

Universitat de Lleida

Efecto de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) y del abonado nitrogenado en el maíz (*Zea mays* L.) y el trigo (*Triticum aestivum* L.) en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo en regadío

Astrid Ballesta Remy

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Universitat de Lleida
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària

Tesis Doctoral

Efecto de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) y del abonado nitrogenado en el maíz (*Zea mays* L.) y el trigo (*Triticum aestivum* L.) en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo en regadío

Memoria de tesis presentada por Astrid Ballesta Remy para optar al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universitat de Lleida

Dirigida por el Dr. Jaume Lloveras Vilamanyà, profesor del Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària de Lleida.

El director de la Tesis
Jaume Lloveras Vilamanyà

2007

Agradecimientos, Agraïments, Remerciements

Esta tesis ha sido posible gracias a la financiación recibida de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología. Parte de los análisis de suelos han sido financiados por el CDTI-CICYT. Gràcies també al programa *Martina Castells* de la Universitat de Lleida que m'ha permès donar la darrera empenta.

Pero además, a lo largo de todos los años que ha representado esta tesis doctoral, muchas personas me han ayudado de un modo u otro, más o menos directamente. Quisiera expresar-les mi agradecimiento ya que este trabajo ha sido posible en parte gracias a ellas.

A qui més he d'agrair és al meu Director de Tesi, el Dr. Jaume Lloveras Vilamanyà per haver-me introduït al món de les rotacions i per tots els coneixements que m'ha transmès. Per l'aprenentatge científic però també per la perseverança al llarg dels anys en el desenvolupament d'aquesta tesi. Després de dedicar-me tantes hores de camp i de despatx, gràcies per la paciència, pels ànims i també per l'amistat.

Gràcies a l'Alex Abad, company de camp i d'experiència, per estar sempre pendent de tantes coses, pels consells fins a última hora. També voldria agrair la responsabilitat i les ajudes del personal del Centre UdL-IRTA i del grup d'Agronomia i Qualitat dels Cultius Extensius de l'ETSEA.

Als alumnes que han estat implicats en aquest estudi a través del seu TPT o el seu PFC per la seva ajuda i per seu entusiasme: la Marta Montori, en Jaume Badia, en Marc Pons, en Ramon Timoneda, en Joan Messalles i, en certa manera, en Xavier Miarnau.

A tot el personal del LAF, per la seva eficàcia i disponibilitat. I per la qualitat del seu treball. I al Lluís Ardanuy per facilitar-me la tercera dimensió a les fotos.

Gràcies a aquells companys de la ETSEA-Universitat de Lleida que han volgut en un moment o l'altre transmetre'm coneixements, idees i consells. En tants anys em fa por deixar algú. També als que m'han recolzat i animat aquests darrers mesos.

A ce point, je voudrais remercier Alexandre Sahli et Hans Üli Dierauer, pour m'avoir introduit, lors de mon séjour à Reckenholz, au monde de l'expérimentation au champ, avec la rigueur « suisse ».

Tots els que m'han anat animant: com va la tesi? alors cette thèse? ¿qué tal la tesis? encara que molt sovint no tenien ni idea del que això representava. Solament les "sandwich-bigmac" que s'atreveixen a ser doctorandes ho poden entendre.

A tants i tants amics que m'han ajudat indirectament en alguna cosa durant tots aquests anys. No els puc nomenar tots, segur que me'n deixaria algun. Ells ja saben qui són. Evidentment a toi, Elvire. Ho he agraït i ho agraïxo.

A la Maria Rosa i en Carmelo per estar sempre, sí, sempre disponibles.

Als meus pares, vous qui m'avez toujours facilité l'étude, qui m'avez poussée à en faire plus, avec engagement, rigueur et entrain, valeurs transmises par l'exemple. Especialment al meu pare, hauria estat content de saber-ho, o potser ho sabrà, amb la serenor no perduda, allà on s'ha amagat la seva saviesa.

A Alèxia et Iris qui avez passé une enfance-adolescence en compagnie d'une mère thésarde, pour avoir accepté les heures investies dans cette étude, celles que je vous ai volées et les vacances que nous n'avons pas eues, pour avoir aidé dans la mesure de vos possibilités. Et en particulier à Héléne, pour tout ce que tout ceci a représenté dans ta vie.

Al Miquel pels coneixements que no he deixat que m'ajudin, per donar-me accés a l'altra visió del tema. I també per haver acceptat de prendre el relleu aquest darrer any, amb paciència i il·lusió. Si no, hauria plegat. I per tantes coses més.

A tots, à tous, a todos, Gràcies!

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ABREVIATURAS	iii
RESUMEN, RESUM, SUMMARY	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Introducción	3
2. El efecto rotación	5
3. Las leguminosas en las rotaciones. El caso de la alfalfa	9
4. El valor de sustitución del fertilizante nitrogenado	12
5. Evaluaciones previas del N-FRV de la alfalfa en el maíz	14
6. Condiciones de producción en el Valle medio del Ebro y en los regadíos del Canal d'Urgell	16
6.1. Rotaciones en los regadíos del Valle medio del Ebro	17
6.2. El cultivo de la alfalfa en el Valle del Ebro	18
6.3. El cultivo del maíz en los regadíos del Canal d'Urgell	19
6.4. El cultivo del trigo en los regadíos del Canal d'Urgell	19
7. El nitrógeno	20
7.1. Efecto del abonado nitrogenado en el maíz y el trigo	20
7.2. Fertilización nitrogenada en el maíz: necesidades y momento de aplicación	21
7.3. El ciclo del nitrógeno en un sistema de cultivo	23
7.4. Entradas (y pérdidas) de nitrógeno en los regadíos del Canal d'Urgell	26
7.5. El problema de los nitratos en la zona: de 1994 a 2007	28
OBJETIVOS	31
CAPÍTULO I. Efecto del abonado nitrogenado en la producción y la calidad del Maíz (<i>Zea mays</i> L.) y en la evolución del contenido de nitratos en el suelo en un monocultivo en regadío	35
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	37
1.1. Optimización de la fertilización nitrogenada	37
1.2. Antecedentes en la zona	44
1.3. Objetivos	45
2. MATERIALES Y MÉTODOS	46
2.1. Condiciones experimentales	46
2.1.1. Localización del ensayo	46
2.1.2. Caracterización edafoclimática	46
2.1.3. Técnicas de cultivo	50
2.1.4. Diseño experimental	51
2.2. Métodos, técnicas y medidas realizadas	54
2.2.1. Contenido en nitratos en el suelo y su evolución	54
2.2.2. Otras determinaciones en el suelo	55
2.2.3. Contenido de nitratos en el agua de riego y en la solución del suelo	56
2.2.4. Desarrollo y crecimiento de la planta	57
2.2.5. LAI y Radiación interceptada	57
2.2.6. Componentes del rendimiento, rendimiento e índice de cosecha	57
2.2.7. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en la planta	58
2.2.8. Calidad de grano	59
2.2.9. Extracciones, balance y eficiencia del Nitrógeno	59
2.3. Análisis estadístico	62
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
3.1. Evolución de las condiciones del suelo	63
3.1.1. Contenido de nitratos en el suelo y evolución	63
3.1.2. Contenido de NO ₃ ⁻ -N en precobertera y utilidad del PSNT	69
3.1.3. Evolución del contenido de materia orgánica y estructura del suelo	71
3.1.4. Contenido de nitratos en el agua de riego y en el agua de la solución del suelo	74

3.2. Efecto de la dosis de N en la planta	78
3.2.1. Rendimiento en grano	78
3.2.2. Componentes del rendimiento	83
3.2.3. Producción de biomasa y altura de planta	85
3.2.4. LAI y PARI.....	87
3.2.5. Índice de cosecha	88
3.2.6. Contenido en N del grano y de la planta. Extracciones de N por la parte aérea de la planta.....	89
3.2.7. Diagnostico de la fertilidad en planta: SPAD y NO ₃ ⁻ en la base del tallo	94
3.3. Balance N y eficiencia del N	98
4. CONCLUSIONES	104
CAPÍTULO II. Nitrogen replacement value of alfalfa in irrigated mediterranean conditions	107
ABSTRACT	109
MATERIALS AND METHODS	112
RESULTS AND DISCUSSION	116
Fertilizer replacement value of alfalfa for maize grown after alfalfa	116
Second year crop following alfalfa	120
CONCLUSIONS	122
REFERENCES	123
CAPÍTULO III. El efecto de la alfalfa (<i>Medicago sativa</i>, L) en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo en los regadíos del Valle medio del Ebro	127
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	129
2. MATERIALES Y MÉTODOS	132
2.1. Condiciones experimentales.....	132
2.1.1. Localización del ensayo y condiciones edafológicas	132
2.1.2. Condiciones climáticas	133
2.1.3. Técnicas de cultivo de los cultivos de la rotación	134
2.1.4. Diseño experimental.....	136
2.2. Métodos, técnicas y medidas realizadas	140
2.2.1. Contenido de nitratos en el suelo y su evolución	140
2.2.2. Contenido de nitratos en el agua de riego y en la solución del suelo en el maíz.	141
2.2.3. Crecimiento de la planta, componentes del rendimiento y rendimiento	141
2.2.4. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en planta	142
2.2.5. Calidad	142
2.2.6. Extracciones de Nitrógeno	143
2.3. Análisis estadístico	143
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	144
3.1. Evolución de las condiciones del suelo.....	144
3.1.1. Contenido de NO ₃ ⁻ -N en el suelo	144
3.1.2. Contenido de materia orgánica del suelo en el momento de la siembra del maíz de tercer año	150
3.1.3. Contenido de nitratos en el agua de riego y efecto de la rotación en la solución del suelo	152
3.2. Efecto de la rotación en el maíz	154
3.2.1. Rendimiento en grano	154
3.2.2. Componentes del rendimiento	157
3.2.3. Producción de biomasa, LAI, PARI e Índice de cosecha	159
3.2.4. Contenido en N de grano y planta. Extracciones de N.....	161
3.2.5. Interés de métodos de diagnóstico de la fertilidad nitrogenada en el maíz	164
3.3. Efecto de la rotación en el trigo	170
3.3.1. Rendimiento en grano y componentes del rendimiento	170
3.3.2. Producción de biomasa	174
4. CONCLUSIONES	176
CONCLUSIONES GENERALES	179
BIBLIOGRAFÍA	183

Abreviaturas

BM	Maíz en monocultivo
C	Carbono
EUN	Eficiencia en el uso del fertilizante nitrogenado o Fracción de N recuperada
EU N_{disp}	Eficiencia en el uso del N disponible:
IRFC	Índice de Riesgo de Formación de Costra
MO	Materia orgánica
MS	Materia seca
N	Nitrógeno
N_2	Nitrógeno atmosférico
N_f	Nitrógeno mineral aportado por el fertilizante en cada tratamiento
N_{fin}	Nitrógeno mineral en el perfil del suelo en el momento de la cosecha
N_{H_2O}	Nitrógeno aportado con el agua de riego
N_{ini}	Nitrógeno mineral en el perfil del suelo en el momento de la siembra
N_{mzdo}	Nitrógeno mineralizado durante el cultivo
N_p	Nitrógeno extraído por el cultivo en recolección
N-FRV	N-Fertilizer Replacement Value; Valor de Sustitución en Fertilizante Nitrogenado
Nm	Dosis de N en el cultivo de maíz
Nt	Dosis de N en el cultivo de trigo
PsM	Planta sin mazorca (stover en inglés, cañota en catalán)
PSNT	Pre-Sidedress-Soil Nitrate Test; Contenido de nitratos en el suelo previo al abonado de cobertera
Rot	Rotación Alfalfa-Maíz
V6,..,V10	Estadios fenológicos en el maíz: 6º hoja,...10º hoja
R1, R2-R5	Estadios fenológicos en el maíz: aparición de las sedas, llenado del grano
Δ NMIN	Variación del contenido de N mineral en el perfil del suelo durante el cultivo

RESUMEN

El Nitrógeno (N) es el elemento mineral al que se ha venido prestando mayor atención en la gestión de la fertilización de la mayoría de los sistemas agrícolas. La complejidad de su ciclo y la forma de aplicación en los distintos tipos de manejo de los cultivos dificultan la planificación de su disponibilidad para las plantas. Por otra parte, aplicaciones excesivas o inadecuadas pueden provocar problemas medioambientales y una menor rentabilidad económica. En el caso de maíz (*Zea mays* L.), especie particularmente exigente en N, es importante sincronizar las aportaciones y la disponibilidad de N en el suelo con las demandas por parte de la planta. En las Zonas Vulnerables, el control de sus aportaciones es esencial.

Son conocidos los efectos positivos de las rotaciones de cultivos. Más concretamente, los beneficios de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) sobre los cultivos siguientes están relacionados principalmente con la capacidad de las leguminosas de fijar el N_2 atmosférico. Una de las maneras de evaluar la aportación en N de la alfalfa es calculando su Valor de Sustitución de Fertilizante Nitrogenado (N-FRV).

En esta tesis trabajo se estudia: a) el efecto de la alfalfa en el maíz y, posteriormente, el efecto en el trigo (*Triticum aestivum* L.) en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo; b) el efecto del abonado nitrogenado en un monocultivo de maíz durante tres años consecutivos en la misma parcela.

El ensayo se llevó a cabo los años 1994-1997 en Torregrossa (regadíos del Canal d'Urgell-Lleida). Durante tres campañas consecutivas, se ensayaron cuatro dosis de fertilizante N (0, 100, 200, 300 kg N ha⁻¹) en maíz, cv. Juanita. Estos tres años de monocultivo se estudian en el Capítulo I. Durante los dos primeros años, simultáneamente, se cultivó alfalfa cv. Aragón en la mitad de cada repetición. El tercer año se sustituyó la alfalfa por maíz, ensayando las mismas dosis de fertilizante que en el monocultivo. El maíz en rotación con la alfalfa se pudo comparar así con el maíz en un tercer año de monocultivo. El cuarto año, se sembró trigo, cv. Cartaya, en todas las parcelas y se ensayaron dos dosis de N (0 y 100 kg N ha⁻¹). Aquí se pudo comparar la rotación Alfalfa-Maíz-Trigo con el Maíz-Maíz-Maíz-Trigo. Estos dos últimos años son los que se estudian en los Capítulos II y III. El Capítulo II propone un N-FRV de la alfalfa para los dos cultivos siguientes en los regadíos del Valle medio del Ebro mientras que en el Capítulo III se estudia la repercusión que tiene la alfalfa en los cultivos siguientes y en las condiciones de producción.

En todos los ciclos productivos se determinó el contenido en nitratos en el suelo en tres momentos de cada ciclo. En el maíz, se determinó el rendimiento de grano y sus componentes, la biomasa producida en floración y final, la altura de la planta, el LAI y el PARI, el contenido en clorofila de las hojas, el contenido en nitratos en la base del tallo y el contenido en N del grano y de la planta. Simultáneamente se hizo un seguimiento del contenido en nitratos del agua de riego y la solución del suelo y del contenido en materia orgánica. En el trigo se determinó el rendimiento de grano y sus componentes, la biomasa en encañado y final y el contenido en N del grano.

En el monocultivo de maíz, el rendimiento de grano y el crecimiento de la planta se vieron condicionados por el nivel inicial de nitratos en el suelo, la dosis de abonado y la cantidad de nitratos aportados por el agua de riego. El rendimiento en grano se ajustó al modelo lineal-meseta en 1994 y 1995 y al modelo cuadrático-meseta en 1996. Los rendimientos máximos, 10,2 Mg ha⁻¹ en 1994, 13,1 Mg ha⁻¹ en 1995 y 14,3 Mg ha⁻¹ en 1996 se obtuvieron con una dosis de 100 kg ha⁻¹ en 1994 y 1995 y 200 kg ha⁻¹ en 1996. Con dosis superiores, el maíz siguió absorbiendo N y este se acumuló primero en el grano.

El Valor de Sustitución de N (N-FRV) de una alfalfa de dos años en las condiciones del ensayo se evaluó en 160 kg ha⁻¹ para un primer cultivo de maíz después de la alfalfa. Para el cultivo siguiente de trigo, fue de 76 kg ha⁻¹.

El efecto de la alfalfa repercutió en el contenido en nitratos del suelo, en el rendimiento de maíz (14,7 Mg ha⁻¹ en la rotación y 11,9 Mg ha⁻¹ en el monocultivo), la biomasa final, la altura de la planta y las extracciones de N. En el trigo siguiente repercutió en el contenido en nitratos del suelo, el rendimiento (6,4 Mg ha⁻¹ tras la alfalfa y 5,2 Mg ha⁻¹ tras el monocultivo), el contenido de N del grano y la biomasa hasta el encañado. Se proponen unas pautas para determinar la necesidad de fertilizante N en un maíz después de la alfalfa.

RESUM

El Nitrogen (N) és l'element mineral al que s'ha vingut prestant major atenció en la gestió de la fertilització de la majoria dels sistemes agrícoles. La complexitat del seu cicle i la forma d'aplicació als diferents tipus de maneig dels cultius dificulten la planificació de la seva disponibilitat per a les plantes. D'altra banda, aplicacions excessives o inadequades poden provocar problemes mediambientals i una menor rendibilitat econòmica. En el cas de blat de moro (*Zea mays* L.), espècie particularment exigent en N, és important sincronitzar les aportacions i la disponibilitat de N en el sòl amb les demandes per part de la planta. A les Zones Vulnerables, el control de les seves aportacions és essencial.

Es coneixen bé els efectes positius de les rotacions de cultius. Més concretament, els beneficis de l'alfals (*Medicago sativa* L.) sobre els cultius següents estan relacionats principalment amb la capacitat de les lleguminoses de fixar el N₂ atmosfèric. Una de les maneres d'avaluar l'aportació en N de l'alfals és calculant el seu Valor de Substitució de Fertilitzant Nitrogenat (N-FRV).

En aquesta tesi s'estudia l'efecte de l'alfals en el blat de moro i, posteriorment, el blat (*Triticum aestivum* L.) en una rotació Alfals-Panís-Blat. D'altra banda s'estudia l'efecte de l'abonat nitrogenat en un monocultiu de panís durant tres anys consecutius a la mateixa parcel·la.

L'assaig es va dur a terme els anys 1994-1997 a Torregrossa (als regadius del Canal d'Urgell-Lleida). Durant tres campanyes consecutives, es van assajar quatre dosis de fertilitzant N (0, 100, 200, 300 kg N ha⁻¹) en panís, cv. Juanita. Aquests tres anys de monocultiu s'estudien en el Capítol I. Durant els dos primers anys, simultàniament, es va conrear alfals a la meitat de cada repetició. El tercer any es va substituir l'alfals per blat de moro, assajant les mateixes dosis de fertilitzant que en el monocultiu. El panís en rotació amb l'alfals es va poder comparar així amb el panís d'un tercer any de monocultiu. El quart any, es va sembrar blat, cv. Cartaya, a totes les parcel·les i es van assajar dues dosis de N (0 i 100 kg N ha⁻¹). Aquí es va poder comparar la rotació Alfals-Panís-Blat amb el Panís-Panís-Panís-Blat. Aquests dos últims anys són els quals s'estudien en els Capítols II i III. El Capítol II proposa un N-FRV de l'alfals per als dos cultius següents en els regadius de la Vall de l'Ebre mentre que al Capítol III s'estudia la repercussió que té l'alfals en els cultius següents i a les condicions de producció.

A tots els cicles productius es va determinar el contingut en nitrats en el sòl en tres moments de cada cicle. En el blat de moro, es va determinar el rendiment de gra i els seus components, la biomassa produïda en floració i final, l'alçada de la planta, el LAI i el PARI, el contingut en clorofil·la de les fulles, el contingut en nitrats en la base de la tija i el contingut en N del gra i de la planta. Simultàniament es va fer un seguiment del contingut en nitrats de l'aigua de reg i la solució del sòl i del contingut en matèria orgànica. En el blat es va determinar el rendiment de gra i els seus components, la biomassa en encanyat i final i el contingut en N del gra.

Al monocultiu de panís, el rendiment de gra i el creixement de la planta es van veure condicionats pel nivell inicial de nitrats en el sòl, la dosi d'adobat i la quantitat de nitrats aportats per l'aigua de reg. El rendiment en gra es va ajustar al model lineal-plateau en 1994 i 1995 i al model quadràtic-plateau en 1996. Els rendiments màxims, 10,2 Mg ha⁻¹ en 1994, 13,1 Mg ha⁻¹ en 1995 y 14,3 Mg ha⁻¹ en 1996, es van obtenir amb una dosi de 100 kg ha⁻¹ en 1994 i 1995 i 200 kg ha⁻¹ en 1996. Amb dosis superiors, el blat de moro va seguir absorbint N i aquest es va acumular primer en el gra.

El Valor de Substitució de N (N-FRV) d'un alfals de dos anys a les condicions de l'assaig es va avaluar en 160 kg ha⁻¹ per a un primer cultiu de panís després de l'alfals. Per al cultiu següent de blat, va ser de 76 kg ha⁻¹.

L'efecte de l'alfals va repercutir en el contingut en nitrats del sòl, el rendiment de blat de moro (14,7 Mg ha⁻¹ a la rotació i 11,9 Mg ha⁻¹ al monocultiu), la biomassa final, l'alçada i les extraccions de N. En el blat següent va repercutir en el contingut en nitrats del sòl, el rendiment (6,4 Mg ha⁻¹ després de l'alfals i 5,2 Mg ha⁻¹ després del monocultiu), el contingut de N del gra i la biomassa fins a encanyat. Es proposen unes pautes per a determinar la necessitat de fertilitzant N en un panís després de l'alfals.

SUMMARY

In agricultural systems, nitrogen (N) has always been the fertilizer element with an outstanding role. The complexity of its cycle and the different crop management systems difficult the planification of its availability for the plants. On the other hand, excessive or inadequate N applications can produce environmental problems and a lowest economic profitability. In the case of corn (*Zea Mays* L.), a particularly N demanding crop, it is important to synchronize contributions and N availability in the soil with plant demands. In the N Vulnerable Areas, contribution control become essential.

The positive effects of the rotations of cultures are well known. To be more specific, benefits of the alfalfa (*Medicago sativa* L.) on the following crops are related principally to the ability of leguminous plants to fix atmospheric N₂. One way to evaluate alfalfa's N contribution is calculating its Nitrogen-Fertilizer Replacement Value (N-FRV).

This thesis studies the effect of alfalfa in the corn and, later, in the wheat (*Triticum aestivum* L.) in a rotation Alfalfa-Corn-Wheat. Simultaneously, the effect of the N fertilizer is studied in a monoculture corn for three consecutive years in the same plot.

The study was carried out between 1994 and 1997 in Torregrossa (irrigated area of Canal d'Urgell-Lleida-Spain). During three consecutive years, four doses of N fertilizer were applied (0, 100, 200, 300 kg N ha⁻¹) in corn, cv. Juanita. These three years of monoculture are studied in Chapter I. During the first two years, simultaneously, alfalfa was cropped in half part of the block. The third year, alfalfa was replaced with corn, testing the same doses of fertilizer as in the monoculture. Then, corn in rotation with alfalfa could be compared with the corn in the third year of monoculture. The fourth year wheat, cv. Cartaya, was sowed in all the plots and two doses of N (0 and 100 kg N ha⁻¹) were applied. Here, it was possible to compare the rotation Alfalfa-Corn-Wheat with the Corn-Corn-Corn-Wheat. These two last crops are studied in the Chapters II and III. In Chapter II a N-FRV of the alfalfa for two following crops in the irrigated area of the Ebro Valley is suggested. In Chapter III effects of alfalfa on the following crops and on the production conditions are studied.

Every crop, the nitrate content in soil at three moments of the production period was determined. In corn, grain yield and its components, flowering and final biomass, height of plant, LAI and PARi, chlorophyll content in leaves, nitrate content in the base of the stem and N content in grain and plant were determined. Finally, nitrate content in the irrigation water and soil solution and organic matter content were followed. In wheat, grain yield and its components, stem elongation and final biomass and grain N content were measured.

In monoculture, corn yield and plant growth were conditioned by initial level of nitrates in the soil, by N fertilizer amount and by nitrates contribution from irrigation water. Grain yield adjust to linear-plateau model in 1994 and 1995 and to quadratic-plateau model in 1996. Maximum yields, 10,2 Mg ha⁻¹ in 1994, 13,1 Mg ha⁻¹ in 1995 and 14,3 Mg ha⁻¹ in 1996, were obtained with 100 kg ha⁻¹ in 1994 and 1995 and with 200 kg ha⁻¹ in 1996. With higher doses, corn kept on absorbing N that was accumulated firstly in the grain.

The N-Fertilizer Replacement Value (N-FRV) of an alfalfa of two years in the conditions of the trial was evaluated in 160 kg N ha⁻¹ for the first corn after alfalfa. For the following wheat crop, it was 76 kg N ha⁻¹.

The effect of the alfalfa affected nitrate soil content, corn yield (14,7 Mg ha⁻¹ in la rotation and 11,9 Mg ha⁻¹ in monoculture), final biomass and N extractions. In the following wheat, alfalfa affected soil content, yield (6,4 Mg ha⁻¹ after alfalfa and 5,2 Mg ha⁻¹ after the monoculture), grain N content and biomass accumulated until stem elongation. Some rules to determine N fertilizer N needs in a corn after the alfalfa are suggested.

