. Winter legumes as nitrogen source for no-tillage cotton. *Soil and Tillage Research* 4:391-401.
- Trinsoutrot, I.; Recous, S.; Bentz, B.; Linères, D.; Chèneby, D. & Nicolardot, B. 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:918-926.
- Tricart, J.L. 1973. Geomorfología de la Pampa Deprimida. Base para los estudios edafológicos y agronómicos. Plan mapa de suelos de la Región Pampeana. XII Colección Científica, INTA.
- Vanzolini, J.I. 2011. La vicia villosa como cultivo de cobertura: efectos de corto plazo sobre el suelo y la productividad del maíz bajo riego en el Valle Bonaerense del Río Colorado. Tesis de Magister en Cs. Agrarias. Universidad Nacional del Sur
- Varco, J.J.; Frey, M.S.; Smith, M.S. & Mac Kown, C.T 1993. Tillage effect on legume decomposition and transformation of legume and fertilizer nitrogen-15. *Soil Science Society of American Journal* 57:750-756.
- Vaughan, J.D. & Evanylo, G.K. 1998. Corn response to cover crop species, spring desiccation time, and residue management. *Agron. J.* 90:536-544.
- Venanzi, S.; Sá Pereira, E. de; Fernandez, E. & Krüger, H. 2006. Uso del agua por dos secuencias de cultivos en el sur de la región semiárida pampeana. In: XX Congreso

- argentino de la ciencia del suelo. Congreso AACS. Salta. CD-ROM Resúmenes. Pp. 475.
- Vigil, M. F. & Kissel, D. E. 1988. Equations for estimating the amount of nitrogen mineralized from crop residues. *Soil Sci. Soc. Am.J., Madison*. 55:757 – 761.
- Wander, M. & Traina, S. 1996. Organic fractions from organically and conventionally managed soils: I. carbon and nitrogen distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1081– 1087.
- Wieder, R. K. & Lang, G.E. 1982. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology*. 63(6):1636-164.
- Wilks, D.S., 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, New York, 467 pages.
- Wiethölter, S. 1993. Adubação nitrogenada em triticale como base no teor materia orgânica do solo. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT. 25 pp.
- Worsham, A. D. 1986. No-Tillage research update – North Carolina In: Philips, R.E. (ed.). *Southern Region No-Tillage conference*. Southern Region Series Bulletin 319, Lexington, K.Y.
- Worsham, A. D. 1991. Role of cover crops in weed management and water quality. Pp. 141-145 In: Hargrove, W.L. (ed.) *Cover Crops for Clean Water*. Proc. of an International Conference, April 9-11, 1991, Jackson, TN. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA.
- Yamada, T. 1996. Adubação nitrogenada do milho: quanto, como e quando aplicar. *Inf. Agron.*, 74:1-5.
- Yamada, T. & Abdalla, S.R.S. 2000. Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada do milho? *Informações Agronômicas, Piracicaba: POTAFÓS*. 91:1-5.

ANEXO

Campaña 2005/06

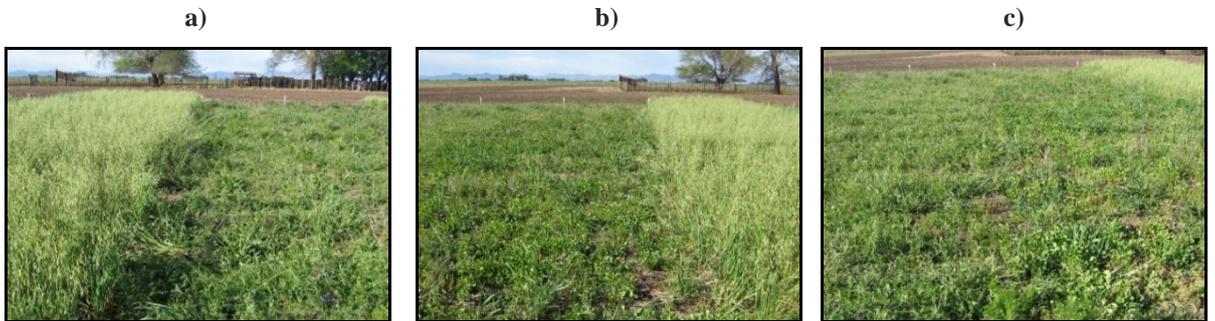


Foto 1: **a)** Avena (izq.) y vicia (der.); **b)** trébol (izq.) y avena (der.); **c)** Vicia (izq.), trébol (cen.) y avena (der.).