ÍNDICE DE TABLAS

Introducción

Tabla 1. Ejemplos y mecanismos de la contribución de las rotaciones	8
---	---

Capítulo I

Tabla I.1. Características fisicoquímicas del medio edáfico de la parcela	47
Tabla I.2. Condiciones pluviométricas durante el ensayo	49
Tabla I.3. Fechas de toma de muestras de suelo, aplicación del abonado N, siembra y cosecha	54
Tabla I.4. Contenido en NO_3^- -N en el suelo antes de la siembra y después de la cosecha	63
Tabla I.5. PSNT, fertilización recomendada y fertilización de cobertera aplicada	69
Tabla I.6. Evolución del Índice de Riesgo de Formación de Costra	74
Tabla I.7. Concentración de NO_3^- -N en la solución del suelo durante el cultivo de maíz	75
Tabla I.8. Rendimiento de grano de maíz en función de la dosis de N	79
Tabla I.9. Componentes del rendimiento de grano del maíz en función de dosis de N	84
Tabla I.10. Producción de biomasa final y en floración, altura de la planta, LAI y PARI	87
Tabla I.11. Contenido de N en el grano y en la planta y extracción en N	90
Tabla I.12. SPAD en floración y contenido en nitratos en la base del tallo de maíz	95
Tabla I.13. Variación del contenido en N en el suelo, EUN y EU N disponible	99

Capítulo II

Table 1. Mean monthly air temperatures (T_m) and total rainfall during the experiments	112
Table 2. Alfalfa and corn grain yields in the two years previous to the comparison between crop rotations	116
Table 3. Total soil nitrogen (NO_3^- -N) from 0 to 120 cm, before the seeding of corn	117
Table 4. Wheat yields and total soil nitrogen before wheat seeding and after wheat harvest	122

Capítulo III

Tabla III.1. Características del medio edáfico de la parcela al iniciar el ensayo	132
Tabla III.2. Condiciones pluviométricas durante el ensayo	134
Tabla III.3. Fechas de toma de las muestras de suelo, abonado N, siembra y cosecha	140
Tabla III.4. Contenido en de NO_3^- -N en el suelo en siembra y cosecha del maíz en función de la dosis de N aportada y de la rotación	145
Tabla III. 5. Contenido en de NO_3^- -N en el suelo en función de la Nt, de Nm y de la rotación ...	149
Tabla III.6. Rendimiento de grano de maíz en función de Nm y del Rot/BM	156
Tabla III.7. Componentes del rendimiento del maíz en función de Nm y de Rot/BM	158
Tabla III.8. Producción de biomasa final y en floración, altura de la planta, LAI y PARI	160
Tabla III.9. Contenido en N en el grano y en la planta y extracciones de N	162
Tabla III.10. PSNT, N en planta en V6, SPAD y nitratos en la base del tallo	164
Tabla III.11. Diagnóstico del estado nutricional de la planta según los métodos utilizados	170
Tabla III.12. Rendimiento del trigo, componentes del rendimiento y riqueza en N del grano	171
Tabla III.13. Producción de la biomasa final y en encañado	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Introducción

Figura 1. Corte longitudinal esquemático de un nódulo	11
Figura 2. Imagen de satélite de los regadíos de Lleida y parte de los de Huesca.	17
Figura 3. Distribución de las rotaciones en el maíz en los regadíos de Lleida y Huesca.....	18
Figura 4. Absorción de N de la planta de maíz a lo largo del ciclo	22
Figura 5. Ciclo del Nitrógeno en los sistemas agrícolas	24
Figura 6. Mapa de las zonas vulnerables de Cataluña	29

Capítulo I

Figura I.1. Modelos de respuesta a la dosis de fertilizante nitrogenado en el maíz	39
Figura I.2. Efecto del fertilizante N y del contenido en N del suelo sobre el rendimiento, el contenido en N del grano y de la planta y el N residual en el suelo después de la cosecha de maíz.....	40
Figura I.3. Relación entre rendimientos relativos y concentración de nitratos en el suelo	42
Figura I.4. Rango de concentración en los nitratos en la base del tallo	43
Figura I.5. Diagrama ombrotérmico	48
Figura I.6. Temperaturas medias durante los años de cultivo del maíz	48
Figura I.7. Distribución de las parcelas en el ensayo	53
Figuras I.8. Vista del ensayo en primavera y poca antes de la cosecha.....	52
Figura I.9. Contenido en NO_3^- -N del suelo en siembra y cosecha	65
Figura I.10. Distribución del contenido en NO_3^- -N del suelo por profundidades	68
Figura I.11. Evolución del contenido en materia orgánica en el suelo	72
Figura I.12. Contenido de NO_3^- en el agua de riego y evolución del contenido de NO_3^- -N en la solución en las sondas de succión	77
Figura I.13. Modelo de ajuste lineal-meseta, modelo cuadrático y cuadrático-meseta	82
Figura I.14. Efecto de la dosis de N sobre el rendimiento en grano, el N extraído y el NO_3^- -N residual en el suelo	91
Figura I.15. Extracciones de N por el grano y totales	93
Figura I.16. Lecturas SPAD, rendimiento, nitratos en la base del tallo y NO_3^- -N residual en el suelo ..	96

Capítulo II

Figure 1. Grain yields of maize grown after alfalfa (rotation) or after Monocropped maize under four rates of N applied to maize.....	118
Figure 2. Grain yields of wheat grown after monocropped maize (maize-wheat) or after maize, in an alfalfa-maize-wheat rotation, under two rates of N applied to wheat.....	121

Capítulo III

Figura III.1. Lecturas SPAD y contenido de N en la planta entera en V6	130
Figura III.2. Temperaturas medias mensuales durante los cultivos de maíz y trigo	133
Figura III.3. Vista del ensayo en septiembre 1996	137
Figura III.4. Vista del ensayo en 1997	138

Figura III.5. Distribución de las parcelas en el ensayo en 1996	138
Figura III.6 Distribución de las parcelas en el ensayo en 1997	139
Figura III.7. Contenido de NO_3^- -N en el suelo en siembra y cosecha después del maíz	146
Figura III.8. Contenido en NO_3^- -N del suelo por profundidades	147
Figura III.9. Contenido en materia orgánica en el suelo en la siembra del maíz	151
Figura III.10. Contenido de NO_3^- en el agua de riego y evolución del contenido de NO_3^- -N en la solución extraída en las sondas de succión durante el cultivo de maíz	152
Figura III.11. Modelo de ajuste cuadrático-meseta en monocultivo y en rotación	157
Figura III.12. Efecto de la dosis de N sobre el rendimiento de maíz, el N extraído y el NO_3^- -N residual en el suelo	163
Figura III.13. SPAD, rendimiento, nitratos en la base del tallo y NO_3^- -N residual en el suelo	169

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Introducció

*"Un any cada dos, deixaràs també, després de la sega, que
reposi la terra i que la plana indolent s'enforteixi dins l'abandó;
o bé sembraràs, en canviar d'estació, la daurada espelta
allí mateix on abans aplegares en abundància els llegums
de sonora bajoca, els grans menuts de la veça i les fràgils
tiges del lloví amarg que fan un bosc resonant.
Malgrat tot, l'alternança dels cultius facilita l'esforç del camp,
mentre no et dolguis de saciar l'àrid terreny amb fems grassos
ni d'escampar immunda cendra per camps exhaurits.
És així que, canviant de sements, descansen les terres i que
el guaret, lliure de l'arada, no deixa de tenir el seu avantatge".*
(Virgili, Geòrgiques, I, v.71-83.Traducció de M. Dolç).

El reconocimiento de la importancia de las rotaciones de cultivos ya venía descrito por los romanos. Varrón (S. I a.C.) las citó en su obra *Rerum Rusticarum de Agricultura* y Virgilio en su *Georgicas* (escrita aproximadamente en el año 26 a.C.). Estos autores proponían que, en las condiciones mediterráneas, podía ser interesante alternar las especies vegetales en un mismo campo, e intercalar años de barbecho en que se dejara descansar la tierra. En Europa, antes de la ocupación Romana, se conocían las rotaciones célticas, en las que se cultivaba continuamente en un suelo hasta el agotamiento de sus reservas y, posteriormente, se dejaba en barbecho varios años (Boulaine, 1992). Las recomendaciones de la época Romana serían un ejemplo de lo que posteriormente se llamaría rotación bienal (cereal-leguminosa), que hacía que la mitad de la superficie fuera ocupada por pastos (excluidos de la rotación y destinados a la alimentación animal), un cuarto por cereales y un cuarto por alguna leguminosa. En las condiciones más áridas de la cuenca mediterránea se justificaba la sustitución de los cultivos de verano por un barbecho que permitía la acumulación de agua de lluvia (Francis, 2005).

Posteriormente, durante la Edad Media y hasta el Renacimiento, se obviaron los efectos beneficiosos de las leguminosas de la rotación bienal romana y se substituyeron por

algún cereal secundario (también llamado cereal trimesino), cebada o avena (Boulaine, 1992). Las rotaciones pasaron a consistir en un cereal principal (trigo o centeno)-cereal o cereal-barbecho que se transforma en cultivo-pasto en algunos casos. Es posible que, al aumentar el uso de animales en los trabajos agrícolas, el efecto del estiércol dejado en el campo fuera más patente que el de la rotación con una leguminosa, más difícilmente apreciable (Francis, 2005). La selección de trigo o cebada venía marcada por las costumbres alimenticias. Nobleza y clero sembraban en sus tierras trigo mientras que para la alimentación del pueblo se cultivaba centeno o cebada y para los caballos de combate, avena. En las zonas en las que se extendió el consumo de cerveza se imponía la cebada (Duby, 1991).

En China se había observado igualmente que secuencias de cultivos distintos producían mayores rendimientos que si se sembraba siempre la misma especie en el mismo campo. También se han encontrado documentos escritos en la época de la ocupación árabe en la Península Ibérica que mencionan las rotaciones de cultivos (Francis, 2005).

En los siglos XVII y XVIII aparecen citadas rotaciones más complejas. En 1600 Olivier de Serres publicó el *Theâtre de l'Agriculture* donde describió las rotaciones de cultivos; más tarde, en 1650, Sir Richard Weston, amplió sus ideas. Mientras, en 1617, Frai Agustí escribió el *Libre dels secrets de Agricultura* donde propuso rotaciones plurianuales. Esta profusión de escritos coincidió con la época en que Europa buscaba una revitalización científica de la agricultura (Argemí, 1988). De todas maneras, la mejora de las técnicas agrícolas y concretamente la sistematización de las rotaciones se produjo primero en Inglaterra, a partir de la Revolución (1789) en Francia (Parry, 2001) y en España años más tarde (Argemí, 1988). Aparecieron rotaciones trienales (trigo-cereal-barbecho) que permitían producir en un porcentaje de terreno mayor (Dion, 1981) y las rotaciones con leguminosas en Inglaterra que consistían en 2-4 años de cultivos forrajeros, una leguminosa y uno o dos cereales. A menudo estas rotaciones eran cuadriénales e incluían un cultivo de escarda (que limpiaba el suelo de las malas hierbas), el nabo, un cereal (secundario, la avena), una leguminosa (que enriquecía el suelo en N, el trébol) y un cereal (cultivo principal, que aprovechaba el N del cultivo anterior pero dejaba el terreno infestado de malas hierba, el trigo). Estas rotaciones fueron las que los primeros colonos llevaron a América del Norte (Francis, 2005). A partir del siglo XIX, las rotaciones que se utilizaron fueron cada vez más variadas y complejas, adaptándose a las condiciones climáticas, edafológicas, culturales, económicas y sociales de cada época.

Durante la primera mitad del siglo XX, con los conocimientos crecientes en química de suelos y en fertilidad orgánica, las rotaciones volvieron hacia secuencias cereal-

leguminosa. Se llegó incluso a pensar que, al disponer de fertilizantes y fitosanitarios relativamente asequibles, se podría prescindir de las rotaciones para siempre, sin pérdidas de rendimiento (Aldrich, 1964; Benson, 1985, Bullock, 1992). Las referencias bibliográficas anteriores al siglo XIX se refieren a los cultivos extensivos pero a partir de entonces se encuentran también citas relacionadas con los cultivos hortícolas. Probablemente éstas formaban parte de la sabiduría popular y no se habían documentado por ser de superficie reducida ya que se aplicaban principalmente a los huertos familiares. Este tipo de rotaciones se complica considerablemente debido al número de cultivos que se suceden en un año en una parcela (Chaux y Foury, 1994) y la diversidad de especies y familias botánicas que se tienen en cuenta.

Actualmente, el concepto de **rotación de cultivos** (sucesión de cultivos diferentes sobre una misma porción de terreno) es utilizado en contraposición al de monocultivo (producción, en una misma parcela, de una única especie, ciclo tras ciclo). Baldock *et al.* (1981) y Pierce y Rice (1988) distinguen una secuencia de cultivos, ordenados en el tiempo, de una rotación, que implica una repetición de la secuencia de cultivos. El concepto de rotación puede contemplar también un período de barbecho entre la sucesión de cultivos (Pierce y Riece, 1988; Urbano y Moro, 1992). Un cultivo viene influido por el cultivo anterior, su precedente, y él mismo condicionará al posterior.

Frente a la rotación que expresa la ordenación de los cultivos en el tiempo, la alternativa caracteriza esta ordenación en el espacio o la superficie (Urbano y Moro, 1992). La alternativa responde más a aspectos de índole socioeconómico de la explotación, facilitando la organización del trabajo y la comercialización de los productos, mientras que la rotación responde más a aspectos medioambientales, ecológicos o naturales.

2. El efecto rotación

Los efectos positivos de las rotaciones están bien documentados (Bullock, 1992; Pierce y Rice, 1988; Karlen y Sharpley, 1994): mejoran la estructura del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes, la actividad microbiana y ayudan al control de malas hierbas y enfermedades, cortan del ciclo de insectos y nemátodos, reducen su incidencia y disminuyen los componentes fitotóxicos provenientes de residuos vegetales. El beneficio de la rotación sobre la producción se conoce como "**efecto rotación**". Al afectar tantos aspectos del sistema de cultivo, es de difícil evaluación.

Las causas del *efecto rotación* son un conjunto de factores diversos, complejos, todavía mal entendidos y no consensuados (Varvel y Wilhelm, 2003). Se suele considerar que la disponibilidad de N es la responsable principal en combinación con otros factores como

la reducción de plagas, enfermedades y malas hierbas, la eliminación de la fototoxicidad y la mejora de las propiedades del suelo (Lauer, 2002; Varvel y Wilhelm, 2003). Se asume que, en el *efecto rotación*, estos efectos tienen importancias relativas variables según las condiciones (Bullock, 1992; Whiting y Crookston, 1993; Lauer, 2002). Los principales factores que se han investigado están relacionados con la fertilidad del suelo, la protección de los cultivos y la dimensión económica y social de la agricultura (Francis, 2005).

Frente a estos aspectos positivos de las rotaciones, los monocultivos presentan a menudo una serie de efectos negativos: reducción en el rendimiento (Bullock, 1992), mayor necesidad de pesticidas y fertilizantes, reducción de la diversidad biológica y genética, inestabilidad del sistema de producción, mayor riesgo de degradación ambiental y concentración en el uso de recursos en el tiempo y en el espacio.

Desde el punto de vista económico las rotaciones pueden resultar también más interesantes que los monocultivos, aunque a costa, a veces, de producir cultivos de menor rentabilidad. Por una parte, al diversificar los cultivos, se reduce el riesgo asumido ya que las fluctuaciones climáticas y de los precios no afectarán por igual los diferentes cultivos (Arnon, 1992). Por otra parte, se suelen reducir los costes de producción ya que se obtienen mayores rendimientos (Hammel, 1995) y los niveles de agroquímicos aplicados son más bajos (Katsvairo y Cox, 2000). Las rotaciones recuperan interés como componentes de una agricultura de conservación (Pierce y Rice, 1988). Permiten hacer un uso racional de las interacciones entre especies y procesos (Luna y House, 1990), en la línea de una agricultura sostenible más respetuosa con el medio ambiente y un mejor control de la calidad de los alimentos humanos (Cook, 1993). De hecho, son parte explícita de las distintas normativas de Producción Integrada (RD 201/2002 de 20 de noviembre, BOE núm. 287 de 30-11-2002; DECRET 413/2006 de 31 de octubre, *DOGC núm. 4753 de 03-11-2006*) y Ecológica (Reglamento CEE 2092/91 de 24 de junio, DOL núm. L229/11-29 de 22-07-91) y del Código de Buenas Prácticas Agrarias (Directiva 91/676/CEE de 12 de diciembre, DOL nº 375 de 31-12-1991). A estos aspectos económicos conviene añadir las decisiones políticas que pueden favorecer algunos cultivos frente a otros, más por la situación global del mercado que por el beneficio agronómico que puedan reportar en una rotación. Es en el marco del complejo equilibrio biológico, económico y político que el agricultor debe planificar una rotación (Francis, 2005).

Es importante entender que las rotaciones de cultivos son generalmente recomendadas por los agrónomos, en base a que las ventajas que aportan están bien documentadas y

porque a menudo los agricultores no las practican (Gorchs, 2006). Como ejemplo, solo en un 25% de la superficie española de maíz (*Zea mays* L.) que sigue a la alfalfa (*Medicago sativa* L.) se reduce el abonado nitrogenado a pesar de conocer su efecto beneficioso (Alvaro y Lloveras, 2003). El-Hout y Blackmer (1990) observan reacciones del mismo estilo entre agricultores y técnicos del Corn-Belt de USA. Diversas razones pueden explicar esta paradoja. La optimización económica de una explotación se realiza a menudo teniendo en cuenta únicamente los márgenes brutos de los cultivos y sin considerar el efecto de los precedentes culturales que quedan como concepto teórico. Las ayudas han sido en Europa otro elemento de distorsión ya que han favorecido la selección de determinados cultivos más por el importe de la ayuda que por la rentabilidad del cultivo (Gabinet Tècnic, 2003). Finalmente los agricultores tendrían sus dudas al plantear las rotaciones ya que los científicos son aún incapaces de explicar y cuantificar completamente el *efecto rotación* (Karlen y Sharpley, 1994).

Pueden diferenciarse efectos de las rotaciones de cultivos a largo plazo y a corto plazo. Se consideran a largo plazo aquellos que actúan sobre las características del suelo alterando sus condiciones abióticas (contenido en materia orgánica, estructura, temperatura, etc.) y bióticas (microorganismos y raíces) y, en consecuencia, el comportamiento de los cultivos (Power, 1994; Robinson *et al.*, 1994). Los efectos a corto plazo son aquellos que se refieren a la influencia directa o indirecta que tiene un cultivo sobre el siguiente. Principalmente son los que tienen relación con el control de plagas, enfermedades y malas hierbas, con la dinámica y disponibilidad de nutrientes y del agua (Studdert, 2005) y con las alelopatías. La Tabla 1 presenta algunos ejemplos de estos numerosos efectos de las rotaciones de cultivos.

El contenido de materia orgánica (MO) de un suelo refleja la cantidad y el manejo del carbono (C) restituído al suelo en forma de residuos de cosecha y de raíces remanentes el tipo de laboreo y la fertilización (Bullock, 1992; Robinson *et al.*, 1994). A través de las rotaciones se puede manipular la dinámica del carbono en el suelo y, con ella, la de otros nutrientes asociados (nitrógeno, fósforo y azufre) mediante el momento, la cantidad, la composición química y la distribución de los restos aportados (Campbell, 1978). Uno de los principales efectos a largo plazo de las rotaciones tiene que ver con la capacidad del suelo de suministrar N (Bullock, 1992) aunque no haya una relación directa entre el contenido de MO y la dinámica del N en el suelo (Kumar y Goh, 2002; Raiesi, 2006).

Tabla 1. Ejemplos y mecanismos de la contribución de las rotaciones a la fertilidad del suelo, al ciclo de nutrientes (adaptado de Francis, 2005) o otros aspectos del cultivo (a partir de Chauv y Foury, 1994)

Ejemplos o mecanismos	Contribución a la fertilidad del suelo o al cultivo en rotación
Rotación leguminosa-cereal	Mejora de la eficiencia del uso de nutrientes y agua Mejora de la estructura del suelo Aumento de la percolación del agua, de la aireación y la nitrificación
Rotación Leguminosa-otras hortalizas	Enriquecimiento del suelo en N y en materia orgánica
Raíces de estructura distinta Alternancia de especies de raíz profunda/superficial	Mejora de la estructura del suelo, en mayor profundidad Mejor aprovechamiento de nutrientes
Rotaciones leguminosa-pratense	Aumento de la m Materia orgánica Reducción de plagas
Rotaciones con leguminosas bianuales y plurianuales	Aumento de la materia orgánica Reducción de malas hierbas
Rotaciones más o menos largas según las especies Diversidad de especies	Protección fitosanitaria Reducción de auto-alelopatías negativas
Rotación con cultivos de "escarda"	Eliminación de malas hierbas
Secuencias de especies pascícolas	Aumento de la materia orgánica Mejora de la eficiencia de los nutrientes
Secuencias de cultivos no deseables	Estimulación de exudados negativos del sistema radicular
Secuencias de cultivos deseables	Aprovechamiento de alelopatías positivas Aprovechamiento de determinados efectos antagonistas en la protección fitosanitaria
Rotación con especies que dejan abundantes residuos	Positivo: enriquecimiento de la MO Negativo: para algunas especies este enriquecimiento no es deseable (ej: zanahoria)

La rotación de cultivos es uno de los principales métodos para interrumpir los ciclos de plagas y agentes patógenos cuando estos son específicos de alguna especie y ayudan a reducir sus formas de perpetuación. No obstante, la rotación no es efectiva para el control de cualquier tipo de plaga o enfermedad (Bullock, 1992). La alternancia de cultivos contribuirá mejor al control de aquellos que se localicen en el suelo durante una buena parte de su ciclo de vida (Pedigo, 1991; Cook, 1993). En cambio será menos efectiva cuando se trate de agentes de fácil movilidad. El nivel de enfermedad en relación al patógeno, al cultivo y al ambiente, debe ser considerado como uno de los componentes del *efecto rotación* (Whiting y Crookston, 1993).

Cada cultivo es afectado por un grupo particular de malas hierbas que tiene hábitos de crecimiento similares y que se beneficia de las prácticas de manejo empleadas para

dicho cultivo (Bullock, 1992). La multiplicación y el crecimiento de las malas hierbas pueden ser dificultados con una combinación de cultivos donde fechas de siembra y recolección o necesidades de manejo sean distintos (Liebman y Janke, 1994). También puede ser que la competencia entre cultivo y mala hierba se ejerza en forma, intensidad u oportunidad distintas (Reigner y Janke, 1990). Otra de las ventajas de las rotaciones respecto al control de las malas hierbas y la eventual reducción del uso de herbicidas, es la explotación de los efectos alelopáticos que algunos cultivos pueden ejercer.

La alelopatía se define como el efecto positivo o negativo provocado sobre alguna especie vegetal por productos químicos producidos por plantas de la misma o de otra especie (Rice, 1984) que influye en el crecimiento y desarrollo de sistemas agrícolas y biológicos (IAS, 1996). Las alelopatías negativas, también conocidas como "fatiga del suelo" (Yu, 1999), pueden ser de dos tipos: autotoxicidad, cuando una especie libera sustancias que inhiben la germinación o el crecimiento de plantas de la misma especie y heterotoxicidad, cuando las sustancias tóxicas liberadas por una especie ejercen su efecto sobre otra (Miller, 1996). Esta heterotoxicidad se puede ejercer a nivel de especie o de familia botánica. Las mismas consideraciones pueden tenerse en cuenta en lo que respecta a los efectos alelopáticos positivos. Las sustancias químicas responsables de las alelopatías son productos vegetales secundarios que pueden provenir de la volatilización, de la lixiviación o exudación de raíces y de la descomposición de residuos vegetales en el suelo (Chou, 2006). La rotación de cultivos permite la utilización de las relaciones entre especies a través de las alelopatías (Francis y Clegg, 1990; Bullock, 1992). Centenares de sustancias aleloquímicas vegetales han sido identificadas (Hoagland y Cutler, 2000) y, a pesar de ser una ciencia que ha progresado considerablemente en los últimos años (Reigosa *et al.*, 2006), no se conoce bien su modo de acción ni los factores que las condicionan (Miller, 1996). Las interacciones planta-suelo-agente microbiano son tan variadas que será difícil conseguir comprender completamente todas las relaciones involucradas (Sturz y Christie, 2003). La intensidad y efectividad de las alelopatías varía en función de un gran número de componentes que interactúan (Einhelling, 1996) y tienen cierta relación con otros factores que también alteran el crecimiento de las plantas (enfermedades, estrés nutricional o hídrico, plagas, condiciones de suelo, etc.). Por ello su impacto varía según las condiciones medioambientales, lo que dificulta su evaluación y manejo (Einhelling, 1996).

3. Las leguminosas en las rotaciones. El caso de la alfalfa

Virgilio, en 26 a. C. recomendaba sembrar leguminosas como las vezas o los altramuces después del trigo. Según Columela (S.I d.C.) "*de los que son de nuestro gusto, la alfalfa se lleva la palma por muchas razones... porque abona el campo...*" (Res rustica II, 25-

26). Frai Agustí aconsejaba sembrar "*lubins perque quant les vinyes, y altres terres llauorables fon magres ells ferueixen de bon fens*" (1617). Son bien conocidos los efectos beneficiosos de la alfalfa sobre los cultivos siguientes (CASC, 2000; Kurtz *et al.*, 1984; Power, 1987; Urbano y Moro, 1992). Hasta hace unos 50 años, la agricultura tradicional basaba su producción en unas rotaciones donde las leguminosas tenían un papel importante.

Las leguminosas tienen la capacidad de fijar el N₂ ambiental. Al ser el N un elemento deficitario en la mayor parte de los suelos del planeta, las leguminosas contribuyen así a la nutrición de los cultivos posteriores que no tienen esta capacidad (Hesterman, 1988; Kelling *et al.*, 1993). Un grupo de bacterias, referidas como "rhizobia", induce la formación de nódulos en las plantas de la familia *Leguminosae* y los infecta (Giller, 2001). Se produce así una simbiosis capaz de fijar el nitrógeno atmosférico que presenta un interés agronómico considerable y creciente (Morot-Gaudry, 1997). El establecimiento de esta simbiosis es complejo. Las bacterias presentes en la rizosfera de la planta potencialmente huésped son atraídas por quimiotropismo hacia las raíces. Las plantas exudan por las raíces flavonoides e isoflavonoides (Giller, 2001), que inducen la expresión de genes bacterianos "nod" que se implican en el establecimiento precoz de la simbiosis. Estos genes codifican las enzimas responsables de la síntesis de lipooligosacáridos específicos, los factores Nod. Estas moléculas bacterianas, específicas de la especie huésped, inducen la formación de nudosidades en las raíces de la planta (Morot-Gaudry 1997). A partir de aquí la bacteria penetra en la nudosidad desde el principio de su formación (a través de los pelos radiculares, o de heridas y células epiteliales) y se convierte en bacteroide (Giller, 2001), capaz de reducir el N₂ atmosférico en amoníaco que la planta asimila en forma de glutamina y glutamato. La Figura 1 muestra esquemáticamente la estructura de los nódulos. Pueden ser esféricos o alargados según el funcionamiento de su meristemo (Giller, 2001). Si éste actúa continuamente se producen nódulos indeterminados, alargados (alfalfa, haba) y si son de duración limitada, son determinados y esféricos (judía, soja) (Trinchant *et al.*, 1997). Los nódulos están activos durante unas semanas, apareciendo sucesivamente nuevos nódulos. Generalmente tienen un color rosado, debido a la abundancia de leghemoglobina-bine-hemoproteína en su centro, que permite distinguir los nódulos activos de los ineficientes.

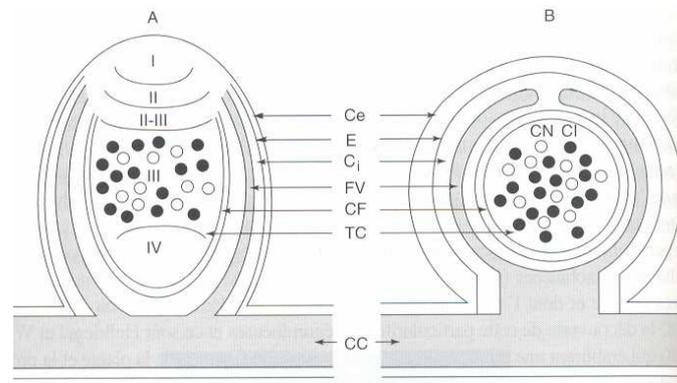


Figura 1. Corte longitudinal esquemático de un nódulo de tipo indeterminado (A: alfalfa, haba) y de tipo determinado (B: judía, soja). I = zona meristemática, II = zona de infección, II-III = zona intermedia, III = zona fijadora de N_2 , IV = zona de senescencia, Ce = cortex externo, E = endodermis, Ci = cortex interno, FV = Haces vasculares, CF = capa frontera, TC = tejido central, CC = cilindro central de la raíz, CI = célula infectada, CN = célula no infectada (Adaptado de Franssen *et al.*, 1992; Trinchant *et al.*, 1997).

El potencial de fijación biológica de N_2 depende principalmente del oxígeno presente, de la disponibilidad de agua y de aprovisionamiento de células huésped en moléculas carbonatadas ricas en energía (Morot-Gaudry, 1997). También precisa, al principio, de una cantidad de nitratos en el suelo para compensar la falta de N durante la instalación progresiva de los nódulos (Trinchant *et al.*, 1997). El equilibrio que permite la simbiosis entre bacterias y leguminosas es frágil y puede fácilmente provocar una senescencia de los nódulos (Trinchant *et al.*, 1997). Por ello, tanto la fijación de nitrógeno por parte de la leguminosa como la cantidad que queda en el suelo después de su cultivo, varían en función de las condiciones edafoclimáticas (temperatura, humedad, salinidad, etc.) y de aspectos de manejo del cultivo como densidad de siembra o edad de la alfalfa (Kelling *et al.*, 1993).

El aumento de producción que se observa en un cultivo que sigue a una leguminosa se debe a su contribución en N (Fox y Piekielek, 1988; Francis y Clegg, 1990) pero también al *efecto rotación* no directamente asociado al N (Hesterman, 1988). La leguminosa dificulta el ciclo de plagas y malas hierbas, favorece la acumulación de materia orgánica y mejora la estructura del suelo además de la contribución en N residual a través de la descomposición, cuando muere, de la parte aérea y radicular. Los distintos autores, sin embargo, dan más o menos importancia a la influencia del *efecto rotación* (Fox y Piekielek, 1988; Hesterman, 1988). En una rotación alfalfa-maíz, Baldock *et al.* (1981) atribuían al *efecto rotación* un 25 % del rendimiento del maíz. Columela, en el siglo I d.C., ya expresaba sus dudas respecto al papel de la alfalfa en la rotación: "...hay

también quienes piensan que precisamente esta legumbre (la alfalfa) hace en los campos el papel del estiércol, cosa que yo interpreto entendiendo no que con sembrarla se haga la tierra más fértil, sino que consume menos que las otras plantas el vigor del suelo, pues doy por seguro que al cereal le va mejor el campo que ha descansado un año que el que acaba de tratar esa legumbre...” (Res Rustica II, 7-7).

Aparte de los aspectos favorables de la alfalfa y su aportación en N al suelo y los cultivos posteriores, también se puede considerar en algunas zonas que es perjudicial para el control de las pérdidas de N por lixiviación (Rasse *et al.*, 1999). En algunas regiones del Norte de Francia (Beaudoin, *et al.*, 1992), de Bélgica (Rasse *et al.*, 1999) o de Holanda (Spietz y Sibma, 1986), la alfalfa puede considerarse también como un cultivo contaminante por la cantidad de N que deja en el suelo. El N mineralizado puede elevar el nivel de nitratos en el suelo y, si no es aprovechado por un cultivo posterior, puede ser fácilmente lixiviado. Por otro lado, Lamb *et al.* (1995) recordaron el potencial de la alfalfa para absorber nitratos del suelo, especialmente en primavera y otoño, cuando las pérdidas son más importantes, ayudando a disminuir la contaminación.

El-Hout y Blackmer (1990) opinan que el problema del aumento de lixiviación de nitratos después de la alfalfa se debería más a un aporte excesivo e innecesario de N después de la alfalfa. Por otra parte, Beaudouin *et al.* (1992) insisten en que al introducir una alfalfa en una rotación se reduce el problema de la concentración de nitratos en el agua de drenaje siempre y cuando se contabilice su aportación en N y se reduzca la dosis de fertilizante nitrogenado (Justes *et al.*, 2001).

Este aspecto se ha tenido poco en cuenta hasta ahora en los cultivos del Valle del Ebro dadas las escasas precipitaciones invernales, pero no deberían menospreciarse en los sistemas de regadío y en las Zonas Vulnerables. Por ello conviene evaluar el N que la alfalfa puede dejar en el suelo después del cultivo.

4. El valor de sustitución del fertilizante nitrogenado

El efecto de la rotación y la aportación en N de una leguminosa se pueden evaluar:

a) midiendo el N en la biomasa residual de la leguminosa, b) calculando el valor de sustitución de fertilizante nitrogenado de la leguminosa, c) midiendo la contribución en N de la leguminosa marcándola con ¹⁵N (Hesterman, 1988; Harris y Hesterman, 1990; Lory *et al.*, 1995a; Varvel y Wilhelm, 2003).

El valor de sustitución en fertilizante nitrogenado (N-Fertilizer Replacement Value, **N-FRV**) se define como la cantidad de fertilizante nitrogenado necesaria para, en un cultivo determinado cuyo precedente ha sido una especie no-leguminosa, obtener un rendimiento idéntico al que produce si el cultivo anterior ha sido una leguminosa y no se ha aportado abono nitrogenado (Hesterman, 1988; Bullock, 1992; Paré *et al.* 1992; Lory, 1995a). Este valor estima cuantitativamente la cantidad de N que aporta la leguminosa a la secuencia de cultivos (Bullock, 1992) y puede ayudar a tener una idea de la reducción en las necesidades de fertilizante nitrogenado en los cultivos posteriores (Paré *et al.*, 1992).

Dada la compleja dinámica del N en el suelo, es probable que el N-FRV sobreestime la contribución de N por las leguminosas en la rotación (Bullock, 1992), ya que asume que el aumento en rendimiento del cultivo en rotación con una leguminosa se debe únicamente a la contribución en N de esta última, despreciando e incluyendo los otros factores del *efecto rotación* (Badaruddin y Meyer, 1994). Además, considera que la planta asimila igualmente el fertilizante N y el N del residuo. Ambas consideraciones no son del todo correctas (Hesterman, 1987; Hesterman, 1988; Karlen y Sharpley, 1994). Tampoco tiene en cuenta que la eficiencia en el uso del N no es del 100% (Harris y Hesterman, 1990).

Puede evaluarse la aportación de la leguminosa al cultivo posterior en base a la biomasa que deja en el campo al ser enterrada y su riqueza en N. Como regla general Munson (1978) considera que 2/3 partes del nitrógeno de un cultivo de alfalfa se cosecha en forma de forraje y un tercio se queda en el suelo para el cultivo siguiente. Si esta regla fuera cierta, en el valle del Ebro, considerando unas producciones medias de 15.000 kg ha⁻¹ (a menudo superadas) con un 17 % de proteína bruta, la alfalfa dejaría anualmente unos 140 kg N ha⁻¹.

La contribución de la alfalfa al maíz siguiente, evaluada a partir de Nitrógeno marcado (¹⁵N) da resultados directos, inferiores al de los que indica el N-FRV. La diferencia es debida a que el método del ¹⁵N únicamente mide la contribución del N de la biomasa incorporada al suelo (y descarta el *efecto rotación* citado anteriormente) y tiene en cuenta la eficiencia en el uso de N (Harris y Hesterman, 1990).

A pesar de los inconvenientes de utilizar el N-FRV para las recomendaciones en fertilización nitrogenada, presenta las características necesarias para que agricultores o asesores técnicos puedan adoptar la metodología. No interfiere en otros aspectos de la producción y su cálculo es relativamente fácil para cada situación (Lory *et al.*, 1995a).

Como se ha visto anteriormente, la cantidad de N fijada por la leguminosa y la proporción residual en el suelo varían en función de las condiciones ambientales (Kelling *et al.*, 1993). En consecuencia, el N-FRV puede cambiar con el clima, las características del suelo o el manejo del cultivo. Para determinar mejor la variabilidad de los N-FRV y obtener un valor de N-FRV fiable y aplicable a una área amplia de producción es necesario llevar a cabo ensayos en las distintas condiciones. Según Gorchs (2006), el consenso actual es que las rotaciones incrementan el rendimiento y son básicas para una producción sostenible, pero también que este *efecto rotación* es específico para cada zona (Bullock, 1992). Así pues, es necesario identificar y cuantificar en las distintas condiciones medioambientales los efectos de las posibles rotaciones para poder diseñar secuencias de cultivos que aprovechen al máximo estos aspectos beneficiosos (Francis y Clegg, 1990). En los estados del Corn-Belt (USA) El-Hout y Blackmer (1990), por ejemplo, llevaron a cabo determinaciones del N-FRV en 10 localidades y 29 campos simultáneamente, mientras que Kelling *et al.* (1993) compararon 63 situaciones distintas.

5. Evaluaciones previas del N-FRV de la alfalfa en el maíz

A pesar de ser ampliamente conocido el efecto beneficioso de la alfalfa en el maíz, como se ha citado anteriormente, los agricultores y técnicos son reticentes a disminuir el abonado nitrogenado, tanto en el Valle del Ebro como en zonas del medio-Oeste de Estados Unidos, donde las rotaciones alfalfa-maíz son frecuentes (El-Hout y Blackmer, 1990; Peterson y Russelle, 1991). Encuestas recientes muestran que un 85% de los agricultores y un 94% de los industriales del Valle del Ebro reconocen que la alfalfa mejora el cultivo siguiente, pero sólo un 25% de los agricultores y un 58% de los industriales reducen la dosis de abonado nitrogenado en la superficie que gestionan (Sisquella *et al.*, 2004). Es probable que esta diferencia sea debida a la falta de información, sea porque desconocen el valor fertilizante potencial de la alfalfa, o por desconfianza de las posibles reducciones en la dosis de nitrógeno en el siguiente cultivo de maíz (Alvaro y Lloveras, 2003). También podría ser debida al precio del fertilizante mineral respecto al alto valor de la comercialización del maíz, bajo hasta ahora. En este caso, los precios actuales, en aumento debido a la dependencia del petróleo, podrían favorecer que se tenga en cuenta la aportación en N de la leguminosa.

A partir de los años 80, agricultores e investigadores de USA mostraron un interés creciente por las rotaciones de cultivos debido al aumento de los costes de los fertilizantes inorgánicos y a la disminución de los rendimientos en los monocultivos. Bundy y Andraski (1993), por ejemplo, observaron que los rendimientos de maíz en una

secuencia alfalfa-maíz suelen ser más elevados que en monocultivo, alcanzando a menudo rendimientos máximos sin añadir fertilizante nitrogenado o bien con dosis bajas. Por este motivo, en distintos estados de USA, se iniciaron a finales de los años 1980 una serie de ensayos con el fin de optimizar la fertilización nitrogenada del maíz después de la alfalfa (El-Hout y Blackmer, 1990; Bundy y Andraski, 1993; Kelling *et al.*, 1993). Estas investigaciones sobre el efecto de la alfalfa en los cultivos siguientes han sido llevadas a cabo principalmente en los estados del centro-oeste de Estados Unidos (Munson, 1978; Baldock *et al.*, 1981; Bruuslema y Christie, 1987; Fox y Piekielek, 1988; El-Hout y Blackmer, 1990; Bundy y Andraski, 1993; Kelling *et al.*, 1993; Scharf, 2001; Lory *et al.*, 1995c). También en Europa se han realizado algunos estudios: en Francia (Beaudoin *et al.*, 1992; Tribou-Blondel y Tribou, 1994; Justes *et al.*, 2001) y en los Países Bajos (Spietz y Sibma, 1986).

Las cantidades que presentan como valor fertilizante de la alfalfa van de 0 a 50 kg N ha⁻¹ cuando la alfalfa anterior había producido bajos rendimientos, de 60 a 100 kg N ha⁻¹ cuando se había tratado de una alfalfa normal y de 80 a 180 kg N ha⁻¹ después de una alfalfa con producciones elevadas (Baldock y Musgrave, 1980; Kurtz *et al.*, 1984; Scharf, 2001).

No obstante, los métodos aplicados para obtener el N-FRV de la alfalfa en estos estudios realizados en USA fueron distintos según los estados o los ensayos. Por ello y porque no reflejan las variaciones medioambientales, se observan recomendaciones muy distintas en zonas similares (Bundy y Andraski, 1993; Morris *et al.*, 1993). Por estos motivos, El-Hout y Blackmer (1990) y Morris *et al.* (1993) opinan que la metodología aplicada para recomendar dosis de N en un cultivo de maíz después de uno de alfalfa merece una atención especial. Las incertidumbres suelen llevar a los productores a aplicar mucho más nitrógeno del necesario y no tener en cuenta las recomendaciones de los técnicos y los científicos.

Distintos aspectos de manejo tanto de la alfalfa como de los cultivos posteriores, pueden hacer variar el N-FRV. Un cultivo de alfalfa de un año puede presentar un N-FRV para el maíz que le sigue en la rotación limitado por la corta duración de la alfalfa. Los aportes podrían ser mayores si hubiera durado más (Hesterman *et al.*, 1987; Lory *et al.*, 1995). Además, sea cual sea el efecto de las leguminosas en la rotación, éste disminuye con los años. Vanotti y Bundy (1995) evaluaron que, después de dos años de alfalfa, el N-VRF disminuía el segundo año un 76% respecto al primer año de maíz. El tercer año ya no apreciaron diferencia.

En un estudio utilizando ^{15}N , Hesterman *et al.* (1987) calcularon eficiencias medias de utilización del N aportado por un cultivo de alfalfa de un año del 48%, con amplios rangos de variación entre localidades, variedades y manejo de la alfalfa. Las mayores eficiencias correspondían a las situaciones en que las leguminosas habían fijado menos N y atribuyeron estas variaciones a la diferencia en la cantidad de N incorporada en cada situación más que a diferencias en absorción de N por parte del maíz. Además, estas bajas eficiencias de recuperación del N de las leguminosas podrían estar asociadas al proceso de inmovilización-mineralización que se produce en el suelo antes de ser absorbido por las plantas (Hesterman, 1988). Varvel y Peterson (1990a) compararon la eficiencia de recuperación de N por parte de un maíz en monocultivo y uno en rotación con leguminosas. Los resultados obtenidos, que variaron según el cultivo precedente, fueron atribuidos a una falta de sincronización entre el uso del N por el maíz y el N mineralizado a partir del suelo o los residuos, posiblemente debido al cultivo precedente, el tipo y cantidad de residuos y, quizás, a algún otro factor ambiental.

En los anteriores ensayos, los N-FRV de la alfalfa se obtuvieron generalmente con alfalfas sin regar y que producen unas medias anuales de 5 a 12 Mg ha⁻¹ de materia seca (MS). En los regadíos del Valle del Ebro, las alfalfas son de ciclo más largo, y las producciones medias fácilmente superan los 15 Mg ha⁻¹ de MS (Lloveras *et al.*, 1998; Lloveras *et al.*, 1999; Alvaro y Lloveras, 2003). A una mayor producción de biomasa aérea le corresponde una mayor biomasa subterránea, una mayor fijación de N y una mayor cantidad de residuos en el suelo (Munson, 1978). Por ello, es probable que los N-FRV en los regadíos de Lleida y en las condiciones del Valle del Ebro presenten valores distintos a los obtenidos en USA. Parece necesario calcular los posibles valores de sustitución de la alfalfa en el maíz, con datos reales y fiables obtenidos en las condiciones propias y, a poder ser, extrapolables a otras regiones españolas o mediterráneas. En España, este estudio sería uno de los primeros (si no el primero) en que se determina el N-FRV de la alfalfa y de cualquier leguminosa.

6. Condiciones de producción en el Valle medio del Ebro y en los regadíos del Canal d'Urgell

En la Figura 2 se puede apreciar la superficie regada por los canales d'Urgell (y el canal auxiliar, en el margen izquierdo del Segre), de Algerri-Balaguer (en el triángulo comprendido entre el Segre y el Noguera-Ribargorçana, regadío reciente que no cubre todavía todas las parcelas), de Pinyana (en el margen derecho del Segre), de Aragón y Catalunya (zona donde destacan los pivots al oeste de la Lleida) y de Monegros-Cinca (en el margen derecho del Cinca).

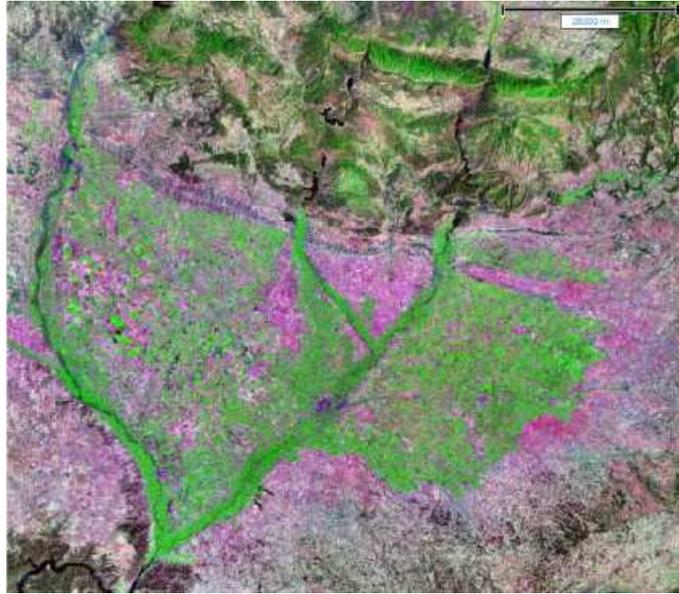


Figura 2. Imagen de satélite de los regadíos de Lleida y parte de los de Huesca. (Hipermapa. Atlas electrònic de Catalunya. <http://hipermapa.ptop.gencat.net>)

6.1. Rotaciones en los regadíos del Valle medio del Ebro

En el los regadíos de Huesca y Lleida, el maíz, la alfalfa y, en menor medida, el trigo, forman parte de los sistemas de producción y de las rotaciones de cultivo clásicas de la zona (Alvaro y Lloveras, 2003). En 2004, Sisquella *et al.* llevaron a cabo un estudio sobre el sector productivo de alfalfa, el maíz y el trigo en el Valle medio del Ebro, basado en encuestas a agricultores y técnicos, que permite tener una idea fiable y representativa de las técnicas actuales de producción en esta zona. Según esta encuesta, el maíz se cultiva en rotación con otros cultivos en un 70% de la superficie; en un 42% de estas rotaciones sigue a la alfalfa y en un 20% sigue la sucesión de cultivos Maíz-Trigo-Alfalfa estudiada en esta tesis (Figura 3). En un 51 % de la superficie de alfalfa de España se siembra posteriormente maíz y en un 70% si se considera el total del Valle del Ebro.

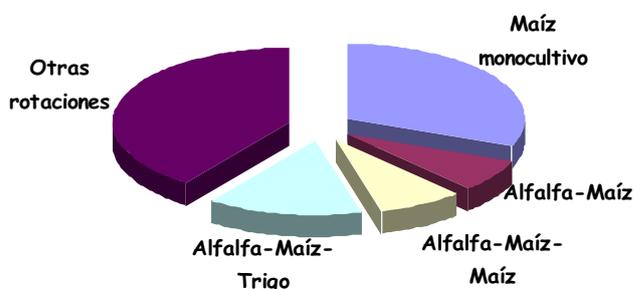


Figura 3. Distribución de las rotaciones más habituales en el maíz en los regadíos de Lleida y Huesca.

6.2. El cultivo de la alfalfa en el Valle del Ebro

La alfalfa es un cultivo tradicional en los regadíos del Valle del Ebro. La superficie dedicada a su producción ha aumentado considerablemente en las últimas décadas debido a las ayudas comunitarias a su deshidratación y, en la actualidad, es un pilar básico de la industria transformadora de forrajes de la zona. Se destinan a este cultivo en España del orden de 179.000 ha, un 74 % de las cuales están en el Valle del Ebro. Actualmente España es el líder en la Unión Europea de la alfalfa deshidratada, con una producción cercana a los dos millones de toneladas anuales (AIFE, 2007).

Según Sisquella *et al.* (2004) la mayor parte de la superficie de alfalfa sembrada en la provincia de Lleida se riega por gravedad mientras que en los regadíos de Huesca solo un 56%. Aproximadamente la mitad de la alfalfa de la zona se siembra en primavera y la otra mitad en otoño y, generalmente, la fecha de siembra está determinada por el cultivo precedente. Los agricultores de la zona consideran que el cereal de invierno es el precedente ideal y, en la mayoría de los casos, transcurren 4-5 años entre dos cultivos de alfalfa.

En la alfalfa se lleva a cabo generalmente un abonado de fondo o de mantenimiento con fósforo y potasio. Cabe destacar la elevada proporción de superficie de terreno en la que se aplica abonado nitrogenado de cobertera, incluso con dosis superiores a los 40 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Las aplicaciones de residuos ganaderos no son habituales y las de microelementos y aminoácidos son frecuentes.

La alfalfa se suele cortar cada 31-35 días, dando un total de 5-6 cortes al año y el cultivo suele tener una duración de entre 4 y 5 años. La producción media anual (12% de humedad) en Lleida es de 14,5-17,5 Mg ha⁻¹ y en la provincia de Huesca algo inferior.

6.3. El cultivo del maíz en los regadíos del Canal d'Urgell

La superficie cultivada de maíz en los regadíos de la provincia de Lleida ha estado vinculada en gran parte a las ayudas comunitarias y a su cambio y evolución. En el período 1994-96 aumentó de unas 13.700 ha a 17.600 ha y, según los últimos datos disponibles, en 2003 ocupaba unas 28.100 ha (MAPA, 2004).

En el Canal d'Urgell, prácticamente todo el maíz se riega por gravedad, con turnos de 12-15 días. En otras zonas y dependiendo de la época, los turnos pueden ser de 7-18 días. Se suele sembrar entre el 15 de marzo y el 15 de abril y cosechar entre septiembre y octubre

En la mitad de la superficie, la fertilización nitrogenada se hace únicamente con abono mineral (300-350 kg N ha⁻¹), y en la otra mitad se combinan abono orgánico y mineral (>400 kg N ha⁻¹) (Sisquella *et al.*, 2004). Además se suelen aportar como máximo 125 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 125-175 kg K₂O ha⁻¹, al que hay que añadir las aportaciones orgánicas cuando las hay. La cantidad de purín aportada es muy variable. Cabe recordar que el purín es considerado más un residuo que un recurso (Sisquella *et al.*, 2004).

Según el MAPA (2004) los rendimientos medios declarados de maíz son del orden de 9.000-9.500 kg ha⁻¹. La producción mínima de maíz grano para que los productores de la zona consideren el cultivo rentable varía entre 8.000 y 10.000 kg ha⁻¹. Generalmente los rendimientos son más elevados cuando se riega por aspersión. El coste de producción mayor suele ser el precio de la semilla, aunque para un 35% de los productores (coincidiendo con los que no aplican abono orgánico) el mayor coste es el del fertilizante mineral (Sisquella *et al.*, 2004).

6.4. El cultivo del trigo en los regadíos del Canal d'Urgell

El trigo en regadío ha pasado de ocupar unas 18.000 ha en 1996 a ocupar 9.500 ha en 2004 en la provincia de Lleida. Prácticamente todo el trigo que se produce en Cataluña es harinero (Abad, 2004).

En la zona del Canal d'Urgell, el 100% de la superficie se riega por superficie y se realizan entre uno y tres riegos durante la campaña. Se suele sembrar en noviembre y

cosechar en junio. Según el MAPA, los rendimientos declarados en regadío son del orden de 4.500-5.000 kg ha⁻¹.

Entre el abonado de fondo y el de cobertera, el fertilizante orgánico y el mineral, se aportan en total entre 100 y 200 kg N ha⁻¹, entre 75 y 125 kg P₂O₅ ha⁻¹ y entre 75 y 100 kg K₂O ha⁻¹ (Sisquella *et al.*, 2004).

7. El Nitrógeno

7.1. Efecto del nitrógeno en el maíz y el trigo

El nitrógeno es el macronutriente que tiene efectos más evidentes en el crecimiento vegetal. Tiene un papel fundamental ya que es componente de las moléculas de clorofila, forma parte de aminoácidos y proteínas y, en consecuencia, de enzimas y otras moléculas esenciales que regulan el desarrollo y el crecimiento de la planta. Es necesario para la utilización de los carbohidratos, forma parte de la molécula de ATP y de moléculas hormonales derivadas de los aminoácidos. Estimula el desarrollo y la actividad radicular y la absorción de los otros nutrientes (Olson y Kurtz, 1982).

Efecto en el Maíz

La nitrógeno tiene una influencia indirecta y directa sobre el rendimiento y sobre la calidad del grano de maíz. Primero, el nivel de absorción de N por la planta condiciona la acumulación de materia seca (Richie *et al.*, 1997) variando según la fase de desarrollo en la que se encuentra. Posteriormente se acumula en el grano, punto en el que se concentra la mayor parte del N en la parte aérea al final del ciclo (Fageria *et al.*, 1997). El N es fundamental en la determinación del rendimiento en grano. En el momento de maduración, el N es transferido de las hojas y el tallo hacia el grano, razón por la cual es importante que el desarrollo vegetativo sea correcto. Se establece un compromiso entre crecimiento vegetativo y rendimiento en grano. La disponibilidad en N en este período es importante más por un criterio de calidad, ya que aumenta el contenido de proteína, que por un aumento en rendimiento del grano (Hagin y Tucker, 1982). El principal factor que afecta al contenido en proteína es la disponibilidad de N, y sobretodo el fertilizante nitrogenado.

Efecto en el Trigo

El nitrógeno tiene una relación directa sobre el rendimiento y sobre la calidad del trigo (Triboi *et al.*, 1990). Afecta sus diferentes componentes del rendimiento de forma distinta: el N suele aumentar en número de granos por espiga y de espigas por unidad de superficie pero influye poco en el peso del grano (Abad, 2004). De los distintos

parámetros de calidad del trigo harinero, el más importante es el porcentaje de proteína del grano (Abad, 2004) que, al aumentar, mejora la calidad del trigo (Lopez-Bellido *et al.*, 1998; Lloveras *et al.*, 2001; Arregui, 2006). La variación de este parámetro depende principalmente del genotipo, de las técnicas culturales y del clima. La cantidad de proteína del grano depende de la cantidad de N absorbida por la planta y, en gran medida, del N disponible en el suelo en los diferentes estadios de desarrollo del cultivo. Un correcto abonado nitrogenado, tanto en la dosis como en su distribución durante el crecimiento, incrementa el contenido en proteína del grano y, en consecuencia, la calidad del trigo (Triboi *et al.*, 2000). A nivel molecular, las proteínas del grupo de la gliadinas y gluteninas y la proporción entre ambas son las principales responsables de la calidad del trigo (Gras, 2001). Esta relación aumenta con la cantidad de N en el grano o sea con el suministro de N (Triboi *et al.*, 1990; Triboi *et al.*, 2000; Abad, 2004).

7.2. Fertilización nitrogenada en el maíz: necesidades y momento de aplicación

Conocer el ritmo de absorción del nitrógeno por la planta permite programar la fertilización. Además de aplicar la dosis adecuada de fertilizante nitrogenado, conviene sincronizar las aportaciones y la disponibilidad de N en el suelo con las demandas y necesidades por parte de la planta (Francis y Schepers, 1994). El N es fundamental para el rendimiento y la calidad del maíz. La absorción de N por la planta de maíz se produce durante todo el ciclo de cultivo aunque varía en función del estadio fenológico.

Al estar directamente relacionado con la producción de materia seca, la acumulación de nitrógeno sigue el ritmo de acumulación de ésta (Figura 4). En la primera fase del cultivo, (de nascencia a V10-10 hojas) el cultivo absorbe el 10% del nitrógeno total que necesita la planta; de V10 hasta la aparición de las sedas (R1) absorbe entre un 55 y un 70% del nitrógeno total que necesita; durante el llenado del grano (R2 a R5) absorbe el resto del N (Plénet *et al.*, 1991).

Durante las tres primeras semanas después de la emergencia, el maíz absorbe el N mineral del suelo a niveles reducidos. Durante este período, dependiendo de las condiciones del clima y del suelo, un exceso de N puede ser lixivado de la zona radicular (Blackmer *et al.*, 1989; Magdoff, 1991; Binford *et al.*, 1992a).