(E 1)

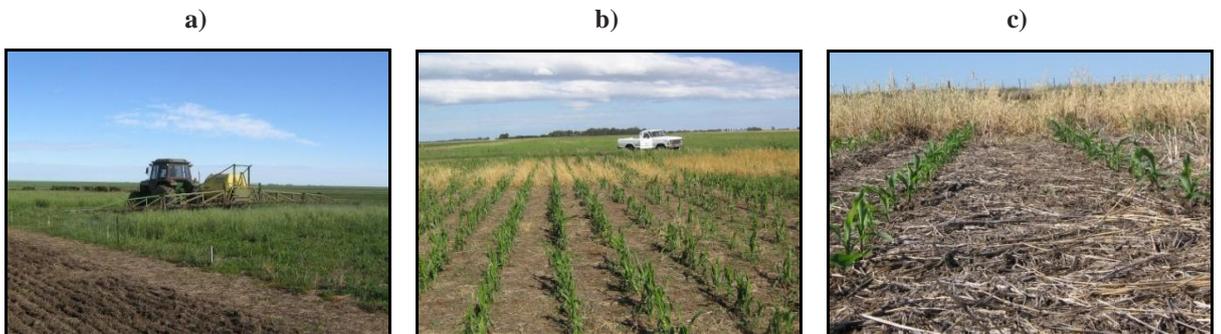


Foto 2: **a)** Control químico de CC.; **b)** Maíz/barbeho y avena; **c)** Maíz/vicia y avena (fdo.).

(E 1)



Foto 3: Maíz en madurez fisiológica

(E 1)

Campaña 2006/07

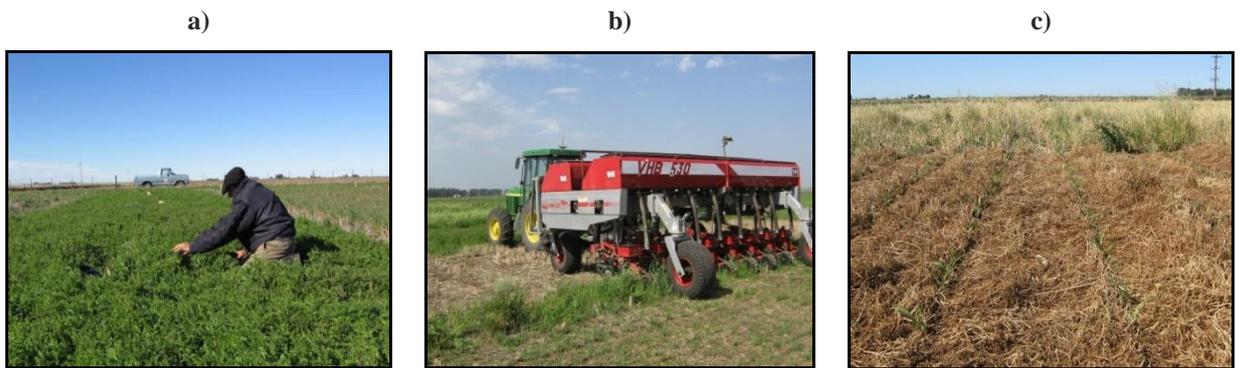


Foto 4: **a)** Vicia (1° corte); **b)** Siembra del ensayo de maíz; **c)** Emergencia maíz/vicia
(E2)