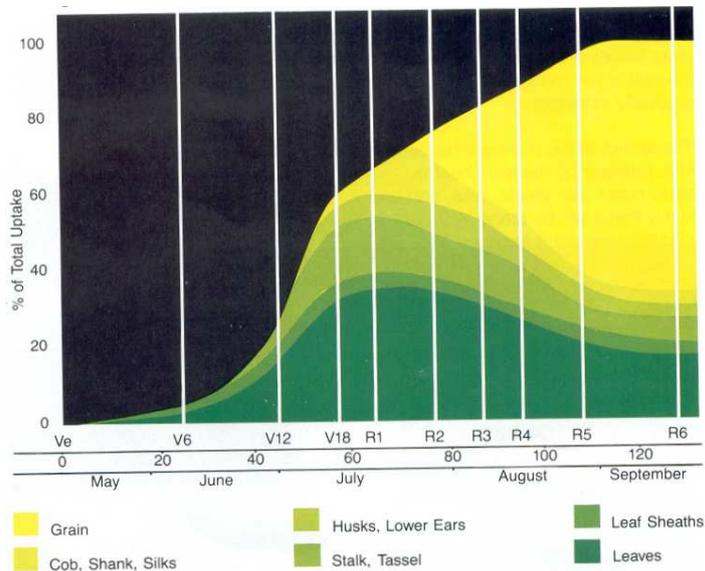


Figura 4. Absorción de N de la planta de maíz a lo largo del ciclo y porcentaje de N en las diferentes partes de la planta respecto al N total (Ritchie *et al.*, 1993)

La tasa de extracción de N por el maíz es relativamente lenta hasta que las plantas entran en el periodo de crecimiento rápido (V6) (Magdoff, 1991; Varvel *et al.*, 1997b). Las necesidades al principio del ciclo del cultivo se atribuyen a un sistema radicular inicial reducido y explicarían la respuesta positiva a un abonado starter (Schröder *et al.*, 1997). A partir del estadio V6, el sistema radicular, bien desarrollado, permite no ser tan precisos en la fertilización (Ritchie *et al.*, 1997). A medida que la planta crece en altura y que aparecen nuevas hojas, la absorción de N incrementa rápidamente y, hasta aproximadamente los estadios reproductivos, la acumulación de nutrientes y de materia seca aumenta, con la correspondiente demanda de nutrientes y agua del suelo para cubrir las necesidades. En el momento en que se determinan cada uno de los componentes del rendimiento, la disponibilidad de nitrógeno de los demás nutrientes y de agua es crítica (Ritchie *et al.*, 1997). El número de granos, principal componente del rendimiento, es función del crecimiento del cultivo hasta la aparición de las sedas, que es a su vez función de la radiación interceptada y de la eficiencia de conversión a materia seca (Barberi *et al.*, 2000). Un estrés debido a un déficit de N reduce el LAI y el nivel de fotosíntesis y, en consecuencia, el número de granos fértiles y el rendimiento (Andrade *et al.*, 1996). Cualquier estrés, incluida una deficiencia de N, puede reducir en numero potencial de granos y el tamaño de la mazorca, aunque estos componentes se determinen más tarde en el ciclo (Richie *et al.*, 1997).

Cuando las sedas de la mazorca empiezan a crecer (V15) se inicia el periodo más crítico para la determinación del rendimiento. Se pueden producir pérdidas importantes si la planta sufre algún tipo de estrés entre dos semanas antes y dos semanas después de la aparición de las sedas (R1). Las mayores pérdidas se producirán si el estrés es de tipo hídrico, pero una deficiencia de nutrientes, entre ellos el N, también puede tener repercusiones en el rendimiento. A partir de R2 y hasta la madurez fisiológica, empieza la traslocación de nutrientes de las partes vegetativas hacia las reproductivas y la absorción de N va perdiendo importancia. A medida que el grano va aumentando de tamaño, un estrés por déficit de N va dejando de tener efecto en el número de granos y solo afecta el peso de éstos (Ritchie *et al.*, 1997).

Para un uso eficiente del fertilizante nitrogenado, conviene tener en cuenta que el momento de máxima absorción por el cultivo depende de factores como clima, fecha de siembra y el propio momento de aplicación del fertilizante. Suele ser antes de antesis, cuando se define el potencial productivo, aunque también haga falta N disponible durante el llenado del grano (Francis y Shepers, 1994). Dada la gran movilidad de los nitratos en el suelo, el momento de aplicación del fertilizante nitrogenado puede tener un efecto importante tanto en la respuesta en rendimiento como en la efectividad del fertilizante aplicado.

7.3. El ciclo del Nitrógeno en un sistema de cultivo

El tránsito de nitrógeno en los suelos agrícolas o, más en general, en los sistemas agrícolas, constituye un eslabón del ciclo de nitrógeno en su conjunto, pero solo una pequeña fracción del nitrógeno de la litosfera se encuentra en los suelos (Foth y Ellis, 1988). En el caso específico de los sistemas de regadío pueden distinguirse diversas fuentes u orígenes del nitrógeno presente en la zona radicular. A efectos de su composición se distinguen diversas especies químicas como consecuencia de la dinámica del ciclo del nitrógeno.

Las cantidades de nitrógeno presentes en el suelo varían en función de la composición y las características edáficas. En un suelo agrícola, el horizonte de laboreo contiene entre 0,1 y 0,2% de nitrógeno en forma orgánica, y éste representa un 90% del total del N del suelo (Juergens-Gschwind, 1989). Solo una pequeña fracción del nitrógeno del suelo está presente en sustancias nitrogenadas absorbibles por el sistema radicular, sean éstas NH_4^+ cambiable o NO_3^- soluble en agua.

La Figura 5. representa esquemáticamente los distintos procesos que participan en el cambio de las formas nitrogenadas entre la entrada del N en el perfil del suelo y su eventual retorno a la atmósfera o su lixiviación en profundidad. Conviene distinguir: la fijación (en diversas variantes), la mineralización-inmovilización, la nitrificación-desnitrificación y la fijación-volatilización amoniacal.

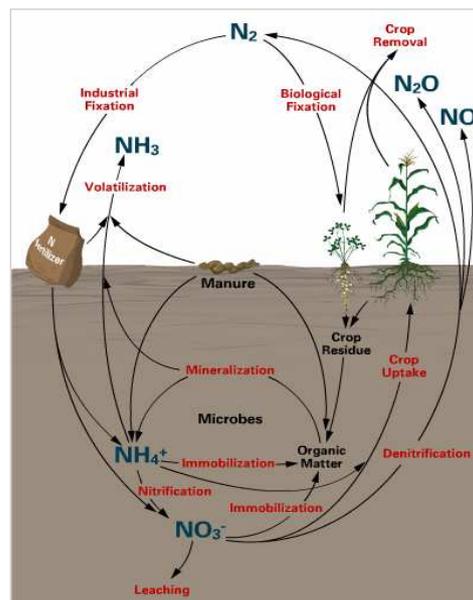


Figura 5. Principales procesos que intervienen en el Ciclo del Nitrógeno en los sistemas agrícolas (con la autorización de Nutrient Management Spear Program; <http://nmisp.css.cornell.edu>)

La fijación

Una de las principales vías de entrada natural de nitrógeno en los suelos es la fijación atmosférica. Esta fijación puede ser en ocasiones no biológica, originada por descargas eléctricas o por aportes originados en quema de combustibles fósiles o agua de lluvia. Es la que aprovecha el proceso Haber-Bosch cuando fija el N_2 atmosférico, lo combina con H_2 y produce NH_3 para la fabricación industrial de los fertilizantes nitrogenados.

Sin embargo, la fijación biológica es cuantitativamente más importante y es un proceso clave a nivel de cada nicho ecológico (Foth y Ellis, 1988). Destaca el papel de las leguminosas pero también de otros sistemas simbióticos (especies no leguminosas, asociaciones plantas-alga, bacterias), con cantidades de N_2 fijadas que pueden llegar a 50 y 600 $kg\ ha^{-1}$ en el caso de algunas leguminosas (Johnson *et al.*, 2005).

Factores ambientales como la temperatura, pH del suelo, aireación y concentración de nitratos en el suelo influyen en la efectividad de la fijación biológica de nitrógeno (Rauschkolb y Hornsby, 1994).

La mineralización-inmovilización

El nitrógeno presente en formas orgánicas (residuos vegetales, deposiciones animales, materia orgánica del suelo) puede ser susceptible de descomposición en formas inorgánicas como el NH_4^+ y NO_3^- , disponibles para las plantas. Los microorganismos heterotróficos que utilizan los componentes orgánicos que contienen N como fuente de energía son los causantes de estos procesos de mineralización (Jansson y Persson, 1982). Temperaturas elevadas, humedad y suelos aireados la aceleran (Johnson *et al.* 2005).

El proceso inverso, la transformación de componentes inorgánicos (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) en sustancias orgánicas se define como inmovilización (Jansson y Persson, 1982) y resulta de la asimilación de N inorgánico por microorganismos del suelo. Estos precisan del C como fuente de energía para esta fijación, razón por la cual los materiales con una relación C:N elevada (>25) favorecerán la inmovilización de N.

El proceso de mineralización-inmovilización tiene un gran impacto en el nivel de N disponible en el suelo (Feigin *et al.*, 1991). Los microorganismos entran en competencia con las plantas para la fijación de NH_4^+ y NO_3^- .

La nitrificación-desnitrificación

La nitrificación es el proceso de transformación de las formas reducidas de nitrógeno (ión NH_4^+) a formas oxidadas (ión NO_3^-). Este proceso de oxidación tiene lugar en dos fases en las que intervienen primero las bacterias *Nitrosomonas* sp. (para la obtención de NO_2^-) e, inmediatamente después, las bacterias *Nitrobacter* sp. en la segunda oxidación (obtención de NO_3^-). La nitrificación reduce el pH del suelo y se acelera con el aumento de temperatura y del grado de humedad y aireación del suelo (Schmidt, 1982; Johnson *et al.*, 2005).

La desnitrificación es la reducción de las formas nitrato y nitrito en formas gaseosas de nitrógeno: óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) y dinitrógeno (N_2). La desnitrificación tiene lugar en condiciones anóxicas, en presencia de bacterias como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Micrococcus*. Suelen ser suelos mal drenados, con falta de oxígeno y se precisa una fuente de materia orgánica que suministre el carbono mineralizable (Burford y Bremner, 1975; Johnson *et al.*, 2005).

La fijación-volatilización amoniacal

El ión NH_4^+ formado por mineralización y que aparece en la solución del suelo establece un equilibrio con el NH_4^+ cambiante vinculado a las posiciones intercambiables de las arcillas, en un proceso similar al de la fijación los iones K^+ . Precisamente a causa de la similitud de sus radios iónicos existe una competencia entre los iones NH_4^+ y K^+ por los puestos de fijación en los minerales arcillosos. Un perfil de suelo franco puede retener hasta 20 kg ha^{-1} de NH_4^+ en el momento de la recolección de cereales (Rauschkolb y Hornsby, 1994).

La volatilización amoniacal puede producirse cuando el equilibrio químico entre el NH_4^+ no fijado en los minerales de arcilla y el NH_3 de la solución del suelo presenta factores que acentúan una tendencia hacia la formación de amonio. Aportaciones de sales amoniacales en suelos calcáreos o de estiércoles frescos y condiciones favorables a la evaporación serían por ejemplo factores desencadenante de volatilización amoniacal. El entierro de purines, en cambio, puede reducir esta volatilización en un 25-75% (Johnson *et al.*, 2005).

La lixiviación

Los nitratos son muy solubles en el agua y pueden ser lavados fácilmente. Los iones nitrato disueltos en el agua se pueden perder por dos vías principales: por lixiviación, movimiento vertical del agua y de los solutos a través del perfil del suelo hasta horizontes freáticos o drenajes y por escorrentía, movimiento horizontal del agua y solutos por la superficie del suelo hasta llegar a ríos o lagos. La escorrentía se produce cuando el suelo está compactado o naturalmente drena mal (Powlson y Addiscott, 2005).

7.4. Entradas (y pérdidas) de nitrógeno en los regadíos del Canal d'Urgell

Es interesante enfatizar algunas de las aportaciones de nitrógeno que se producen, además de la propia fertilización nitrogenada mineral, en la zona regada por el Canal d'Urgell donde se ha desarrollado el estudio. Este suministro, en parte natural y en parte inducido por el propio sistema de cultivo, puede alcanzar cantidades importantes (Villar *et al.*, 1995). Se puede considerar que existen tres tipos de aportaciones suplementarias de nitrógeno: la reutilización del agua de riego, los residuos ganaderos de la zona y la composición edáfica. También se podría considerar la aportación que generan los cultivos anteriores por fijación simbiótica o por excedentes de la fertilización nitrogenada.

Aportación del agua de riego:

Los sistemas de riego del Canal d'Urgell se caracterizan por una recirculación intensa de las aguas de riego originadas en el Canal Principal. Numerosas acequias secundarias se alimentan, a su vez, de aguas de drenaje y lixiviación de parcelas de cotas superiores. Este sistema puede llegar a suponer eficiencias relativamente importantes (Cots, 2005) que mejoran las eficiencias teóricas estimadas a nivel de parcela. En cualquier caso, en función de la posición geomorfológica de la parcela y su acequia de riego, los aportes de nitrógeno del agua de riego pueden alcanzar niveles no despreciables. Ferrer *et al.* (1997), en un seguimiento de la riqueza en nitratos del agua de riego aportada por las acequias del Canal d'Urgell entre 1993 y 1997 midieron concentraciones de hasta $80 \text{ mg L}^{-1} \text{ NO}_3^-$.

Simultáneamente, estas entradas debidas a la lixiviación o lavado de nitratos de cotas superiores deben considerarse como una pérdida o salida de N de estas parcelas.

Aportación de los residuos orgánicos ganaderos:

La zona regable del Canal d'Urgell se sitúa en una de las principales zonas de ganadería intensiva de Europa. Ganadería porcina, vacuno intensivo y avicultura generan en la zona grandes masas de residuos orgánicos cuyo destino principal (y prácticamente único) son los propios suelos de la zona (ITAGI, 2001; LAF, 1999a). Los criterios de gestión de estos residuos han sido hasta hace pocos años la aplicación directa al suelo sin considerar su valor agronómico. Las distintas normativas y las campañas de divulgación de los técnicos intentan racionalizar estas aplicaciones. Sin embargo la situación dista de mantener un equilibrio racional a nivel de equilibrios nutricionales. Numerosas parcelas que han recibido residuos orgánicos de origen ganadero presentan concentraciones muy altas de nitrógeno disponible en el perfil del suelo (Villar *et al.*, 2000). Además, este nitrógeno recircula en el sistema a causa de métodos de riego con altas lixivitaciones a nivel de parcela. Esta lixiviación de nitratos se ve todavía más favorecida en ciertos suelos de drenaje rápido.

Aportación del perfil del suelo:

La zona regable del Canal d'Urgell se sitúa en una extensa zona relativamente llana, donde abundan los suelos desarrollados a partir de materiales aluviales de alta calidad edáfica, depositados en el Cuaternario reciente y sobre materiales de menor valor del Terciario (Oligoceno). Las áreas de depósito cuaternario presentan con frecuencia suelos profundos, muy edafizados, formados por materiales erosionados en los horizontes superficiales de la cabecera de cuenca. Esta circunstancia, frecuente en ambientes aluviales, conlleva suelos de alta fertilidad química y con niveles de materia orgánica

relativamente altos en horizontes profundos (carácter fluvéntico en el SSCS). Estos suelos, llamados localmente "terres grasses", son conocidos por su fertilidad natural y en su proceso de mineralización natural pueden generar una cantidad importante de nitrógeno en forma directamente disponible para las plantas.

7.5. El problema de los Nitratos en la zona: de 1994 a 2007

La acumulación de N mineral en el perfil del suelo puede generar un problema medioambiental ya que lleva asociado un riesgo de contaminación de aguas, debido a la lixiviación de nitratos, y de deterioro de la calidad atmosférica debido a las emisiones gaseosas de óxido nítrico (NO) y óxido nitroso (N₂O) que participan en el efecto invernadero (Meisinger y Randall, 1991; Johnson *et al.*, 2005). Fruto de la preocupación medioambiental que han creado las concentraciones crecientes de nitratos en las aguas freáticas de la Unión Europea, se han publicado diversas normativas de ámbito comunitario, nacional y autonómico.

La UE estableció la Directiva 91/676/CEE de 12 de diciembre, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura (DOL núm. 375 de 31-12-1991). Según esta normativa, cada estado miembro debía designar como Zonas Vulnerables aquellas superficies territoriales cuyo drenaje da lugar a la contaminación por nitratos y elaborar unos Códigos de Buenas Prácticas Agrarias de obligado cumplimiento en dichas zonas. Al mismo tiempo fijaba en 50 mg NO₃⁻ L⁻¹ la concentración a partir de la cual un agua se consideraba contaminada por nitratos.

Consecuencia de esta Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas se redactó y entró en vigor el Real Decreto 261/1996 de 16 de febrero (BOE núm. 61 de 11-03-1996) donde se establecían medidas para la protección contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.

Dos años después de la aprobación del RD 261/1996 se publicó el Decreto 283/1998 de 21 de octubre (DOGC núm. 2760 de 6-11-1998) que designaba las Zonas Vulnerables de Cataluña donde es obligatorio el cumplimiento del Código de Buenas Prácticas Agrarias. Éste se publicó como anejo al Orden del 22 de octubre (DOGC núm. 2761 de 9-11-1998) e incluye una serie de medidas a cumplir en las zonas vulnerables. El 13 de junio de 2000 la Generalitat de Catalunya aprobó el Decreto 205/2000 (DOGC núm. 3168 de 26-06-2000) que aceptaba el Programa de medidas agronómicas aplicables a las Zonas Vulnerables en relación a la contaminación de nitratos procedentes de fuentes agrarias. En 2004 se amplió la superficie de zonas vulnerables en Cataluña con el decreto

476/2004 de 28 de diciembre (DOGC núm. 4292 de 28-12-2004). La Figura 6 muestra el mapa de las Zonas Vulnerables tal y como se concreta actualmente.

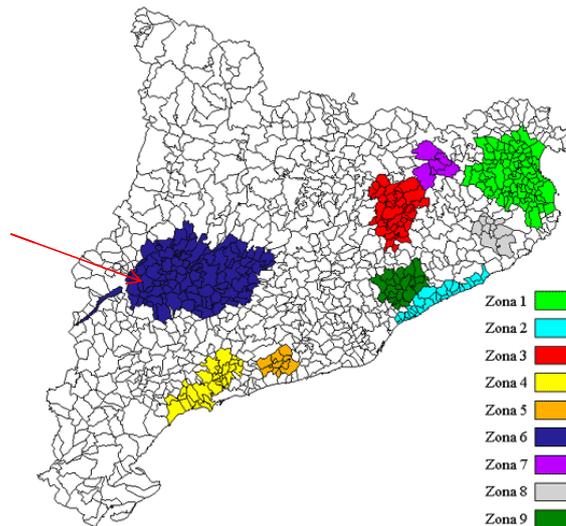


Figura 6. Mapa de las zonas vulnerables de Cataluña en relación con la contaminación de nitratos procedentes de la actividad agraria, según el Decret 476/2004 de 28 de diciembre. (Fuente: DAR, 2007. <http://www.gencat.net/darp/c/camp/nitrogen/cnitro03.htm#>). Se indica con una flecha la localización del ensayo, en el término municipal de Torregrossa.

Paralelamente, el Reglamento CE 1782/2003 de 29 de setiembre de Ayuda a la Producción Agrícola (DOL núm. 270 de 21-10-2003) obliga a los estados miembros a establecer Sistemas de Asesoramiento a las Explotaciones antes del 1 de enero de 2007, como ayuda en la gestión para cumplir los requisitos medioambientales y de seguridad alimentaria. Este mismo reglamento indica que el pago de parte de las ayudas será condicionado al cumplimiento de determinadas prácticas agrarias, entre las que se encuentre la Directiva 91/676/CEE. Este reglamento viene recogido posteriormente en el Real Decreto 2351/2004 de 23 de diciembre (BOE núm. 309 de 24-12-2004) y el Decreto 221/2005 de 11 de octubre (DOGC núm. 4489 de 14-10-2005).

Tanto la directiva europea como los reales decretos, decretos, reglamentos, ordenes y los Códigos de Buenas Prácticas Agrarias que se redactaron a partir de ella insisten en el control de los aportes nitrogenados a sistemas agrícolas tanto en forma orgánica como mineral. Los problemas medioambientales derivados del nitrógeno y la lixiviación de los nitratos se suelen asociar a zonas de ganadería intensiva, principalmente porcina, ya que genera grandes volúmenes de residuos que el sistema absorbe con dificultad (LAF, 1999a). Las zonas de producción suelen estar concentradas en algunas áreas

geográficas concretas, complicando la gestión de los residuos y su aplicación a las superficies agrícolas. En el Código de Buenas Prácticas Agrarias se establecen unas equivalencias en nitrógeno de cada tipo de animal. En Cataluña, algunas de las Zonas Vulnerables cuentan con una elevada concentración de ganadería porcina. Se trata principalmente de las zona 3 (Osona) y 6 (Noguera, Segarra, Urgell, Pla d'Urgell, Segrià) del mapa de Zonas Vulnerables.

La situación del problema de los nitratos en los suelos agrícolas ha cambiado totalmente desde 1994, año en que se empezó este estudio, pero ya había cambiado entre los años 1994 y 1997 en que se realizó la parte experimental. La UE había visto la necesidad de fijar espacios agrícolas donde fuera necesario controlar las aportaciones de N cuando se inició el periodo de ensayos y durante el cual el Gobierno Español especificó la necesidad de controlar la contaminación producida por nitratos. Poco después de finalizarlo, la Generalitat de Catalunya determinó que "*las unidades del cuaternario y aluviales de Lleida y los acuíferos de los detriticos oligocenos de Lleida*" del Término Municipal de Torregrossa eran Zona Vulnerable. La zona en la que se ubica la parcela experimental se encuentra en el interior del perímetro delimitado y es representativa de la problemática de la Zona Vulnerable más extensa de Cataluña.

La falta de conocimientos respecto a la cantidad de N que aporta en el suelo una leguminosa, o más concretamente el cultivo de alfalfa, es más grave en la actualidad en que los métodos de producción de maíz deben ajustarse a los Códigos de Buenas Prácticas Agrarias y en que las ayudas comunitarias están sujetas a la eco-condicionalidad (Boixadera, 2003). Con los cambios producidos en las ayudas comunitarias a la producción, se hace imprescindible la optimización de las dosis de abonado nitrogenado en el maíz y más aún cuando este cultivo sigue uno de alfalfa ya que es uno de los pocos aspectos en los que los agricultores podrán reducir los costes de producción (Sisquella *et al.*, 2004). El posible ahorro de fertilizante nitrogenado en maíz cuando éste sigue a la alfalfa es un aspecto de la producción de maíz que conviene tener en cuenta. Por todas estas razones, la necesidad de ajustar la fertilización del maíz después de un cultivo de alfalfa sigue siendo un tema actual, de gran importancia ambiental, técnica y económica para los sistemas de producción del Valle del Ebro.

La evolución de la agricultura europea en estos últimos años ha reforzado los aspectos agroambientales, dando un mayor peso a los factores de minimización de impactos, sostenibilidad y optimización de recursos. La mejora de la gestión del nutriente Nitrógeno y el mayor conocimiento de su dinámica en el contexto de una rotación sigue teniendo una gran importancia agronómica, económica y ambiental.

OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es estudiar, en las condiciones del Valle medio del Ebro y en los regadíos del Canal d'Urgell, el efecto de la alfalfa en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo y el efecto del abonado nitrogenado en un monocultivo tres años consecutivos de maíz. En particular se pretende:

1. Estudiar el efecto del abonado nitrogenado en la producción de maíz, su contenido en N y distintos parámetros de la planta.
2. Estudiar el efecto del abonado N en el suelo (0-120 cm) y su comportamiento a lo largo del ciclo productivo y durante un monocultivo de tres años.
3. Evaluar estrategias y herramientas que permitan mejorar la eficiencia del N en el cultivo del maíz en condiciones de clima mediterráneo propios de los regadíos del Valle medio del Ebro.
4. Sugerir un valor de sustitución del fertilizante nitrogenado de la alfalfa en el maíz posterior y el trigo siguiente en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo que permita ajustar la fertilización nitrogenada en las rotaciones en las condiciones de Valle medio del Ebro.
5. Estudiar el efecto de la alfalfa como precedente cultural en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo cuantificando:
 - El efecto rotación de la alfalfa en el rendimiento y la calidad del maíz posterior.
 - El efecto de la alfalfa en el contenido del N en el suelo, su evolución durante el año y el peligro de lixiviación de nitratos durante el cultivo del maíz.
 - El efecto rotación residual de la alfalfa al cabo de un año, en el rendimiento y calidad de un cultivo de trigo posterior al maíz y en el contenido en N del suelo.

Se pretende contribuir al ajuste de la fertilización nitrogenada en las rotaciones con la consecuente reducción de los problemas medioambientales que un exceso de N puede provocar. Pretende poner a disposición de los agricultores de la zona y técnicos del sector un dato serio y fiable que permita reducir las aportaciones de N al medioambiente, aunque obteniendo los mismos rendimientos y calidad.

El presente trabajo se compone de tres capítulos. Uno de ellos está redactado en inglés ya que se trata de un artículo que está en fase de evaluación por una revista internacional. Por esta razón, y aunque se haya intentado evitar, se repiten ciertas partes de materiales y métodos o de bibliografía.

CAPÍTULO I

Efecto del abonado nitrogenado en
la producción y la calidad del Maíz (*Zea mays* L.)
y en la evolución del contenido de nitratos
en el suelo en un monocultivo en regadío

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La fabricación de fertilizantes nitrogenados a partir del amoníaco resultante de la fijación industrial del N_2 atmosférico se generalizó a partir de la II Guerra Mundial. La utilización de abonos químicos fue común en Europa a partir de los años 50, un período relativamente reciente en la historia de la agricultura. Hasta entonces el N disponible para los cultivos venía fundamentalmente de la aportación de fertilizantes orgánicos o de origen natural (Nitrato de Chile), de la mineralización de la materia orgánica del suelo y de la fijación simbiótica de las leguminosas.

Los abonos minerales presentan la ventaja de ser de riqueza conocida y más homogénea que los abonos orgánicos, lo que permiten ajustar las aportaciones a las necesidades del cultivo. Su distribución mecánica es más fácil. Por estas razones, su consumo fue creciendo hasta finales de los años 80, en que empezaron a aparecer problemas medioambientales ligados a su uso excesivo y preocupaciones económicas debidas a sus costes muy vinculados al precio del petróleo. Paralelamente, los efectos negativos a nivel medioambiental se han ido traduciendo en medidas legislativas que intentan transmitir a los agricultores la magnitud del problema y pretenden estabilizar o reducir el consumo de fertilizantes nitrogenados.

1.1. Optimización de la fertilización nitrogenada

Actualmente uno de los principales objetivos del manejo del abonado nitrogenado es diseñar estrategias que permitan reducir las aportaciones de N en las tierras agrícolas y optimizar su utilización, especialmente en las Zonas Vulnerables. Estas reducciones son posibles si se tienen en cuenta los contenidos iniciales de nitratos en el perfil del suelo y, de esta manera, se reduce la acumulación de NO_3^- -N y los riesgos de pérdidas hacia las capas freáticas (Bundy y Malone, 1988). Cuando las cantidades iniciales de NO_3^- -N en el suelo son importantes es posible que no se tenga respuesta a la fertilización nitrogenada. Los contenidos iniciales de N en el suelo aseguran que la nutrición del cultivo será la correcta sin aportes externos. En cambio, cuando el nivel de nitrógeno inicial en el suelo es reducido, se observa una respuesta a la fertilización nitrogenada. El aumento en la dosis de fertilizante incrementa la absorción de nitrógeno por parte de la

planta y, en consecuencia, el rendimiento. Esta respuesta se observa hasta una determinada dosis, a partir de la cual el rendimiento se estabiliza o, incluso, desciende. A partir de esta dosis, disminuye la eficiencia del fertilizante y el N se puede acumular en el suelo (Beaudouin *et al.*, 2005).

El conocimiento de una dosis a partir de la cual no hay respuesta al abonado y la elección de un rango de fertilización nitrogenada adecuado es una decisión delicada e importante que afecta la producción de maíz y la rentabilidad económica del cultivo. El manejo correcto del N requiere indicadores de los niveles en el sistema suelo-planta que aporten información y permitan justificar las decisiones en la campaña actual o ajustar las aportaciones en la campaña siguiente (Schröder *et al.*, 2000). Conviene llegar a recomendaciones apropiadas que permitan maximizar la productividad y el beneficio económico y, al mismo tiempo, minimizar el impacto ambiental (Fageria *et al.*, 1997). En la actualidad se pueden utilizar diversos métodos, análisis y determinaciones que permiten hacer recomendaciones de fertilización (Blackmer, 1996): las curvas de respuesta, el método del balance, los análisis de suelos en distintos momentos del ciclo productivo y los análisis del tejido vegetal. Resulta de gran interés encontrar aquel que pueda ayudar en la decisión de manera más ajustada. También interesaría aquel método que los agricultores de la zona pudieran utilizar. Desde la Current University of Missouri (USA), las recomendaciones se basan, una vez determinado el rendimiento objetivo, la densidad de plantación y el contenido en MO, en un análisis de suelos antes de la plantación, el PSNT, el contenido en N de la planta en V6 y el contenido en clorofila de la última hoja en V6 (Scharf, 2001).

En agronomía se han utilizado con frecuencia las "curvas de respuesta" para describir el efecto de dosis crecientes de fertilizante en el rendimiento del cultivo. Son herramientas útiles para analizar la relación cultivo-fertilizante (Feigin *et al.*, 1991) que permiten ajustar modelos y predecir rangos óptimos de fertilización (Cerrato y Blackmer, 1990). Estos modelos intentan definir la función que permite obtener el rendimiento máximo según la dosis de fertilizante.

Se han especificado diversas funciones matemáticas para describir estas curvas en distintas condiciones experimentales y varios investigadores han observado que estos modelos a menudo discrepan cuando identifican estos rangos óptimos de fertilización (Cerrato y Blackmer, 1990). Teóricamente, la respuesta cuantitativa a un nutriente se describe por la ley de Mitscherlich (o de rendimientos decrecientes), que se define con una función exponencial decreciente (Urbano, 1995). Esta función se ajusta correctamente en la práctica, pero en el caso de la respuesta del grano de maíz al

abonado nitrogenado, se suelen utilizar otras funciones. Cerrato y Blackmer (1990) ensayaron las funciones lineal-meseta, cuadrática-meseta, cuadrática, exponencial y raíz cuadrada (Figura I.1). Todos estos modelos se ajustaron bien a los datos (utilizando la R^2 como estimador de la capacidad predictiva) pero estimaban dosis óptimas muy diferentes, hecho que puede tener gran repercusión económica y medioambiental. En su estudio, descartaron los modelos exponencial y raíz cuadrada por no presentar una distribución normal de los residuos; observaron que el modelo lineal-meseta subestimaba las dosis de fertilizante y el modelo cuadrático sobreestimaba. Consideraron que el modelo cuadrático-meseta era el que mejor se ajustaba en su caso a pesar de que el modelo cuadrático, más sencillo, fuera el más utilizado para obtener recomendaciones de abonado nitrogenado en maíz (Cerrato y Blackmer, 1990).

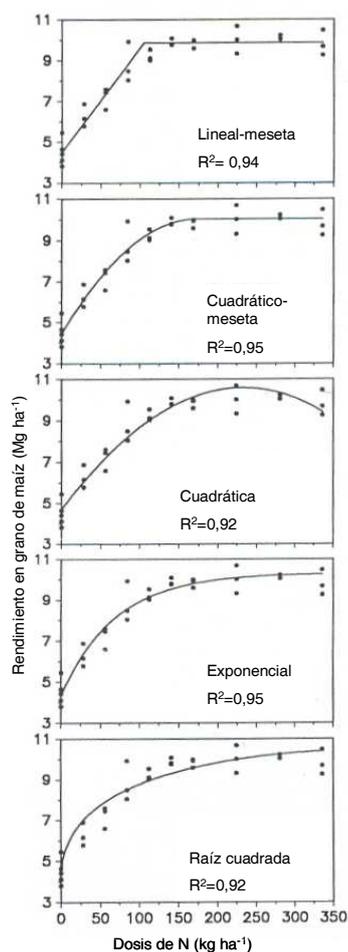


Figura I.1. Ejemplos de cinco modelos de respuesta a la dosis de fertilizante nitrogenado en el cultivo del maíz (Cerrato y Blackmer, 1990).

El nitrógeno residual también se puede describir con varios modelos, excepto el lineal-meseta (Schröder y Withagen, 1994). Al incrementar las dosis de fertilizante nitrogenado disminuye la eficiencia de uso del N por parte del cultivo siguiendo la tendencia de incrementos de rendimiento (Schmidt *et al.*, 2002). Entonces, el N residual en el suelo se incrementa (Figura I.2) con el correspondiente riesgo de lixiviación.

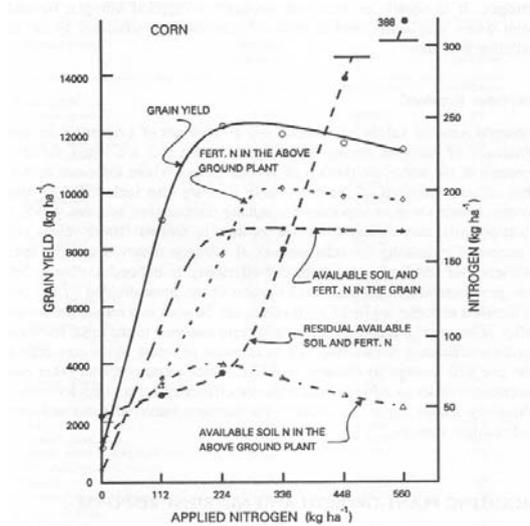


Figura I.2. Efecto de la dosis de fertilizante nitrogenado y del contenido en N del suelo sobre el rendimiento, el contenido en N del grano y de la planta y el N residual en el suelo después de la cosecha de maíz. (Stout, P.R., 1974, no publicado; citado en: Rauschkolb, R.S y Hornsby, A.G., 1994).

Se han descrito distintos balances de nutrientes que integran más o menos información. El Manual del Código de Buenas Prácticas Agrarias de Cataluña (Boixadera *et al.*, 2000) recomendaba este método como paso previo para establecer un plan de fertilización. Quemada (2006) define la metodología para calcular el balance de N como primer paso para lograr un manejo sostenible del N en un sistema de cultivo. Según la ecuación de Legg y Meisinger (1982), el balance de N sería:

$$\Delta \text{NMIN} = (N_f + N_r + N_{mn} + N_{fb} + N_{da} + N_a) - (N_i + N_p + N_d + N_v)$$

Donde:

ΔNMIN : Variación del contenido de N mineral en el perfil del suelo durante el cultivo

N_f : N aplicado como fertilizante mineral u orgánico

N_r : N aportado con el agua de riego

N_{mn} : N aportado por mineralización neta de la materia orgánica del suelo

N_{fb} : N aportado por la fijación biológica

N_{da} : N aportado por deposición atmosférica

N_a : Amonio liberado desde el espacio intrelaminar de arcillas

N_l : N lixiviado por debajo del límite inferior del sistema

N_p : N extraído por el cultivo

N_d : N Pérdidas de N por desnitrificación

N_v : Pérdidas por volatilización.

Este método permite calcular la dosis de fertilizante a aportar considerando los aportes de N procedentes de todos los procesos de N del suelo e identificar determinados procesos que están afectando la eficiencia en el uso del N (Kitchen y Goulding, 2001). Permite corregirlos y, en general, definir estrategias de manejo más eficiente. Sin embargo cuenta con gran número de componentes, a menudo difíciles de determinar y es habitual recurrir a simplificaciones y estimaciones. Además, para su aplicación, necesita de una calibración con ensayos de campo y un adecuado plan de muestreo. Finalmente, la mayoría de estos balances se basan en un rendimiento determinado de maíz (ya sea medio o objetivo) que en realidad varía en función de las condiciones del año. Por ello Meissinger *et al.* (1992) advierten que estas recomendaciones tienden a sobreestimar la dosis de fertilizante. El tiempo y la experiencia han demostrado que los balances permiten un conocimiento muy amplio de los procesos que rigen el ciclo del N (Quemada, 2006) pero que son de difícil aplicación para el agricultor a nivel de parcela. En las Zonas Vulnerables de Lleida no se han utilizado generalmente para la evaluación de la dosis de fertilizante N aportar.

Entre los análisis de suelos utilizados como herramientas de diagnóstico del N en maíz destacan los que realizan en primavera, antes del abonado de cobertera (Pre-Sidedress-Soil Nitrate Test, PSNT). Se basan en que se produce un máximo en el contenido en nitratos del suelo en primavera, después de que procesos como lixiviación, mineralización o desnitrificación hayan provocado fluctuaciones de la concentración de nitratos (Figura I.3). Se analiza el suelo hasta una profundidad de 30 cm, cuando el maíz mide unos 15-30 cm. Este análisis, propuesto inicialmente por Magdoff *et al.* (1984), permite evaluar las necesidades de fertilización de cobertera y es una herramienta que puede ayudar a diagnosticar las cantidades de abonado nitrogenado necesarias (Binford *et al.*, 1992a; Blackmer *et al.*, 1989; Bundy y, Andraski, 1993). Asume que la mayor parte del N se aplica en este momento (Meissinger *et al.*, 1992). El principal inconveniente de este tipo de determinaciones es el tiempo que puede pasar entre la toma de la muestras de suelo

y la obtención de los resultados que permitan tomar decisiones sobre la dosis de N a aportar en cobertera. Este tiempo debería ser muy breve.

El conocimiento, durante varios años del contenido de nitratos en suelo poco después de la cosecha junto con los contenidos en el momento de la siembra permiten conocer el historial de la parcela y la tendencia de comportamiento de N durante los meses de cultivo y los de invierno. A partir de este conocimiento y de la experiencia, se podrán hacer recomendaciones disponiendo de datos más ocasionales.

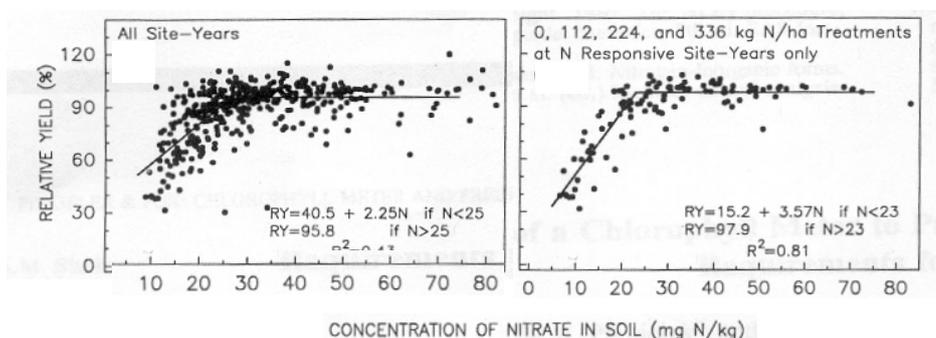


Figura I.3. Relación entre rendimientos relativos (%) y concentración de nitratos en el suelo (0-30 cm) cuando el maíz tiene 15 cm de altura: a la izquierda, media de 45 localidades; a la derecha, únicamente los ensayos que responden al abonado N, considerando sólo los tratamientos 0, 112, 224 y 336 kg N ha⁻¹. Iowa. (Blackmer *et al.*, 1992)

Otro método que ayuda en la decisión de la dosis de N adecuada es la valoración del estado nutritivo de N de la planta mediante el empleo del SPAD. Existe una relación directa entre las lecturas SPAD y el contenido de nitrógeno de la planta ya que la concentración de clorofila está correlacionada con el contenido en N en la hoja. Al determinar el contenido en clorofila, permite reflejar el estado nutritivo de N de la planta (Blackmer y Schepers, 1995). El medidor de clorofila SPAD es un equipo de diagnóstico portátil de fácil uso que estima de forma instantánea el contenido relativo de N en las hojas sin destruir el tejido. Mide la cantidad de luz roja (longitud de onda de 650 nm) y infraroja cercana (700-1400 nm) que es transmitida por la hoja. La cantidad de luz roja absorbida indica la concentración de clorofila y la cantidad de luz infraroja cercana absorbida sirve de referencia interna para compensar el grosor y la humedad de la hoja (Schröder, 2000). Las lecturas SPAD no son buenas predictoras del exceso de N porque, cuando la disponibilidad de N es alta, no todo el N se convierte en clorofila (Varvel *et al.*, 1997b). Por ello, a partir de determinada concentración de clorofila, la lectura no aumenta y, en consecuencia, no permite identificar el consumo "de lujo" que puede

hacer el cultivo. En cambio lecturas inferiores permiten detectar deficiencias (Blackmer y Schepers, 1994) y, si es posible, corregirlas.

Las medidas SPAD pueden realizarse entre el estadio V6-V8 y R2 y la lectura crítica que separa la posibilidad de respuesta (déficit de N) de la no-respuesta (exceso de N) depende del estadio fenológico del cultivo. En V6 el valor crítico por debajo del cual habrá carencia de N es de 43 unidades SPAD (Piekielek y Fox, 1992) y en R2 (1/4 grano lechoso) de 52 unidades SPAD (Piekielek, 1995). Lecturas en V6 permiten ajustar las cantidades de fertilizante a aportar en cobertera (Piekielek y Fox, 1992) a partir, por ejemplo, de rectas de regresión como la que propone que Scharf (2001) para las condiciones de Missouri (USA) (Capítulo III, Figura III.1). En cambio, mediciones de SPAD al final de la fase de crecimiento son adecuadas para determinar si el N aportado ha sido suficiente para unos rendimientos óptimos y ayudan a la planificación de la fertilización en la campaña siguiente.

Otro de los métodos empleados para ajustar la dosis de N es el análisis de la concentración de nitratos en la base del tallo, que se basa en la capacidad que tienen las plantas con deficiencias en N de translocar el NO_3^- de la parte inferior del tallo durante el llenado de grano. Mientras, las plantas que disponen de un exceso de N no precisan hacerlo en tanta proporción. En consecuencia, se observa una acumulación de nitratos en la base del tallo (Binford *et al.*, 1990). Los resultados del análisis permiten reconocer, al final del ciclo de cultivo, aquellas parcelas que han recibido una dosis de fertilizante insuficiente, suficiente o excesiva y, en consecuencia, sujeta a lixiviaciones (Blackmer y Schepers, 1994). Este método permite principalmente actuaciones a posteriori, en previsión de estas pérdidas y de planificación en la campaña siguiente. La relación entre rendimiento y nitratos del tallo presenta un cambio brusco entre concentraciones óptimas y concentraciones deficitarias (Figura I.4).

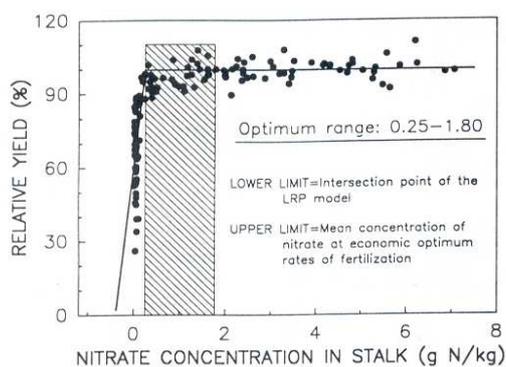


Figura I.4. Rango de concentración óptima en el test de determinación de nitratos en la base del tallo (Binford, *et al.*, 1990)

1.2. Antecedentes en la zona

El presente estudio se caracteriza por evaluar el efecto del abonado nitrogenado en el maíz durante tres campañas consecutivas en la misma parcela. La zona de ensayo fue catalogada como Zona Vulnerable justo después de acabar los ensayos, demostrando que ya se trataba de una zona con problemas de acumulación de nitratos. Se trata de unos suelos profundos y regados por gravedad, con riegos por turnos. Después del cultivo, se reincorporaba la paja al suelo pero, en cambio, no había aportación directa de purines. Finalmente conviene concretar que los rendimientos medios de grano de maíz en la zona han aumentado considerablemente estos últimos años. Serra (2007) indica rendimientos medios comerciales de 8.500-9.000 kg ha⁻¹ en 1994-95 y del orden de 11.000 kg ha⁻¹ en 2005.

Estas características hacen que este estudio tenga unas particularidades diferenciales de otros que se hayan podido llevar a cabo en zonas próximas. Villar *et al.* (2000), Villar *et al.* (2002) y Ferrer *et al.* (2003) realizaron una serie de ensayos, también en el perímetro regado por el Canal d'Urgell, por gravedad y a turnos, con la misma variedad de maíz que la utilizada en nuestro caso. Durante dos años seguidos, Villar *et al.* (2002) hicieron el seguimiento de 10 parcelas comerciales del nivel de NO₃⁻-N en el suelo, de las extracciones del cultivo y del rendimiento en grano. Al tratarse de parcelas comerciales, la dosis de N aportada era la habitual por parte del agricultor (250-340 kg ha⁻¹) y no se ensayaron dosis distintas de fertilizante. En otro ensayo, Villar *et al.* (2000) evaluaron el efecto de seis dosis de N y el momento de aplicación sobre la producción de maíz y utilizaron el contenido en NO₃⁻-N en el suelo y el contenido en NO₃⁻ en la base del tallo como métodos de diagnóstico. Sus resultados publicados, sin embargo se refieren sólo a las observaciones realizadas durante un solo año, con una disponibilidad de agua particular ya que fue particularmente reducida. Finalmente Ferrer *et al.* (2003) evaluaron durante dos años seguidos el efecto de cuatro dosis de N (0,100, 200, 300 kg ha⁻¹), con el objetivo de determinar si el PSNT es un indicador fiable para las condiciones del Canal d'Urgell.

Unos años más tarde, Berenguer *et al.* (2006) iniciaron en la zona regada por el Canal de Aragón y Catalunya, una serie de ensayos de monocultivo de maíz en la misma parcela. Los suelos en los que se realizaron, situados sobre una terraza alta, son poco profundos, pedregosos y de drenaje rápido. El riego es por aspersión y por consiguiente, muy diferente respecto al comportamiento de los nitratos y su lixiviación. No se reincorporó la paja al suelo después de la cosecha, se ensayaron dosis de fertilizante nitrogenado más

fraccionadas junto con dosis de purines. Además, la variedad ensayada era de mayor potencial productivo.

También en el Valle del Ebro, cerca de Zaragoza, Daudén y Quilez (2004) compararon el efecto de tres dosis distintas de purines con un fertilizante mineral e hicieron el seguimiento del cultivo, del rendimiento en grano y de la cantidad de nitratos lixiviados durante tres años consecutivos. Los ensayos se realizaron en suelos de textura franco-acillo-limosa, parecidos a los del presente estudio y se regaron por gravedad. Sin embargo, el tratamiento control consistió en aportaciones de 275 kg N ha⁻¹ que equivaldrían a las dosis superiores del presente estudio.

En los regadíos de las Bardenas aragonesas (Zaragoza), Causapé *et al.* (2004) midieron, entre otros, el contenido de nitratos en los drenajes y los asociaron a las características de los suelos de las cuencas, al cultivo, a la fertilización nitrogenada y a la eficiencia del riego.

Se puede observar pues que los resultados publicados sobre el efecto del N en el maíz en el Valle del Ebro son bastante reducidos, a pesar del interés del cultivo y de la problemática de los nitratos en la zona.

1.3. Objetivos

El principal objetivo de este primer capítulo es estudiar, durante tres años consecutivos y en la misma parcela, el efecto de cuatro dosis de fertilizante nitrogenado mineral en un cultivo de maíz en los regadíos del Canal d'Ugell (Lleida). En particular se pretende:

- Estudiar el efecto del abonado N en la producción de maíz, su contenido en N y en otros parámetros fisiológicos y morfológicos de la planta.
- Estudiar el efecto del abonado N en el suelo (0-120 cm) y su comportamiento a lo largo del ciclo productivo y durante un monocultivo de tres años.
- Evaluar estrategias y herramientas que permitan mejorar la eficiencia del N en el cultivo del maíz en condiciones de clima mediterráneo propios de los regadíos del Valle medio del Ebro.

2. Materiales y métodos

2.1. Condiciones experimentales

2.1.1. Localización del ensayo

La fase experimental de este estudio se realizó los años 1994, 1995 y 1996 en una parcela comercial, parte de la finca experimental del centro Universitat de Lleida (UdL) - IRTA, en el término municipal de Torregrossa, a 25 km al este de Lleida, cuyas coordenadas UTM son X: 320.005m e Y: 4.605.548m (41°34'51"N y 0°50'27"E) y a 231 m de altitud. La parcela, de un total de 1,7 ha de superficie, se encuentra en el área regada por el Canal d'Urgell. El año anterior al estudio se había cultivado cebada con unos rendimientos habituales en la zona.

2.1.2. Caracterización edafoclimática

Según el Mapa de Sòls de Catalunya (Boixadera y Herrero, 1990) los suelos de la parcela se definen como Xerofluvent típico de textura limosa gruesa, mezclada (calcárea), méstica (SSS, 1975, 1990) pertenecientes a la serie Comellas. Son suelos muy profundos, bien drenados y de textura media, con pocos elementos gruesos. Se han desarrollado en fondos o en pie de laderas de pendientes suaves (0-5%), sobre materiales detríticos terrígenos finos. El horizonte superficial es de textura franca y los horizontes subsuperficiales permiten el enraizamiento hasta una profundidad superior a los 120 cm. Su conductividad hidráulica es moderada, al igual que su capacidad de retención de agua disponible. Se trata de suelos adecuados para el riego superficial. Aunque sean suelos bien drenados, pueden sufrir encharcamientos temporales cuando se riegan si no se maneja el agua adecuadamente (Herrero *et al.*, 1993).

Con objeto de caracterizar más concretamente las condiciones del ensayo, antes de iniciar la experimentación se analizó el suelo de los distintos bloques experimentales en las profundidades comprendidas entre 0-30 cm y 30-60 cm. Antes de la siembra del primer año, la parcela de estudio presentaba las siguientes características fisicoquímicas (Tabla I.1).

Tabla I.1. Características fisicoquímicas del medio edáfico de la parcela al iniciar los ensayos (1994)

Bloque experimental	I		II		III		IV	
	Profundidad (cm)							
Determinación	0-30	30-60	0-30	30-60	0-30	30-60	0-30	30-60
pH (1:2.5)	8.6	8.6	8.4	8.4	8.3	8.3	8.4	8.4
Cond.eléctrica 25 °C ext.1:5 (dS/m)	0.19	0.21	0.23	0.25	0.33	0.41	0.23	0.26
Materia orgánica oxidable (%)	0.9	0.3	1.2	0.7	1.0	0.6	1.0	0.7
Carbonato cálcico equiv. (%)	32	40	23	23	28	35	25	28
Fósforo (P) asim. Olsen (ppm)	21	7	14	9	11	8	10	7
Potasio (K) (ex.NH ₄ AcO) (ppm)	150	57	182	151	131	71	185	129
Magnesio (Mg) (ex.NH ₄ AcO) (ppm)	326	338	521	528	451	373	550	497
Clase textural USDA	Franca	Franca	Franco arcill.	Franco -limosa	Franca	Franca	Franco -limosa	Franco -arcill.
CRAD (%peso)	10	13	12	11	11	10	11	11

Se trata de suelos con un pH entre moderadamente básico y ligeramente alcalino, no salinos, muy calcáreos y con un porcentaje de materia orgánica entre bajo (en los horizontes superficiales) y muy bajo (a mayor profundidad). El contenido inicial en fósforo y potasio es bajo mientras que el de magnesio es muy elevado. La textura es media o moderadamente fina.

El clima de la zona de estudio es típicamente mediterráneo, semiárido y continental. Se caracteriza por sus veranos cálidos y sus inviernos fríos. La pluviometría anual es baja y se concentra en los meses de otoño y primavera. El diagrama ombrotérmico (Figura I.5) muestra que el periodo seco se sitúa entre los meses de junio y septiembre. Según la clasificación agroclimática de Papadakis, se trata de un clima Mediterráneo Continental Templado, con inviernos de tipo "Avena fresco", veranos de tipo "Arroz" y un régimen de humedad "Mediterráneo seco", que cumple con los requisitos necesarios para el cultivo del maíz, siempre que sea en condiciones de regadío (de León, 1989).

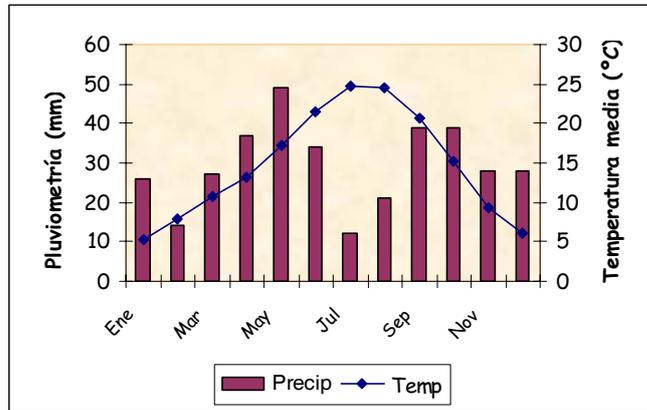


Figura I.5. Diagrama ombrotérmico. Estación de Lleida. (INM. 1971-2000)

La Figura I.6 muestra la evolución de las temperaturas medias durante los tres años de cultivo de maíz y permite comparar estos datos con las temperaturas medias de la serie de treinta años en la localidad del ensayo.

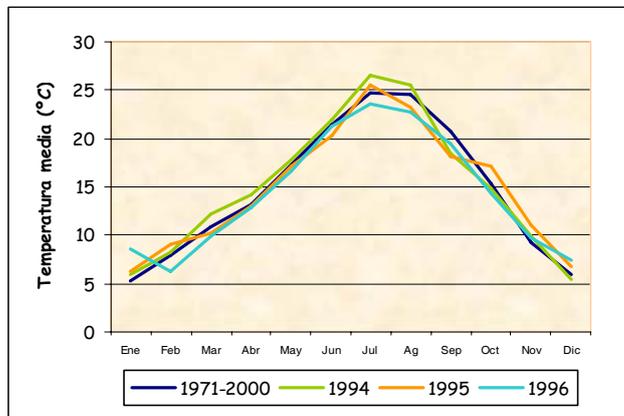


Figura I.6. Temperaturas medias durante los años de cultivo del maíz (Estación de Juneda. Xarxa Agrometeorològica de Catalunya) y serie plurianual 1971-2000 (Estación de Lleida. Instituto Nacional de Meteorología)

Las temperaturas medias durante los años de cultivo siguieron un patrón similar a las de los años medios. El primer año resultó ser más cálido, sobre todo los meses de primavera

y verano. Durante el verano del tercer año, en cambio, se registraron temperaturas ligeramente inferiores a las habituales.