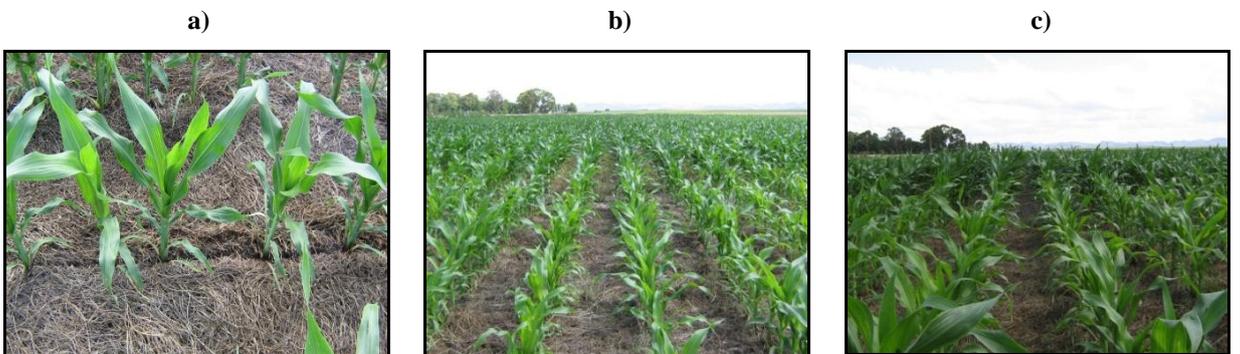


Foto 5: **a, b y c)** Maíz sobre vicia. Pje. G8 (E2).



Foto 6: Maíz emergiendo sobre antecesor vicia y barbecho. **a)** Vicia/mz. (adelante), barbecho/vicia (atrás); **b)**
Vicia/ maíz.
(E2)



Foto 7: Maíz en V4-V6 implantado sobre CC de vicia.

(E2)

Campaña 2007/08

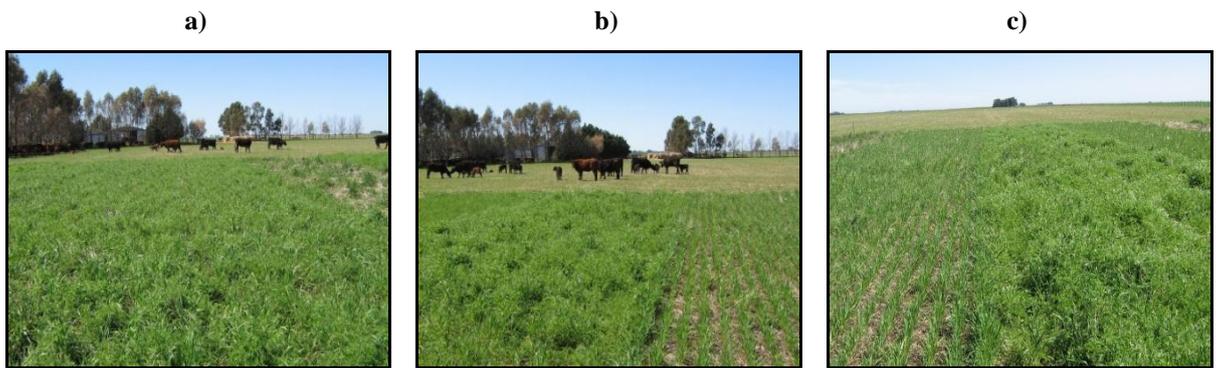


Foto 8: **a)** Avena + Vicia; **b)** Vicia (der) y Avena (izq.); **c)** Vicia (izq.) y avena (der.).
(E3)



Foto 9: Maíz en V2-V4 sobre vicia
(E 3)



Foto 10: **a)** Maíz en V8 sobre vicia; **b)** Maíz en floración mz./avena (adelante) y Maíz/vicia (atrás).
(E 3)



Foto 11: Maíz en R3 (grano lechoso).
(E 3)



Foto 12: Vista aérea del ensayo de CC en Cura Malal
(E5).

a)



b)



c)



d)



Foto 13: **a, b** vicia/maíz. (Izq.), avena/maíz. (der.); **c** vicia/maíz (der.), avena/maíz (izq.) y **d** avena/maíz. (Adelante), vicia/maíz (atrás). (E 5)

Ensayo en Invernáculo (CERZOS – CRIABB – CONICET)



Foto 14: Muestreador de macetas a campo.



Foto 15: **a)** Extracción de la muestra; **b)** Invernáculo (CERZOS, CCT-Bahía Blanca del CONICET) donde se instaló el ensayo en macetas.



Foto 16: Macetas en invernáculo noviembre 2007



Foto 17: Macetas en invernáculos (ensayo)



Foto 18: Descomposición de residuos a) Trébol; b) Avena; c) Vicia.

Agosto 2008



Foto 19: Muestreo de macetas en Laboratorio



Foto 20: Muestras de superficie (0-5 cm) y profundidad (5-15 cm)