Las temperaturas medias de las máximas y medias de las mínimas del periodo 1971-2000 presentan una evolución similar a las temperaturas medias a lo largo de todo el año: las máximas son unos 4°C superiores a las medias en invierno y unos 7,5°C en verano mientras que las mínimas son unos 4°C inferiores en los meses más fríos y unos 7,5°C en los más cálidos.

En la Tabla I.2. se presenta la pluviometría registrada durante los tres años de cultivo y permite comparar estos valores con la media caída en los treinta años.

Tabla I.2. Condiciones pluviométricas durante los años de ensayo (Estación de Juneda. Zarza agrometeorológica de Catalunya) **y serie plurianual 1971-2000** (Estación de Lleida. Instituto Nacional de Meteorología)

	Pluviometría media mensual (mm)			
	1994	1995	1996	Serie plurianual
Enero	9.2	4.6	93.8	26
Febrero	14.6	4.0	5.8	14
Marzo	1.4	0.2	12.4	27
Abril	0.6	19.0	39.6	37
Mayo	27.7	12.2	29.0	49
Junio	1.6	9.0	62.4	34
Julio	6.6	0.0	7.0	12
Agosto	0.8	10.4	14.8	21
Septiembre	76.2	39.6	13.8	39
Octubre	111.2	3.2	43.2	39
Noviembre	4.6	11.4	80.8	28
Diciembre	4.6	73.8	91.0	28
Total anual	259.1	187.4	493.6	354
Total durante el cultivo	113.5	90.2	166.6	192
Período intercultivo (octubre-abril)		129.2	200.4	162

Se puede observar la irregularidad de la pluviometría, tanto a nivel total anual como por meses. La pluviometría del segundo año fue particularmente reducida y la del tercero elevada. Este hecho puede repercutir en una disponibilidad de agua para el cultivo

variable, aunque las diferencias se puedan subsanar con el riego. Conviene también destacar que en el período intercultural, la pluviometría varió notablemente a lo largo de los años de ensayo. Se registraron tormentas particularmente importantes, propias de un clima mediterráneo, generalmente entre los meses de septiembre y noviembre. Durante estos meses no hay aportación de agua mediante riego y la pluviometría, más o menos importante, puede producir un lavado mayor o menor de los nitratos del suelo.

2.1.3. Técnicas de cultivo

Los tres años que duró el experimento se sembró maíz (*Zea mays* L.) del cultivar "Juanita" (Pioneer Hi-Bred S.L.), híbrido simple ampliamente utilizado por los agricultores de la zona, que presenta un ciclo FAO 700.

El ensayo se sembró con una sembradora comercial neumática los días 14 de abril de 1994, 18 de abril de 1995 y 26 de abril de 1996. La densidad de siembra fue de 75.000 plantas ha⁻¹ (habitual en la zona) a 4-5 cm de profundidad y con un espacio entre líneas de 0,75 m. Se cosechó el 3 de octubre de 1994, el 28 de septiembre de 1995 y 23 de octubre en 1996.

La preparación del terreno fue la misma cada año y similar a la que practican los agricultores de la zona. Al final de cada campaña, el resto de plantas sin mazorca (stover o "cañota"), debidamente picada, era incorporado al suelo mediante un laboreo profundo con grada. Posteriormente se realizaba un laboreo superficial, mediante rotovator, para preparar el lecho de siembra.

El cultivo se regó con agua del Canal d'Urgell, por gravedad y a turnos de aproximadamente cada 11-13 días. Tanto las fechas como las dosis variaban según la disponibilidad de agua de cada momento o de cada año y eran determinadas por los Servicios Técnicos de la Casa Canal o, en cierta medida, por el encargado de la finca. El volumen de agua aportado no se midió explícitamente. El primer año se realizaron 7 riegos, el segundo 9 riegos y el tercero 10 riegos, y las aportaciones se evaluaron en 6.500 m³ ha⁻¹ cultivo⁻¹ en 1994, 7.000 m³ ha⁻¹ cultivo⁻¹ en 1995 y 8.000 m³ ha⁻¹ cultivo⁻¹ en 1996 (estimadas a partir de los 7-8.000 m³ ha⁻¹ cultivo⁻¹ habituales).

El abonado nitrogenado se aportó en forma de Nitrato Amónico del 33,5%N. El 50% de cada una de las dosis ensayadas se incorporó al suelo en el momento de la siembra y el 50% restante cuando las plantas tenían 40-50 cm de altura o alrededor de 6 hojas

(estadio V6), los días 14 de junio el primer año, 13 de junio el segundo año y 3 de junio el tercero.

Además del abonado nitrogenado propio de cada tratamiento se aportaron, como abonado de fondo, 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y de K₂O el primer año y 200 kg ha⁻¹ los dos años siguientes.

El resto de prácticas culturales fue el propio de una explotación comercial de la zona. Se aplicó localmente Carbofurano-5% y Diflubenzuron-25% (300 g m.a. ha⁻¹) para prevenir los posibles ataques de *Agrotis lineatus*, de *Agrotis segetum* y de *Ostrinia nubilalis* y *Sesamia Nonagroides*, respectivamente. Las malas hierbas se controlaron mediante aplicación, en preemergencia, de una mezcla de Alacloro-35% y Atrazina-20% (6L ha⁻¹). Además, durante el ciclo del cultivo se realizaron, puntualmente, escardas manuales para el control de malas hierbas entre líneas.

2.1.4. Diseño experimental

Se ensayaron cuatro dosis de abonado nitrogenado: 0 (testigo), 100, 200, 300 kg N ha⁻¹. El valor máximo ensayado se definió por ser una dosis habitual o incluso superada por los agricultores de la zona (Badía, 1995; Montori, 1995; Sisquella *et al.*, 2004); el resto de valores, intermedios entre este máximo y el testigo, venía indicado por las posibilidades materiales del ensayo.

Este estudio es parte de un proyecto de investigación, titulado "*Rotaciones sostenibles en sistemas de regadío del Valle del Ebro (CICYT-AGF-93-0330-CO201)*", uno de cuyos objetivos era la *Cuantificación del efecto de la alfalfa en la producción y calidad del maíz en una rotación alfalfa-maíz*.

El diseño experimental del proyecto es de parcelas subdivididas donde la parcela principal es la rotación (alfalfa-maíz/maíz en monocultivo) y la subparcela, la dosis de fertilizante nitrogenado en el maíz, con cuatro repeticiones.

Este capítulo se centra en el análisis del monocultivo de maíz durante los tres años consecutivos. El diseño estadístico de esta parte del ensayo es de bloques al azar, repitiendo los tratamientos de abonado nitrogenado del maíz en las mismas parcelas durante los tres años de estudio, con el fin de estudiar al mismo tiempo la posible acumulación de efectos.

Durante los tres años, bloques y parcelas coincidían exactamente con los bloques y parcelas del año anterior y el tratamiento (dosis de fertilizante nitrogenado) era el mismo cada año en todas las parcelas. Durante los tres años del estudio, el diseño experimental fue en bloques al azar con cuatro repeticiones, con un factor único, **la dosis de fertilizante**, y los cuatro tratamientos anteriormente citados: 0, 100, 200, 300 kg N ha⁻¹.

En la Figura I.7. se representa esquemáticamente la distribución de los bloques y parcelas experimentales de los tres años consecutivos (Figuras I.8). Las parcelas elementales tenían una superficie de 54 m²: 6 m (8 filas) de ancho por 9 m de largo. Este tamaño permitía destinar una superficie de 18 m² a la cosecha y contar con las suficientes líneas para garantizar que muestreos de biomasa y cosecha no se vieran condicionados por el efecto borde. Dado que entre cada parcela se dejaba un pasillo de 1 m, cada bloque ocupaba 234 m².



Figuras I.8. Vistas del ensayo en primavera y poco antes de la cosecha. Se aprecian las 4 repeticiones, el maíz y la alfalfa. Torregrossa, 1994 y 1995.

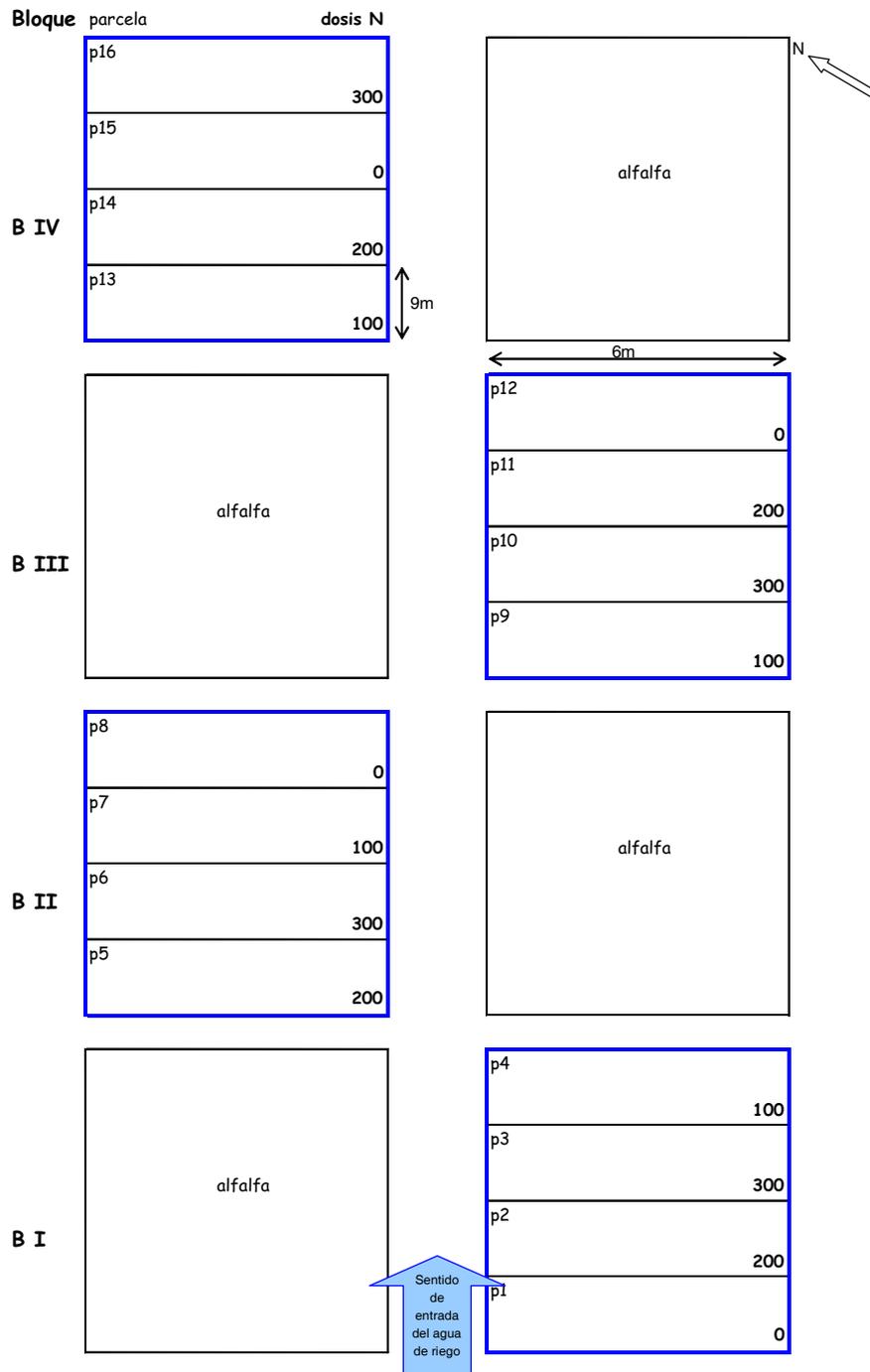


Figura I.7. Distribución de las parcelas (p) en el ensayo. Torregrossa, 1996.

2.2. Métodos, técnicas y medidas realizadas

2.2.1. Contenido en nitratos en el suelo y su evolución

La metodología para la determinación de los nitratos del suelo fue la misma durante los tres años de ensayo. Se tomaron muestras de cada parcela en tres momentos del ciclo de cultivo:

- antes de la siembra y del abonado de fondo
- antes de la aplicación del abonado de cobertera
- después de la cosecha

Tabla I.3. Fechas de toma de las muestras de suelo, de aplicación del abonado nitrogenado, de siembra y de cosecha.

	1994	1995	1996
1º muestreo de suelo	15 IV	5 IV	15 IV
Abonado de fondo	15 IV	5 IV	15 IV
Siembra	14 IV	18 IV	26 IV
2º muestreo de suelo	2 VI	26 V	3 VI
Abonado de cobertera	14 VI	13 VI	3 VI
3º muestreo de suelo	28 IX	22 IX	25 X
Cosecha	3 X	28 IX	23 X

La Tabla I.3. presenta los días de muestreo de suelo y su relación con las fechas de siembra y cosecha y de aplicación de abonado nitrogenado.

Se tomaron muestras de suelo a cuatro profundidades: 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm salvo en el muestro previo al abonado de cobertera en que, siguiendo la metodología Pre-sidedress Soil Nitrate Test (PSNT), únicamente se muestreó de 0 a 30 cm (Blackmer y Schepers, 1994).

En cada parcela las muestras de 0-30 cm estaban compuestas de 10-12 submuestras cogidas con una barrena especial para horizontes superficiales de 25 cm de largo y 13 mm de diámetro (Gauge auger for top layers 040601, Eijkelkamp, Giesbeek, The Netherlands). En las demás profundidades las muestras se obtenían mediante dos submuestras por parcela y mezclando el contenido de la barrena (Edelman auger, Eijkelkamp, Giesbeek, The Netherlands) como indica Onken (1985). Estas muestras eran llevadas inmediatamente al Laboratori d'Anàlisi i Fertilitat de Sòls (LAF). Allí se determinaría la humedad y se analizaría el contenido en nitratos siguiendo la metodología

de Bremner (1965), a partir de una extracción 1:1 con agua y por colorimetría con un autoanalizador de flujo continuo (Anasol 4P2S1BM2P, ICA, Carcassone, France) debidamente calibrado. El contenido de nitratos se facilitaba expresado en kg ha^{-1} considerando un grosor de 30 cm y una densidad de suelo de 1.3 Tm m^{-3} según la siguiente fórmula:

$$\text{NO}_3^- (\text{kg ha}^{-1}) = (100 + 2H) * 0.039 * L$$

donde:

H: Humedad referida a peso de suelo seco (%)

L: lectura NO_3^- (ppm o mg L^{-1})

Posteriormente se convirtieron los valores obtenidos a contenido de nitrógeno nítrico utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{NO}_3\text{-N} (\text{kg ha}^{-1}) = \text{NO}_3^- (\text{kg ha}^{-1}) * 0.2258$$

El contenido de $\text{NO}_3\text{-N}$ de las muestras de suelo (0-30 cm) tomadas antes del abonado de cobertera se expresaron simultáneamente en $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$, para poder comparar los resultados con los de siembra y cosecha, y en $\text{mg NO}_3\text{-N kg}^{-1}$ de suelo, para poder interpretar los valores obtenidos y comparar-los con los valores críticos de PSNT propuestos por Magdoff (1990), Blackmer *et al.* (1993), Villar *et al.* (2000), Andrasky y Bundy (2002) y Ferrer *et al.* (2003).

2.2.2. Otras determinaciones en el suelo

Además del seguimiento directo del contenido de nitratos en el suelo, se determinó la evolución del contenido de materia orgánica de su horizonte superficial. Al contenido inicial citado anteriormente (apartado II.1.1.2) se añadió la determinación del contenido en materia orgánica oxidable por espectrofotometría (Walkey-Black) (702SM Titrimetro Metrohm Ion analysis, Metrohm Headquarters, Herisau, Switzerland) en todas las parcelas en el momento de la siembra del tercer año del ensayo.

Se determinó el Índice de Riesgo de Formación de Costra (IRFC) siguiendo la metodología propuesta por Saña *et al.* (1996) a partir de la que citan Rémy y Marin-Lafèche (1974), Colomb (1982) y Quéméner (1985):

$$\text{IRFC} = ((1,5 * \% \text{ Limo fino} + 0,75 * \% \text{ Limo grueso}) * (\% \text{ Arcilla} + 10 \% * \text{Materia Orgánica})^1) - C$$

donde:

Limo fino: (2-20 μm)

Limo grueso: (20-50 μm)

C = 0 si pH (1/2,5) = <7

C = 0,2 * (pH -7) si pH (1/2,5) >7

La interpretación de los resultados se hizo gracias al cuadro de Soltner (1990) que proponen Saña *et al.* (1996).

2.2.3. Contenido de nitratos en el agua de riego y en la solución del suelo

La parcela de ensayo está situada en el área regada por el Canal d'Urgell. El agua utilizada para regar la parcela no proviene directamente del Canal Principal o del Canal Auxiliar sino desde la acequia "Lo Reguer" que se ha formado en lo que antiguamente era un drenaje natural. Esto quiere decir que se regaba con lo que se llaman "aguas vivas" y, por ello, se decidió medir el contenido en nitratos del agua de cada riego tomando una muestra en el punto de entrada del agua en la parcela y determinando la riqueza mediante un reflectómetro portátil de campo Nitracheck® (Eijkelkamp, Giesbeek, The Netherlands). Con estas determinaciones se evaluó la aportación en nitrógeno nítrico que se hacía al cultivo a través del agua de riego (en kg N-NO₃⁻ ha⁻¹) a partir de la media de las lecturas obtenidas y la estimación de la cantidad total de agua aportada por el riego a lo largo de todo el ciclo de cultivo.

A partir del segundo año se instaló en cada parcela experimental una sonda de succión de 10 cm de diámetro y 120 cm de profundidad para poder evaluar el contenido en nitratos de la solución del suelo después de cada riego. Antes de cada riego se extraía el aire mediante una bomba, provocando de esta manera el vacío en el interior del tubo. Cuarenta y ocho horas después del riego se succionaba el líquido que podía haber entrado en esta sonda de succión. La concentración en nitratos de esta solución se medía en campo con un Nitracheck®.

El tercer año, por cuestiones materiales y por las razones expuestas en el Capítulo III, estas sondas de succión únicamente se instalaron en cada uno de los tratamientos de dos repeticiones (I y IV).

2.2.4. Desarrollo y crecimiento de la planta

La biomasa se determinó en dos momentos críticos del ciclo del cultivo: en estado floración y en madurez fisiológica. Para ello se cortaron al nivel del suelo las plantas de 2 metros lineales de una de las hileras centrales de cada parcela. Se contó el número de plantas que constituían esta muestra y se pesó en fresco, en campo. Posteriormente se cogieron aleatoriamente 4 plantas de esta muestra y, en el laboratorio, se trocearon y se secaron en una estufa a 70°C hasta peso constante. Los resultados se expresaron en Mg ha⁻¹.

Se midió la altura (en cm) de la planta desde el suelo hasta el punto de inserción de la última hoja. Se midieron 6 plantas por parcela escogidas al azar en las líneas centrales de la parcela en el momento de máxima altura, en floración.

2.2.5. Índice de área foliar y Radiación interceptada

El Índice de Área Foliar (LAI) se evaluó en floración, momento de máximo desarrollo foliar. Se utilizaron las 4 plantas seleccionadas anteriormente para la determinación de la biomasa y, antes de trocearlas, se separaron todas las hojas verdes y se determinó su superficie total con un planímetro electrónico (AT, Delta-T Devices LTD, Cambridge, UK). Conociendo el número de plantas en dos metros lineales y la distancia entre líneas, se calculó la superficie foliar por unidad de superficie de suelo (en m² m⁻²).

El segundo y tercer año se midió la interceptación de la radiación fotosintética activa (PARI) por la cubierta vegetal en floración mediante un ceptómetro (Accupar, Decagon, Pullman, USA). Para medir la radiación incidente bajo el cultivo se efectuaron de 10-15 lecturas al nivel del suelo en las filas centrales de cada parcela. La lectura de referencia se hizo al principio, en medio y al final de la toma de datos. Las lecturas se realizaron a las 12h±1h (horario solar) en días claros y los resultados se expresaron en tanto por ciento.

2.2.6. Componentes del rendimiento, rendimiento e índice de cosecha

Para determinar la densidad de siembra se contaron el número de plantas en las tres filas centrales de cada parcela. Teniendo en cuenta la distancia entre las filas se pudo extrapolar al número de plantas ha⁻¹. Para la determinación de los otros componentes del rendimiento se seleccionaron 8 mazorcas por parcela y se contaron el número de filas y el número de granos por fila de cada una de estas mazorcas. Finalmente, se desgranaron

estas mazorcas y se determinó el peso de 1000 granos (en g) con un contador de semillas (Numigral, GTEP, Villeneuve la Garenne, France) calibrado para maíz.

La producción de grano se determinó mediante una cosechadora de microparcels para ensayos de 1,5 m de ancho (Hege Nurserymaster Elite plot combine, Wintersteiger, Ried, Austria) adaptada para el maíz, cosechando las tres líneas centrales de cada parcela. Para evitar el efecto borde, se descartaba 0,5 m de los extremos de cada línea, obteniendo así una superficie de cosecha de 18 m² por parcela. El rendimiento en grano a una humedad del 14 % se determinó a partir de la humedad de la muestra (apartado 2.2.8) y se expresó en Mg ha⁻¹.

El índice de cosecha se determinó dividiendo la producción de grano por la biomasa acumulada en madurez fisiológica (apartado 2.2.4).

2.2.7. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en la planta

Los análisis de tejido vegetal son a menudo utilizados como un diagnóstico de la fertilización, basándose en que la concentración de nutrientes en los tejidos de la planta está relacionada con un contenido suficiente para el crecimiento de la planta. De los numerosos métodos para determinar el contenido en nitratos en la planta, en este estudio se utilizaron los siguientes: evaluación del contenido de clorofila en la hoja en floración, análisis de la base del tallo al final del cultivo, análisis del contenido en N de la planta entera en madurez fisiológica.

La riqueza en clorofila se evaluó de forma indirecta y no destructiva el segundo y tercer año usando un medidor de clorofila (SPAD-502, Minolta Camera Co., Tokio, Japan), aparato que mide la concentración relativa de clorofila mediante la luz de longitud de onda fotosintéticamente activa transmitida a través de la hoja. Las lecturas se tomaron en la emergencia de las sedas (R1) en 10 plantas al azar de las 3 líneas centrales de cada parcela, en la hoja que envuelve la mazorca, a un tercio de la base y a medio camino entre la nerviación central y el borde de la hoja, evitando daños por insectos o enfermedades, siguiendo las recomendaciones de Shepers (1992) y Binder *et al.* (2000).

Para el análisis de nitratos en la base del tallo en madurez fisiológica de la planta, se muestrearon 10 plantas de cada parcela. Los segmentos de tallo comprendidos entre los 15 y los 35 cm desde la base se cortaron en campo, se secaron en estufa, se trituraron con un molino de café y se tamizaron finamente. Posteriormente se enviaron al LAF que determinó el contenido en nitratos a partir de una extracción en agua 1:1 por

colorimetría con un autoanizador de flujo continuo (Anasol 4P2S1BM2P, ICA, France) debidamente calibrado. Los resultados se expresaron en g kg^{-1} .

También se determinó el contenido en N de la parte de la planta sin mazorca (stover o "canyote") a partir de las muestras recolectadas en madurez fisiológica (apartado 2.2.4), secas, a las que se había eliminado las mazorcas. Se molió la muestra primero con un molturador de forrajes y posteriormente con un molino de café, se tamizó finamente con un cedazo de 1 mm y se determinó el contenido en N siguiendo la metodología Kjeldahl. Digestión y valoración se realizaron en un Kjeltec (Auto 1030 Analyzer Tecator, Perstop Analytical Co. Ltd., Thornbury, UK) en el laboratorio del centro UdL-IRTA. Los resultados obtenidos se expresaron en g N kg^{-1} de paja o planta sin mazorca.

2.2.8. Calidad de grano

En el momento de la cosecha se guardó una muestra de 1kg de grano por parcela para la evaluación de su calidad.

La determinación del peso hectolítrico y la humedad de la muestra se hizo simultáneamente mediante un equipo (GACII, Dickey-John, Auburn, III, USA) siguiendo la metodología habitual. Las lecturas se tomaron directamente en kg HI^{-1} o se transformaron a g kg^{-1} respectivamente.

El contenido en Nitrógeno del grano se determinó, como para la planta sin mazorca, siguiendo el método Kjeldahl, a partir de las muestras de grano previamente molidas finamente. Los resultados obtenidos se expresaron en g N kg^{-1} de grano seco.

2.2.9. Extracciones, balance y eficiencia del Nitrógeno

Las extracciones de N del grano se calcularon a partir del rendimiento, al 14% de humedad (apartado 2.2.6) y la riqueza en N del grano (apartado 2.2.8). De forma similar, las extracciones de N de la planta sin mazorca se calcularon a partir de la cantidad de planta sin mazorca producida en madurez fisiológica (apartado 2.2.4) y su riqueza en N (apartado 2.2.7). Se despreciaron el zuro y el sistema radicular. Las extracciones totales se obtuvieron de la suma de las extracciones del grano y de la paja.

El balance de N se calculó a nivel de parcela basándose en la aplicación de la ecuación general de conservación de la masa en los sistemas de cultivo (Meisinguer y Randall, 1991):

$$\Delta \text{NMIN (kg N ha}^{-1}\text{)} = \text{N}_{\text{entradas}} \text{(kg N ha}^{-1}\text{)} - \text{N}_{\text{salidas}} \text{(kg N ha}^{-1}\text{)}$$

donde:

Δ NMIN: variación del contenido en N mineral en el perfil del suelo (0-120 cm)

$\text{N}_{\text{entradas}} = \text{N}_{\text{ini}} + \text{N}_f + \text{N}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{N}_{\text{mzdo}}$

$\text{N}_{\text{salidas}} = \text{N}_p + \text{N}_{\text{fin}}$

- y:
- N_{ini} : Nitrógeno mineral en el perfil del suelo (0-120 cm) en el momento de la siembra (kg N ha⁻¹)
 - N_f : Nitrógeno mineral aportado por el fertilizante en cada tratamiento (kg N ha⁻¹)
 - $\text{N}_{\text{H}_2\text{O}}$: Nitrógeno aportado con el agua de riego (kg N ha⁻¹)
 - N_{mzdo} : Nitrógeno mineral aportado al sistema a partir de la mineralización de la materia orgánica presente en el perfil del suelo durante el cultivo (kg N ha⁻¹)
 - N_p : Nitrógeno extraído por el cultivo en recolección (kg N ha⁻¹)
 - N_{fin} : Nitrógeno mineral en el perfil del suelo (0-120 cm) en el momento de la cosecha (kg N ha⁻¹)

El valor de $\text{N}_{\text{H}_2\text{O}}$ se estimó a partir de la media de la concentración en nitratos del agua de riego y de la dosis media de riego durante el ciclo de cultivo (apartado 1.2.3).

El valor de N_{mzdo} se estimó aplicando la ecuación anterior al tratamiento sin fertilizar (0 kg N ha⁻¹). Al no haber aportes de fertilizante, se consideraron despreciables las pérdidas por lixiviación en estas parcelas y se supuso que las salidas procedían de una mineralización neta positiva del N orgánico del suelo (Meisinger y Randall, 1991; Sexton *et al.*, 1996; Arregui, 2006). Puesto que la mineralización de la materia orgánica viene condicionada por la climatología, las características del suelo y su contenido inicial en materia orgánica y el tipo de materia orgánica incorporada al suelo, se consideró que alcanzaría valores similares en todos los tratamientos.

Como valor de N_p se tuvieron en cuenta las extracciones de N totales de la parte aérea del cultivo. Dado que se reincorporaba la paja al suelo, se tuvieron también en cuenta, en un cálculo paralelo, únicamente las extracciones de N del grano y se utilizaron para al cálculo de un balance "real", en el que no se tuvieron en cuenta las extracciones de N de la parte de planta sin mazorca (stover). Esta parte de N no estaba disponible inmediatamente y aportaba N al sistema durante la mineralización que se alargaba los meses siguientes a la cosecha. Por esto se mantuvo el valor de N_{mzdo} del balance convencional y no se igualó a cero. El aumento de N debido a la mineralización de la materia orgánica enterrada vendría reflejado en el balance del año siguiente.

En la ecuación utilizada, no se tuvieron en cuenta las pérdidas por desnitrificación y volatilización. Al tratarse de un ensayo de fertilización regado por gravedad, se supuso que estas pérdidas fueron muy inferiores a las pérdidas por lixiviación, y por ello se consideraron despreciables. El segundo y tercer año, al haber instalado sondas de succión en las parcelas, se pudo apreciar la riqueza en NO_3^- de la solución del suelo pero no las pérdidas por lixiviación ya que se desconocía el volumen de agua drenada. Tampoco se consideró el NH_4^+ -N debido a su relativa estabilidad durante el cultivo (Liu *et al.*, 2003).

Para evaluar la **eficiencia del N**, se calcularon los siguientes parámetros (Huggins y Pan, 1993):

Eficiencia en el uso del N disponible:

$$\text{EU } N_{\text{disp}} = \text{Rnto (kg ha}^{-1}\text{)} * N_{\text{disp}} \text{(kg N ha}^{-1}\text{)}^{-1}$$

donde:

$\text{EU } N_{\text{disp}}$: Eficiencia en el uso del N disponible (rendimiento en grano obtenido por unidad de N disponible)

Rnto: Rendimiento en grano 14% de humedad (kg ha^{-1})

N_{disp} : N disponible para la planta

$N_{\text{disp}} = N_p + N_{\text{fin}}$

y: N_p : N extraído por el cultivo en recolección (kg N ha^{-1})

N_{fin} : N mineral en el perfil del suelo (0-120 cm) en el momento de la cosecha (kg N ha^{-1})

Fracción de N recuperada o **Eficiencia en el Uso del Fertilizante Nitrogenado**:

$$\text{EUN} = (N_{\text{pj}} - N_{\text{p0}}) * N_{\text{fj}}^{-1}$$

donde:

N_{pj} : N extraído por el cultivo en recolección en el tratamiento j (kg N ha^{-1})

N_{p0} : N extraído por el cultivo en recolección en el tratamiento testigo (0 kg N ha^{-1})

N_{fj} : N aportado por el fertilizante en el tratamiento j (kg N ha^{-1})

2.3. Análisis estadístico

Los resultados se procesaron estadísticamente mediante el paquete estadístico SAS (SAS Inst., 1989) usando el PROC GLM. Las diferencias significativas entre tratamientos se determinaron mediante el test de separación de medias LSD para $P < 0,05$. Se llevaron a cabo contrastes ortogonales cuando se consideró necesario. Para el contenido en nitratos de la solución del suelo recolectada en las sondas de succión se hizo mediante Duncan.

El ajuste de las curvas de respuesta a la dosis se realizó utilizando el programa TableCurve 2D V2.03 (Jandel Scientific, 1994). El ajuste de las curvas de extracción de N se hizo mediante el programa Microsoft-Excel para poder representar las distintas curvas en el mismo gráfico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evolución de las condiciones del suelo

3.1.1. Contenido de nitratos en el suelo y evolución

Evolución anual del contenido de NO_3^- -N

El contenido medio de nitrógeno nítrico (NO_3^- -N) en el suelo (0-120 cm) durante los tres años de ensayo fue de 83 kg ha^{-1} : antes de la siembra, 95 kg ha^{-1} , y después de la cosecha, 70 kg ha^{-1} .

Tabla I.4. Análisis de varianza para el contenido en NO_3^- -N en el suelo (0-120 cm) antes de la siembra (Ini) y después de la cosecha (Fin) bajo 4 dosis distintas de abonado nitrogenado (0, 100, 200, 300 kg N ha^{-1}) en tres años consecutivos de monocultivo de maíz (1994-1996).

Tratamientos (kg N ha^{-1}) y estadística	1994		1995		1996	
	Ini	Fin	Ini	Fin	Ini	Fin
	$\text{kg NO}_3^- \text{N ha}^{-1}$					
0	132	56 A	94	33 A	49	23
100	123	95 A	99	33 A	46	24
200	133	106 A	105	88 AB	49	23
300	154	185 B	111	151 B	49	25
Media	135	111	102	76	48	24
LSD	—	71	—	88	—	—
Significación	NS	*	NS	*	NS	NS
Contratase:						
0 vs. otros	-	*	-	NS	-	-
Cuadrático	-	NS	-	NS	-	-

* Significativo para $P < 0,05$. NS, no significativo

La Tabla I.4. muestra como al principio del experimento (siembra 1994) la cantidad media de NO_3^- -N presente en el suelo (0-120 cm) era de 135 kg ha^{-1} . Al finalizar dicha campaña se observaron diferencias entre tratamientos y los contenidos de NO_3^- -N en el suelo variaron con la dosis de abonado. Para el tratamiento 0 kg N ha^{-1} , se redujeron a 56 kg ha^{-1} mientras que para el tratamiento 300 kg N ha^{-1} aumentaron hasta 185 $\text{kg NO}_3^- \text{N ha}^{-1}$.

Antes de la siembra y del abonado de fondo de 1995, no se detectaron diferencias en el nivel de nitratos entre tratamientos fertilizantes. Al iniciar esta campaña, la fracción nítrica presentó una media de $102 \text{ kg NO}_3^- \text{ N ha}^{-1}$ y valores que fluctuaban entre 94 y $111 \text{ kg NO}_3^- \text{ N ha}^{-1}$ en función de las parcelas. Sin embargo, en el momento de la cosecha, el contenido en nitrógeno nítrico del suelo presentó una respuesta al abonado nitrogenado. Tanto en las parcelas no fertilizadas (0 kg N ha^{-1}) como en las que recibieron una dosis de 100 kg N ha^{-1} se redujo casi a $33 \text{ kg NO}_3^- \text{ N ha}^{-1}$, mientras que aumentó con las otras dos dosis de abonado, hasta llegar a $151 \text{ kg NO}_3^- \text{ N ha}^{-1}$ en la dosis máxima ensayada (300 kg N ha^{-1}).

Al iniciar la tercera campaña de ensayo (1996), los contenidos en nitrógeno nítrico volvieron a presentar valores muy similares entre tratamientos de N, alrededor de 48 kg ha^{-1} . Finalmente, al terminar el ensayo y después de la cosecha de 1996, los valores de $\text{NO}_3^- \text{ N}$ del suelo fueron similares en los distintos tratamientos, entre 23 y 25 kg ha^{-1} .

Contenido de $\text{NO}_3^- \text{ N}$ al inicio de cada campaña

Al principio del ensayo el contenido de nitrógeno nítrico del suelo (0-120 cm) presentaba un valor medio de 135 kg ha^{-1} (Tabla I.4. y Figura I.9), valor elevado y similar al que tenían Villar *et al.* (2000) y Berenguer *et al.* (en revisión) al iniciar sus respectivos ensayos en la zona. Las diferencias que aparecen entre tratamientos en la siembra del primer año son probablemente debidas al N residual que podría haber dejado el cultivo anterior, a la dispersión de la muestra en una parcela o al error experimental. El contenido en nitrógeno nítrico debería ser aproximadamente el mismo en todas las parcelas dado que todavía no se había realizado ningún aporte de N.

Al iniciar el segundo y tercer año de ensayo, los contenidos de $\text{NO}_3^- \text{ N}$ fueron de alrededor de 102 y 48 kg ha^{-1} respectivamente. En la Figura I.9 y en la Tabla I.4 se puede apreciar como, independientemente del año, al inicio de cada campaña el nivel de nitrógeno nítrico en el suelo se había igualado entre los distintos tratamientos, fruto, probablemente, de la lixiviación que se pudiera producir durante los meses de otoño e invierno y de la mineralización de la materia orgánica. Bundy y Malone (1988) observan en sus estudios en suelos bien drenados de USA, que el contenido de $\text{NO}_3^- \text{ N}$ en el suelo entre una cosecha de maíz y la siembra del año siguiente suele decrecer cuando el contenido residual de $\text{NO}_3^- \text{ N}$ en el perfil del suelo es alto y tiende a aumentar ligeramente cuando es bajo. Asocian las pérdidas de $\text{NO}_3^- \text{ N}$ con posibles lixivitaciones o desnitrificaciones favorecidas por las elevadas precipitaciones. Estas consideraciones pueden explicarse en el ensayo de Torregrossa ya que la pluviometría durante el período intercultivo (octubre-marzo) disminuyó en comparación con la media en 1994-95 y fue

particularmente elevada entre la cosecha de 1995 y la siembra de 1996. Esta lluvia pudo favorecer la pérdida por lixiviación de nitratos, principalmente en las parcelas donde había mayor contenido en NO_3^- -N al final del ciclo, allí donde se habían aplicado las dosis más elevadas de abonado. Jokela y Randall (1989) y Guillard *et al.* (1995) atribuyen, en zonas no regadas de Connecticut y de Minnesota (USA), el descenso del contenido en NO_3^- -N a la lixiviación que se puede producir entre otoño y primavera. Por otra parte, el contenido en materia orgánica del suelo y su mineralización entre una cosecha y la siembra del año siguiente podrían explicar el aumento del contenido de NO_3^- -N en el suelo (Jarvis, 1996), apreciable solo en las parcelas con dosis más bajas (0 y 100 kg N ha^{-1}). Esta mineralización no suele ser un problema mayor (Addiscott *et al.*, 1991) ya que las temperaturas bajas propias de este período del año no la favorecen (Magdoff, 1991), y explicarían que el aumento de NO_3^- -N fuera reducido en las condiciones del estudio. Estos razonamientos podrían explicar los resultados obtenidos en Torregrossa.

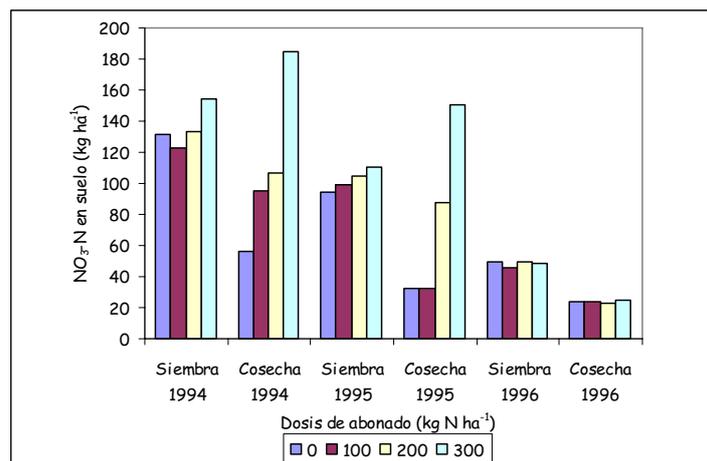


Figura I.9. Contenido en NO_3^- -N del suelo (0-120 cm) en siembra y cosecha bajo 4 dosis distintas de abonado nitrogenado (0, 100, 200, 300 kg N ha^{-1}) los tres años de ensayo (1994-1996).

Contenido de NO_3^- -N después de la cosecha

El contenido en nitrógeno nítrico en el suelo no presentó el mismo tipo de respuesta a la fertilización después de la cosecha de las tres campañas (Tabla I.4 y Figura I.9). A lo largo del ensayo, las diferencias en el contenido en NO_3^- -N en recolección evolucionaron hacia cierta homogeneización. Además, en la cosecha de 1994 y de 1995 el tratamiento nitrogenado afectó el nivel de NO_3^- -N en el suelo mientras que en 1996, no lo hizo (Tabla I.4). Así, el primer año, el contenido de nitrógeno-nítrico del suelo aumentó al incrementar la dosis de abonado N mientras que el segundo año los contenidos en las

parcelas sin fertilizar (0 kg N ha^{-1}) y con la dosis más baja (100 kg N ha^{-1}) se igualaron ($33 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$) y aumentaron con dosis superiores (200 y 300 kg N ha^{-1}) hasta 88 y $151 \text{ kg NO}_3^- \text{-N}$ respectivamente. Estas observaciones estarían de acuerdo con Bundy y Malone (1988) cuando concluyen que un incremento en la fertilización nitrogenada implica un aumento en la cantidad residual de $\text{NO}_3^- \text{-N}$ en el suelo. Berenguer *et al.* (2006), en sus ensayos de maíz en la zona observan igualmente como el N residual disminuye cuando la dosis de fertilizante es menor y aumenta a medida que se incrementan las dosis aplicadas. Durante la campaña 1996 la pluviometría fue de 167 mm , elevada respecto a las dos anteriores, y se suministraron 10 riegos en vez de los 7 en 1994 y 9 en 1995. Estos dos factores podrían haber provocado un aumento de las pérdidas por lixiviación que explicaría la similitud de contenidos de $\text{NO}_3^- \text{-N}$ residuales entre tratamientos al final de la campaña de 1996. Esta posible lixiviación vendría demostrada por la riqueza de la solución del suelo que alcanzó los $86 \text{ mg NO}_3^- \text{-N L}^{-1}$ para la dosis 300 kg N ha^{-1} o los $62 \text{ mg NO}_3^- \text{-N L}^{-1}$ para la dosis 200 kg N ha^{-1} (apartado 3.1.4). Caveró *et al.* (2003) concretan que el contenido de $\text{NO}_3^- \text{-N}$ en el suelo está muy relacionado con el manejo del riego. Además, el contenido inicial de $\text{NO}_3^- \text{-N}$ en el perfil del suelo, inferior en 1996 (Tabla I.4), condicionó probablemente el contenido residual. Finalmente, las extracciones medidas en la cosecha, las más elevadas de los tres años de ensayo (apartado 3.2.6), contribuirían también en el bajo contenido final de $\text{NO}_3^- \text{-N}$ en el suelo en 1996.

El contenido en nitrógeno nítrico después de la cosecha en el suelo fue disminuyendo a medida que transcurrieron los tres años de cultivo de maíz (Tabla I.4 y Figura I.9). En 1994, el contenido medio fue de $111 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$, en 1995 de $76 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$ y en 1996 de $24 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$. Estas observaciones coincidirían con las que Halvorson *et al.* (2005) hicieron cuando aplicaron dosis de $0\text{-}280 \text{ kg N ha}^{-1}$ durante 3 años seguidos en maíz en un suelo limoso-arcilloso del Arkansas River Valley (USA) regado por gravedad. Sus contenidos iniciales de $\text{NO}_3^- \text{-N}$ en el suelo ($0\text{-}120 \text{ cm}$), de 175 kg ha^{-1} y, en la cosecha del tercer año, de una media de 72 kg ha^{-1} , les permitieron concluir que una producción continua de maíz durante 2-3 años aplicando dosis de N conservativas, pueden reducir el nivel de $\text{NO}_3^- \text{-N}$ residual en el suelo. Berenguer *et al.* (2006), en sus ensayos de maíz tres años consecutivos en la misma parcela, observan igualmente como el N residual disminuye. En sus condiciones de riego por aspersión, sin embargo, el contenido en nitrógeno nítrico residual en el suelo pasó en tres campañas de 486 a $102 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$, valores superiores a los de Torregrossa.

En la Tabla I.4 y en la Figura I.9 se puede observar como el nitrógeno nítrico del suelo ($0\text{-}120 \text{ cm}$) disminuyó entre un 16 y un 65% entre siembra y cosecha en 1994 y 1995

para todas las dosis de N excepto en la de 300 kg N ha⁻¹ donde aumentó de 20 y 36% respectivamente. Esta evolución descendente en el contenido de NO₃⁻-N sugiere que las salidas de N fueron superiores a las entradas y que se produjo un empobrecimiento del NO₃⁻-N del suelo en las condiciones de producción (Pons, 1997). En 1996, esta reducción de NO₃⁻-N entre siembra y cosecha fue del orden del 50% para todos los tratamientos. Schröder *et al.* (2000) en su revisión sobre el ahorro potencial de N mediante una fertilización de precisión, concretan que el contenido en NO₃⁻-N del suelo en cosecha viene determinado por el balance de entradas y salidas de N contabilizando también las pérdidas de N durante el periodo de cultivo. Cavero *et al.* (2003), a partir de sus estudios en los regadíos de los Monegros (Valle del Ebro) añaden que estas pérdidas están muy relacionadas con el manejo del riego. En este equilibrio conviene tener en cuenta, además, la mineralización de la materia orgánica, que puede llegar a ser importante dadas las condiciones térmicas durante la primavera y el verano (Jarvis *et al.*, 1996). Addiscott *et al.* (1991) advierten, en las condiciones del UK, de la necesidad de ajustar la fertilización nitrogenada de manera que al final del cultivo el NO₃⁻-N residual en el suelo sea mínimo. Un contenido reducido de NO₃⁻-N viene asociado a menores pérdidas hacia el medio ambiente a través de las lixiviaciones invernales (Ma *et al.*, 1999a).

Evolución del contenido de NO₃⁻-N entre siembra y cosecha por profundidades

El análisis del contenido nítrico del suelo por profundidades no mostró diferencias entre tratamientos al inicio de ninguna de las tres campañas. Al cosechar cada ciclo de cultivo, el contenido en NO₃⁻-N en el suelo únicamente respondió al abonado nitrogenado en la profundidad 60-90 cm en 1994 y la profundidad 90-120 en 1995. En la Figura I.10. se aprecia como, al inicio del ensayo, en abril de 1994, el contenido total de nitrógeno nítrico se distribuía uniformemente en los 120 cm de profundidad estudiados. Al inicio de las dos otras campañas, el contenido de NO₃⁻-N en los 30 cm superficiales fue sensiblemente superior al de las mayores profundidades, llegando a duplicar e incluso triplicarlo en 1995. Los valores obtenidos coinciden con Ferrer *et al.* (2003) que contabilizan el contenido en NO₃⁻-N del horizonte superficial en un 43-75% de los 0-90 cm de profundidad. Estos elevados valores son probablemente debidos a la incorporación de los residuos de la planta y su correspondiente mineralización.

Cada año, después de la cosecha, los contenidos en nitrógeno nítrico mostraron cierta acumulación en el horizonte superficial, más o menos importante según la dosis de abonado N. A mayor profundidad, el contenido de NO₃⁻-N era bajo en las dosis reducidas de N (0 y 100 kg N ha⁻¹) mientras que aumentaba en las dosis elevadas (200 y 300 kg N ha⁻¹). En 1996, los bajos contenidos en NO₃⁻-N se distribuyeron uniformemente a partir

de los 30 cm de profundidad. Ferrer *et al.* (2003) observan también como la distribución del NO_3^- -N en el perfil del suelo no suele ser regular y asocian esta irregularidad a varios factores, entre otros el cultivo anterior, las características del suelo, la historia de la fertilización orgánica, los riegos y las lluvias de invierno y primavera.

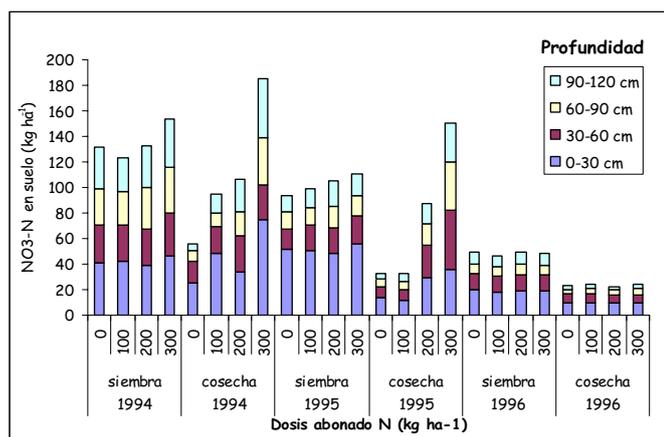


Figura I.10. Distribución del contenido en NO_3^- -N del suelo por profundidades (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 cm) en siembra y cosecha bajo 4 dosis distintas de abonado nitrogenado (0, 100, 200, 300 kg N ha⁻¹) los tres años de ensayo (1994-1996). Respuesta significativa al abonado N en cosecha 1994 y profundidad 60-90 cm con $p < 0,01$ y en cosecha 1995 y profundidad 90-120 cm con $p < 0,05$. El resto: NS.

Se observa pues una acumulación de N en el horizonte superficial, sea cual sea el momento del año, lo que sugiere que el horizonte es continuamente reprovisto de N por la mineralización de la materia orgánica. A mayor profundidad, si las dosis de abonado N son reducidas, prácticamente no quedan nitratos residuales, mientras que si las dosis de fertilizante son elevadas, se detectaron nitratos. Teniendo en cuenta que se entra en un período del año en el que no se producen extracciones por parte de la plantación y es la parte más profunda del perfil, existe un riesgo de lixiviación. Estas observaciones permiten sugerir que un ajuste de la aplicación de N en función del NO_3^- -N residual del año anterior favorecería las extracciones del NO_3^- -N inicial, minimizaría el NO_3^- -N residual en el perfil del suelo al final del período de cultivo y el riesgo de pérdidas de NO_3^- hacia las capas freáticas (Bundy y Malone, 1988).

3.1.2. Contenido de NO_3^- -N en precobertera y utilidad del PSNT

El primer y el tercer año del ensayo, se observa como el contenido en nitrógeno nítrico en el horizonte superficial del suelo (0-30 cm) antes del abonado de cobertera muestra una respuesta a la dosis de abonado (Tabla I.5). Después de las seis semanas transcurridas desde la aplicación de la media dosis de N aportada con el abonado de fondo, todavía era patente el efecto diferencial del tratamiento nitrogenado.

Tabla I.5. Análisis de varianza para el contenido en NO_3^- -N en el suelo (0-30 cm) antes del abonado de cobertera (PSNT) bajo 4 dosis distintas de abonado nitrogenado en tres años consecutivos de monocultivo de maíz (1994-1996), valores de PSNT, fertilización recomendada en base al PSNT y fertilización de cobertera aplicada.

Tratamientos (kg N ha ⁻¹) y estadística	PSNT (0-30 cm)		Fertilización de cobertera recomendada		Fertilización de cobertera real
			PSNT crítico = 25	PSNT crítico = 32	
			N	N	
	NO_3^- -N kg ha ⁻¹	NO_3^- -N mg kg ⁻¹	N kg ha ⁻¹	N kg ha ⁻¹	N kg ha ⁻¹
1994					
0	86	22	12	39	0
100	92	24	6	33	50
200	139	36	0	0	100
300	268	69	0	0	150
Media	146	-	-	-	-
LSD	82	-	-	-	-
Significación	**	-	-	-	-
1995					
0	68	17	30	57	0
100	55	14	43	70	50
200	107	27	0	18	100
300	186	48	0	0	150
Media	134	-	-	-	-
LSD	-	-	-	-	-
Significación	NS	-	-	-	-
1996					
0	18	5	80	107	0
100	21	5	77	104	50
200	30	8	68	95	100
300	24	6	74	101	150
Media	23	-	-	-	-
LSD	6,5	-	-	-	-
Significación	*	-	-	-	-

** Significativo para $P < 0,01$. NS, no significativo.

Según los criterios de Magdoff cuando estableció el Pre-sidedress Nitrogen Test (PSNT), de Fox *et al.* (1989) y de Blackmer *et al.* (1989), el valor crítico de NO_3^- -N en el horizonte

superficial del suelo se fijaría entre 20 y 30 mg NO₃-N kg⁻¹ de suelo (20-30 ppm) por encima del cual no habría respuesta al abonado nitrogenado (Magdoff *et al.*, 1990; Magdoff, 1991). Posteriormente, diferentes autores han ido acotando este límite adaptándose a las distintas condiciones de cultivo y de tipo de suelo. Así, en Iowa, Blackmer *et al.* (1993) situó el límite en 25 mg NO₃-N kg⁻¹, recomendando aportaciones de 9 kg N ha⁻¹ por cada mg por debajo de los 25 mg NO₃-N kg⁻¹. Posteriormente corrigió este valor (Blackmer *et al.*, 1997) y lo situó entre 20 y 22 mg NO₃-N kg⁻¹ para primaveras lluviosas, después de rotaciones con alfalfa o de aportaciones de purín (Scharf, 2001). En Wisconsin, Andraski y Bundy (2002) adaptaron este límite al potencial productivo de la parcela (en función del historial de manejo, del potencial del suelo, de la temperatura del aire y de las precipitaciones). En las condiciones del Canal d'Urgell y con rendimientos de 10 Mg ha⁻¹, Villar *et al.* (2000) propusieron valores críticos entre 21 y 32 mg NO₃-N kg⁻¹. Posteriormente, Ferrer *et al.* (2003) sugirieron un límite más alto (45 mg NO₃-N kg⁻¹) que se adaptaría mejor a los regadíos y los rendimientos habituales en el Valle del Ebro (14 Mg ha⁻¹). Para valores de PSNT superiores al valor crítico, no sería recomendable abonar en cobertera ya que no habría respuesta (Magdoff, 1991). Para valores de PSNT inferiores al valor crítico, se tendría que fertilizar en cobertera como mínimo con (valor crítico – PSNT_{medido}) para alcanzar rendimientos máximos (Ferrer *et al.* 2003).

Teniendo en cuenta los rendimientos obtenidos en el ensayo (apartado 3.2.1), se decidió comparar, en la Tabla I.5., las aportaciones realizadas con los valores críticos de PSNT 25 y 32 mg NO₃-N kg⁻¹. Según estos criterios, en 1994, no hubo respuesta a la aportación del abonado de cobertera en las dosis 200 y 300 kg N ha⁻¹. En la dosis 100 kg N ha⁻¹, la decisión de abonar o no en cobertera y si la dosis aportada realmente fue la adecuada varía en función del valor crítico considerado y del rigor con el que se tiene en cuenta. En 1995, no hubo probablemente respuesta a la aportación del abonado de cobertera en las dosis 200 kg N ha⁻¹ (según el valor crítico aplicado) y 300 kg N ha⁻¹. Para la dosis 100, el fertilizante aportado se ajustó aproximadamente a las recomendaciones y permitió obtener cosechas máximas. Ambos años, los rendimientos en grano, que mostraron un ajuste lineal-meseta con valores máximos a partir de la dosis 100 kg N ha⁻¹ (Tabla I.8 y Figura I.13, coincidirían con los valores límite de PSNT utilizados. En 1996, en todas las dosis de N cabía esperar una respuesta de abonado y las aportaciones realizadas fueron insuficientes (100 kg N ha⁻¹), adecuadas (200 kg N ha⁻¹) y excesivas (300 kg N ha⁻¹). El rendimiento en grano mostró un ajuste cuadrático y cuadrático-meseta, aumentó con la dosis de abonado y alcanzó para las dosis 200 y 300 kg N ha⁻¹ los 14 Mg ha⁻¹ (apartado 3.2.1). Para estos rendimientos, hubiera sido más correcto aplicar el valor crítico propuesto por Ferrer *et al.* (2003) de 45 mg NO₃-N kg⁻¹. Estas observaciones mostrarían las posibilidades y las dificultades en la aplicación del PSNT en los regadíos por gravedad

en la zona de Lleida y coincidirían con Andrasky y Bundy (2002) cuando indican que el valor crítico de PSNT se tiene que adaptar al potencial productivo de la parcela y las condiciones de cada zona. El PSNT predice mejor la dosis óptima de N para el maíz en suelos de alto potencial productivo (Bundy y Andrasky, 1995). Según su descripción del tipo de suelos, los de la zona de estudio se podrían considerar de alto potencial productivo ya que cuentan con una gran profundidad radicular y un buen drenaje. Además, los rendimientos de grano obtenidos superan las producciones que Andrasky y Bundy (2002) consideran que se obtienen en las parcelas de alto potencial productivo de Wisconsin de 7.5-10.7 Mg ha⁻¹.

3.1.3. Evolución del contenido de Materia Orgánica y estructura del suelo

Un aspecto importante que cabe destacar en el presente trabajo, es la evolución del contenido en materia orgánica del suelo, que aumentó de 1,03 a una media de 2,48% en dos años, del inicio de 1994 a 1996 (Figura I.11). La correspondiente mineralización podría también ayudar a explicar la distinta respuesta al abonado nitrogenado. Los residuos vegetales incorporados al suelo, elevados en el caso del maíz, tienen un papel importante en el ciclo nutritivo de un sistema de cultivo y conviene tener en cuenta su contribución en el balance de N y en el manejo de la fertilización nitrogenada (Kumar y Goh, 2002; Raiesi, 2006). En su efecto influyen la calidad del residuo, que depende de la relación C/N y es función principalmente de la especie original (Smith y Sharpley, 1990), de las características del suelo, de las condiciones ambientales y del manejo de estos residuos respecto al suelo (Gil y Fisk, 2001).

En los tres años de ensayo un volumen importante de residuo de maíz (de mineralización lenta, según Smith y Sharpeley, 1990) era reincorporado al suelo después de la cosecha, práctica habitual en un 51% de las explotaciones de la zona (Sisquella, *et al.*, 2004). La cantidad de planta sin mazorca (stover o "cañota") producida, picada y enterrada aumentó con la dosis de fertilizante (apartado 3.2.3), y dio lugar a un incremento del contenido en materia orgánica en el suelo en 1996 (Figura I.11) que osciló entre un 2,32% (0 kg N ha⁻¹) y un 2,58% (300 kg N ha⁻¹).

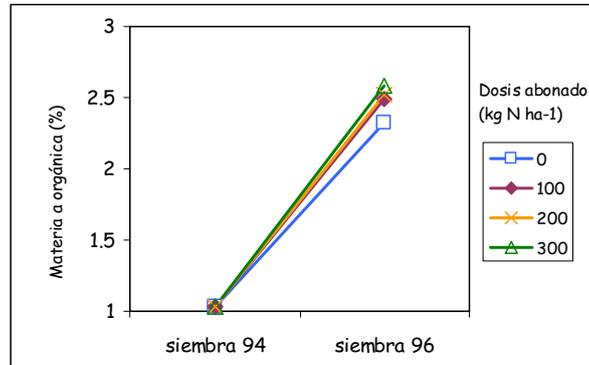


Figura I.11. Evolución del contenido en materia orgánica en el suelo (0-30 cm) entre 1994 y 1996 bajo cuatro dosis de abonado N. Diferencias no significativas (NS) entre tratamientos.

La evolución del contenido de NO_3^- -N del suelo en los períodos intercultivo 1994-95 y 1995-96 (Figura I.9) sugiere que durante estos meses se produjo una mineralización de esta fracción orgánica, más importante en 1994-95 que en 1995-96. En el tratamiento 0 kg N ha^{-1} , el contenido en NO_3^- -N aumentó en 38 kg ha^{-1} durante el período intercultivo 1994-95; en los tratamientos 0 y 100 kg N ha^{-1} , aumentó en 16 y 13 kg ha^{-1} entre la cosecha de 1995 y la siembra de 1996. Esta mineralización se produjo probablemente durante el invierno y presumiblemente fue menor por las bajas temperaturas (Magdoff, 1991; Jarvis, 1996). Smith y Sharpley (1990) recuerdan, sin embargo, que cuando esta mineralización se produce, hay un descenso inicial del contenido en N del suelo y que con residuos vegetales de alta relación C/N como el maíz esta reducción se alarga por encima de los 84 días en las condiciones de UK. Finalmente avisan que al incorporar los residuos en el suelo esta disminución del contenido de N al inicio de la mineralización se ve incrementada. Todos estos factores hacen difícil contabilizar la cantidad de N mineralizado durante el período intercultivo en las condiciones del estudio. Jarvis (1996) considera que en el Reino Unido entre noviembre y enero se produce un 27% de la mineralización total anual; Trinadle *et al.* (2001) en las condiciones del norte de Portugal, la evalúa en un 27-48%.

Además, habría que considerar que una parte de la materia orgánica se mineralizó probablemente durante el cultivo, en condiciones cálidas y con la humedad que aporta el riego. En el momento de la siembra de 1996, el nivel de materia orgánica del suelo se había incrementado un 140% respecto al contenido inicial de la siembra de 1994. El alto nivel de materia orgánica indicaría una mineralización incompleta con parte de N inmovilizado y, en consecuencia, no disponible para la planta. Esta materia orgánica se

iría descomponiendo más o menos rápidamente en función de las condiciones de humedad y temperatura (Jarvis *et al.*, 1996). A partir del balance de nitrógeno calculado (apartado 3.3), se ha evaluado la mineralización durante el ciclo productivo en 35 kg N ha⁻¹ en 1994, 93 kg N ha⁻¹ en 1995 y 119 kg N ha⁻¹ en 1996. El contenido inicial de materia orgánica en el suelo (1%) explicaría el nivel de mineralización de 1994 mientras que el de 1995 y 1996 podría estar relacionado con la incorporación de los residuos de maíz de las campañas anteriores. Miller *et al.* (1990) especifican que la materia orgánica es el origen del 90-95% del N en los suelos no fertilizados, valores que no se alcanzaron en este estudio. Schmidt *et al.* (2002) destaca que la mineralización de la materia orgánica es difícil de estimar ya que depende de la temperatura del suelo y del contenido en agua, factores que varían en el espacio independientemente del contenido en materia orgánica. En el caso de la parcela de estudio, se trata de un fondo en conexión con una ladera de pendiente muy suave (apartado 2.1.2) (Herrero *et al.*, 1993).

Según Raiesi (2006), el aumento del contenido en materia orgánica del horizonte superficial del suelo mejoró la estabilidad estructural y la porosidad, la distribución de los nutrientes, el contenido de humedad y la movilidad del agua en el horizonte superficial. Consecuentemente aumentó el drenaje y posiblemente la percolación de nitratos. De los cuatro bloques de que consta el ensayo, dos tienen una textura franca (el I y el III), uno franco-arcillosa (el II) y uno franco-limoso (el IV). Un análisis de la composición de estas granulometrías nos muestra que si bien son suelos francos por clasificación, están cerca del límite de clases texturales más finas y sus características hacen que su comportamiento no sea completamente el de un suelo franco. Previsiblemente la retención de nitratos por el suelo haya sido mayor de la que se hubiera producido si se tratara de un suelo franco típico. Además, Schmidt *et al.* (2002) especifican que aspectos como, por ejemplo, la posición en el paisaje facilitan más o menos el drenaje y definen las zonas de manejo diferencial del N en mayor medida que el contenido en materia orgánica. En el caso de las parcelas de estudio, se trata de un fondo en conexión con una ladera de pendiente muy suave (apartado 2.1.2).

Por otra parte, el bajo nivel de materia orgánica del horizonte superficial al inicio del ensayo (1,03%) podría contribuir a explicar los problemas de emergencia surgidos el primer año (apartado 3.2.2). Por ello se determinó el Índice de Riesgo de Formación de Costra (IRFC) (Tabla I.6). La interpretación de los resultados se hizo gracias al cuadro de Soltner (1990) que proponen Saña *et al.* (1996), donde el contenido en materia orgánica influye notablemente. Así se pudo observar como, en las condiciones del ensayo, estos riesgos eran altos en alguna repetición al momento de la siembra en 1994 y bajos en

todas las parcelas en 1996. Con ello, las condiciones de germinación habían mejorado notablemente.

Tabla I.6. Evolución del Índice de Riesgo de Formación de Costra (IRFC) entre 1994 (por bloques) y 1996 (por bloques con el intervalo de valores según los tratamientos) e interpretación (Soltner, 1990). Torregrosa.

Bolques	IRFC		Tendencia a formar costras	
	1994	1996	1994	1996
I	1.09	0.56-0.63	Poca	Poca
II	1.30	0.85-0.91	Poca	Poca
III	1.37	0.87-1.02	Poca	Poca
IV	1.82	1.18-1.2	Alta	Poca

3.1.4. Contenido de nitratos en el agua de riego y en el agua de la solución del suelo

El contenido medio en nitratos del agua de riego de los años 1994-1996 fue de 34 mg L⁻¹ con valores que oscilaron entre los 8 y 40 mg NO₃⁻ L⁻¹ (Figura I.12). En las tres campañas de maíz se registraron en algunos riegos valores próximos al límite máximo establecido por la EU (1980) para el agua potable (50 mg NO₃⁻ L⁻¹ o 11,3 mg NO₃⁻-N L⁻¹). Este alto nivel de nitratos se debe posiblemente a que la parcela se regaba con "agua vivas" (o de azarbe) que provenían de una acequia, antiguo drenaje natural, en vez de hacerlo directamente con agua del Canal d'Urgell (de gran calidad). Villar *et al.* (2000) midieron, en 1994, concentraciones entre 18 y 57 mg L⁻¹ en la misma zona. Considerando una dosis de riego de 6.500 m³ ha⁻¹ cultivo⁻¹, 7.000 m³ ha⁻¹ cultivo⁻¹ y 8.000 m³ ha⁻¹ cultivo⁻¹, se podría contemplar que en total se aportaron unos 45 kg N ha⁻¹, 35 kg N ha⁻¹ y 50 kg N ha⁻¹ suplementarios en 1994, 1995 y 1996 respectivamente. Esta cantidad representa entre el 10 y el 30% de las extracciones. En 1994 y 1996 estas proporciones coinciden con los porcentajes que indican Ferrer *et al.* (1997) para el agua de azarbe del Canal d'Urgell mientras que en 1995 y para las dosis superiores a los 100 kg N ha⁻¹, son algo inferiores. Francis y Schepers (1994) avisan, sin embargo, que aunque todos los NO₃⁻ aportados por el agua de riego pueden considerarse absorbibles por la planta, sería incorrecto esperar que estuvieran todos disponibles para el cultivo.

El efecto de las dosis de abonado nitrogenado en la concentración de NO₃⁻-N en la solución del suelo a 120 cm de profundidad durante los dos años en que se midió (1995 y 1996) se presenta en la Tabla I.7 y Figura I.12. Donde no se aplicó N, la concentración de NO₃⁻-N decreció gradualmente desde el principio del cultivo ambos años, de 26 a 3,8

mg NO_3^- -N L^{-1} en 1995 y de 26 a 0,8 mg NO_3^- -N L^{-1} en 1996. En las parcelas en las que se aplicaron 300 kg N ha^{-1} , se cuantificaron, después del primer riego, 56 mg NO_3^- -N L^{-1} en 1995 y 83 mg NO_3^- -N L^{-1} en 1996. Después del abonado de cobertera, la concentración de NO_3^- -N en la solución del suelo aumentó hasta 100 y 86 mg NO_3^- -N L^{-1} respectivamente. A partir del tercer riego se registró un descenso paulatino de la riqueza en NO_3^- -N de la solución en 1995 y más acentuado en 1996, hasta llegar a los 25 y 0,5 mg NO_3^- -N L^{-1} que se evaluaron para el último riego. En las parcelas en las que se aportaron 100 y 200 kg N ha^{-1} , la evolución del contenido en mg NO_3^- -N L^{-1} fue parecida a las dos anteriores pero con valores intermedios.

Tabla I.7. Análisis de varianza para el contenido de NO_3^- -N en la solución del suelo durante el ciclo de cultivo de maíz bajo 4 dosis de abonado N (0, 100, 200, 300 kg N ha^{-1}) en 1995 y 1996. En 1996, en base a dos repeticiones.

Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tratamientos (kg N ha^{-1}) y estadística	<u>Solución del suelo (mg NO_3^--N L^{-1})</u>									
1995										
0	26 A	27 A	26 A	19 A	15 A	9 A	7,1	6,6	3,8	
100	35 A	37 AB	42 B	29 A	20 A	23 A	-	-	15	
200	55 B	49 B	101 B	70 B	57 B	49 B	27	17	15	
300	56 B	51 B	100 B	64 B	64 B	52 B	-	37	25	
Media	43	41	67	46	39	28	15	20	11	
LSD	16	15	64	27	21	25	-	-	-	
Significación	**	*	*	**	**	*	NS	NS	NS	
1996										
0	26 A	20 A	16 A	15	5,2	4,0 A	3,3	3,6	0,8	1,4
100	37 AB	36 B	34 A	22	5,6	3,4 A	2,4	2,7	0,2	0,6
200	62 BC	58 C	55 AB	9,7	16	9,5 B	5,0	3,4	2,0	0,9
300	83 C	77 D	86 B	52	12	5,0 A	4,6	4,6	1,6	0,5
Media	52	48	48	27	9,6	4,9	3,6	3,6	1,2	0,8
LSD	31	11	39	-	-	3,4	-	-	-	-
Significación	*	**	*	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS

*, ** Significativo para $P < 0,05$ y $P < 0,01$ respectivamente. NS, no significativo.

El hecho que en 1996 el descenso en el contenido en NO_3^- -N en la solución del suelo fuera más brusco que en 1995 se podría atribuir a una lluvia de 62,4 mm en junio de 1996 en comparación con los 9 mm de 1995, siendo la media histórica de 35 mm. Estas precipitaciones más elevadas de lo habitual pudieron repercutir probablemente en un movimiento de NO_3^- en el perfil del suelo de mayor magnitud y más rápido que en 1995. Sogbedij *et al.* (2000) también observó variaciones en el contenido en NO_3^- -N en la solución del suelo debidas a la pluviometría y en cuantía variable en función de la granulometría de suelo. Según Cavero *et al.* (2003), hay que aceptar pérdidas de NO_3^- -N,

inevitables bajo la mejor de las planificaciones de la fertilización, ya que las precipitaciones son generalmente impredecibles. Además de la pluviometría, esta reducción de las concentraciones en NO_3^- -N en la solución del suelo coincide con el momento de máxima extracción de N del suelo por parte del maíz y explicaría el descenso más regular del contenido en NO_3^- -N en 1995. Al ser el período de mayor crecimiento, sugiere una eficiencia en la extracción del fertilizante adicional que decrece cuando las dosis aplicadas superan un valor crítico (Sogbedij *et al.*, 2000).

En 1995 la concentración de nitratos en la solución del suelo mostró diferencias entre los distintos tratamientos de fertilización nitrogenada para los riegos 1, 2, 4, 5 y 6 (2 y 14 de junio, 6, 19 y 28 de julio) (Tabla I.7). A partir del 28 de julio (6º riego), el agua dejó de percolar hasta los 120 cm de profundidad en varias de las parcelas, más alejadas del punto de entrada del agua, debido a la reducción de la dosis de riego. No se pudo ni recoger agua en la sonda de succión ni analizar su riqueza. Esto indica que las pérdidas por lixiviación y la acumulación de nitratos en el agua freática fueron mínimas. También indica que la cantidad de agua que penetró en el suelo no fue la misma en las cuatro repeticiones y que posiblemente la lixiviación de nitratos fue distinta, atendiendo a la forma alargada del campo experimental, a la distancia de unos 100 m que había entre la primera y la cuarta repetición, al punto de entrada de agua de riego y en función de la textura del suelo. En 1996, hubo diferencias entre los distintos tratamientos hasta el 1 de junio (4º riego), momento a partir del cual se homogeneizaron las riquezas. A partir de 11 de julio de 1996 el contenido en NO_3^- -N de la solución del suelo prácticamente no superó los 5 mg L⁻¹. Estos resultados tienen un comportamiento similar a los que obtuvieron Sogbedij *et al.* (2000) aunque en otra magnitud. En suelos de granulometría parecida, ensayaron dosis más reducidas (22-134 kg N ha⁻¹) y recogieron soluciones del suelo que no superaron los 18 mg NO_3^- -N L⁻¹.

La Figura I.12. muestra el efecto de la dosis de N en las concentraciones de NO_3^- -N en la solución del suelo, su evolución en función de las fechas de riego y la riqueza en NO_3^- -N del agua aportada. La disminución es similar a la que obtienen Andraski *et al.* (2000) en sus ensayos en Wisconsin con dosis parecidas de N (desde 0 hasta 204 kg N ha⁻¹). En su caso, los contenidos de NO_3^- -N en la solución del suelo fluctuaron entre 1 y 37 mg NO_3^- -N L⁻¹, siguiendo una evolución similar a la que se observó en Torregrossa pero con valores más reducidos. Distintos estudios realizados en Minesota, Ontario, Maryland, Iowa y Pennsylvania indican que el contenido medio de NO_3^- -N en la solución del suelo varía entre 12 y 24 mg NO_3^- -N L⁻¹ cuando se aplican dosis de 112-175 kg N ha⁻¹, habituales en USA, en maíz (Andraski *et al.*, 2000). El alto nivel de nitratos en algunos momentos del

ciclo de cultivo es una evidencia de que hubo probablemente un lavado de nitratos por debajo de la zona radicular (Villar *et al.*, 2000)

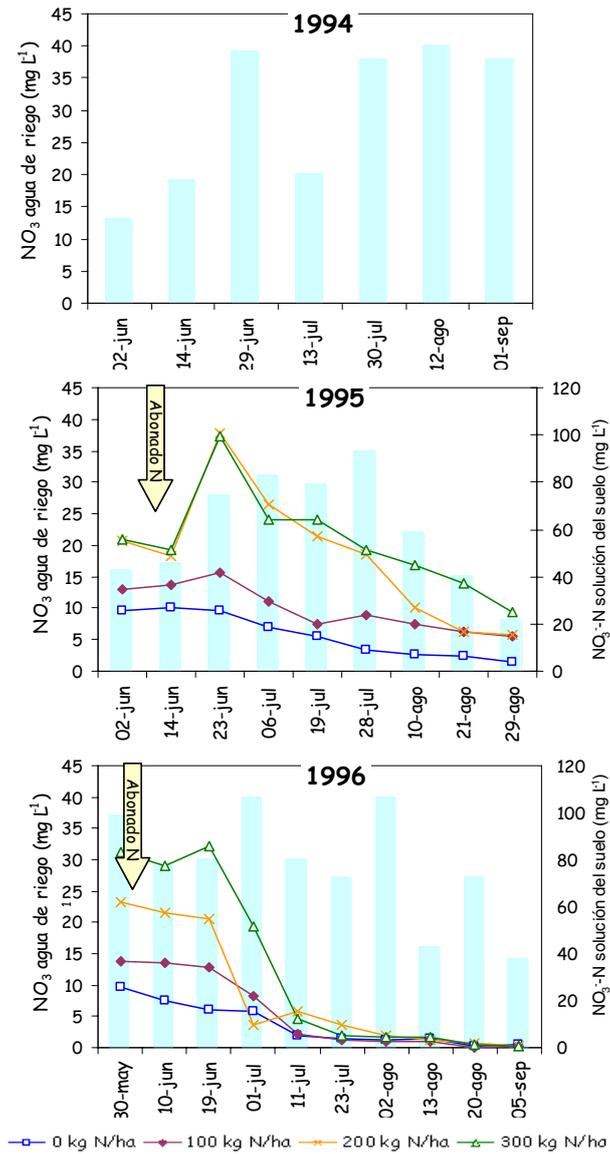


Figura I.12. Concentración de NO₃ en el agua de riego (□) los tres años del ensayo (1994-1996) y evolución del contenido de NO₃-N en la solución extraída en las sondas de succión durante el ciclo de cultivo de maíz en función de 4 dosis de N aplicadas en 1995 y 1996.

Los resultados observados en el ensayo entre 1994 y 1996 en Torregrossa pueden considerarse preocupantes desde el punto de vista económico y medioambiental. Parecen mostrar como las aplicaciones de abonado nitrogenado pueden repercutir rápidamente en la concentración de nitratos del suelo y el alto riesgo de pérdidas de N mineral aportado si la dosis es superior a las necesidades del cultivo. Puede indicar la conveniencia de abonar principalmente en cobertera, cuando el sistema radicular está ya en condiciones de absorber la mayor parte del N. Cartagena *et al.* (1995) y Causapé *et al.* (2002) cuantifican las pérdidas de nitratos lixiviados en más de 100 kg NO₃⁻-N ha⁻¹ año⁻¹ en las zonas semiáridas de España regadas superficialmente. Cavero *et al.* (2003) obtienen en los Monegros (Aragón), en condiciones climatológicas cercanas pero regadíos recientes, por aspersión y sin precedentes de altas dosis de fertilizante nitrogenado, concentraciones entre 23 y 29 mg NO₃⁻-N L⁻¹ durante el ciclo de cultivo del maíz o pérdidas del 9% del fertilizante aplicado. Las pérdidas de agua y nitratos por debajo del volumen de suelo explorado por el sistema radicular es prácticamente inevitable con el manejo de un riego superficial (Cavero *et al.*, 2003).

El término municipal de Torregrossa fue considerado Zona Vulnerable en 1998 (Decreto 283/1998 de 21 de octubre; DOGC núm. 2760 de 6-11-1998). Ello implica una planificación adecuada de la fertilización para, de esta manera, reducir las pérdidas de N por lixiviación y minimizar la concentración de NO₃⁻-N en el agua de drenaje a niveles mínimos (Sogbedij *et al.*, 2000). Además hay que adaptarla al manejo del riego ya que la riqueza en NO₃⁻-N de la solución del suelo a los 120 cm de profundidad es función del contenido de NO₃⁻-N y de la cantidad de agua percolada. Esta depende a su vez de la textura y la capacidad de retención del suelo, de la longitud de la parcela, pero también de la pluviometría o la dosis de riego (Sogbedij, 2000). Los nitratos lixiviados durante el cultivo condicionan el contenido en nitratos en el suelo en el momento de la cosecha, al final del ciclo productivo (Schröder, 2000).

3.2. Efecto de la dosis de N en la planta

3.2.1. Rendimiento en grano

El rendimiento en grano medio del ensayo fue de 9,6 Mg ha⁻¹ en 1994, 11,8 Mg ha⁻¹ en 1995 y 12,0 Mg ha⁻¹ en 1996 (Tabla I.8).

El rendimiento de los tratamientos control (0 kg N ha⁻¹), que osciló entre 7,4 y 9,1 Mg ha⁻¹, muestra las variaciones del clima y de la fertilidad del suelo los tres años de ensayo. El manejo del riego, por turnos y por gravedad, podría explicar el rendimiento del año 1994,

un 19% inferior al de los dos otros años según el análisis de varianza conjunto de los tres años del ensayo (Tabla I.8). Este primer año, la Casa Canal redujo el suministro por falta de agua y algunos riegos tuvieron una dotación inferior o, incluso, se llegaron a no dar. Así, en 1994 únicamente se pudieron dar 7 riegos mientras que los otros dos años, 9 en 1995 y 10 en 1996. Uno de los riegos suprimidos en 1994 fue alrededor de la floración, contando, en este período, con unos turnos de 15 y 17 días. Los dos otros años fueron, como máximo, de 13 días. En 1994 se espaciaron igualmente los riegos durante la fase de llenado del grano, e incluso se suprimió alguno. Además, el agua de riego entraba en el campo experimental por el sur-oeste (bloque I) y, el primer año, se observó que la cantidad que llegaba al final del ensayo (bloque VI) era sensiblemente inferior a la que podía penetrar en el suelo en las primeras repeticiones. Finalmente, las condiciones climatológicas del año 1994, con temperaturas más elevadas y precipitaciones inferiores a lo habitual, habrían reducido el agua disponible para las plantas y podrían estar relacionadas con los bajos rendimientos obtenidos (Villar *et al.*, 2002).

Tabla I.8. Rendimiento de grano de maíz en función de la dosis de abonado nitrogenado los tres años de estudio (1994-96) y análisis de varianza para el conjunto de los tres años.

Tratamientos (kg N ha ⁻¹) y estadística	Rendimiento en grano		
	1994	1995 Mg ha ⁻¹	1996
0	7.4 A	9.1 A	8.2 A
100	10.2 B	13.1 B	11.6 B
200	10.4 B	12.5 B	13.5 C
300	10.4 B	12.5 B	14.3 C
Media	9.6	11.8	11.9
LSD	2.0	1.9	1.4
Significación	*	**	**
Contrastes:			
0 vs otros	**	**	**
Cuadrático	—	*	**
ANOVA para el conjunto de los años			
Año (Y)		**	
Tratamiento		**	
Y * N		*	

*, ** Significativo para P<0,05 y P<0,01 respectivamente. NS, no significativo.

Por otra parte, conviene destacar que los rendimientos obtenidos en las parcelas sin fertilizar repetidamente no decrecieron, a pesar de presentar valores de NO₃⁻-N iniciales en el suelo que fueron disminuyendo a lo largo de los tres años de estudio (Figura I.9).

Estas observaciones se reproducirían posteriormente (Capítulo III, apartado 3.3.1) al analizar el rendimiento en grano de trigo producido en las parcelas que no recibieron N mineral durante 4 ciclos de cultivo. La mineralización durante el cultivo de los residuos del maíz anterior y las aportaciones de N mediante el agua de riego podrían explicar estos rendimientos.

Según Sisquella *et al.* (2004) y Berenguer *et al.* (2006) los rendimientos medios obtenidos pueden considerarse normales en la zona y son equivalentes a los que Villar *et al.* (2002) observaron en el mismo tipo de suelos. Boixadera *et al.* (2005) en cambio, citan producciones mayores (12-14 Mg ha⁻¹), pero cuando el riego es por aspersión y con otras variedades.

El análisis de varianza (Tabla I.8) muestra como en las tres campañas el rendimiento en grano aumentó con la dosis de abonado. Los tres años, respondió a la aportación de abonado nitrogenado y los resultados obtenidos en las parcelas en las que no hubo aportación de fertilizante nitrogenado (7,4 Mg ha⁻¹ en 1994, 9,1 Mg ha⁻¹ en 1995 y 8,2 Mg ha⁻¹ en 1996) fueron distintos de los resultados de aquellas en las que hubo aportación de nitrógeno mineral.

La respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada se corresponde a los modelos de ajuste propuestos por Cerrato y Blackmer (1990), Bullock y Bullock (1994) o Makowski (1999) donde hay una zona de respuesta hasta una dosis determinada (dosis umbral) a partir de la cual no se obtienen incrementos de rendimiento. La respuesta a la dosis de abonado nitrogenado del ensayo mostró como en los años 1994 y 1995 los rendimientos en grano máximos (10,4 y 13,1 Mg ha⁻¹ respectivamente) se alcanzaron prácticamente con 100 kg N ha⁻¹ y no aumentaron con dosis superiores (Tabla I.8). En 1996, el incremento en rendimiento fue significativo hasta los 200 kg N ha⁻¹, dosis a partir de la cual se apreció un aumento pero no significativo estadísticamente. A estas dosis de fertilizante convendría añadir la cantidad de N aportado con el agua de riego, del orden de 45 kg N ha⁻¹ en 1994, 35 kg N ha⁻¹ en 1995 y 50 kg N ha⁻¹ en 1996. El ajuste de las curvas de rendimiento en función de la dosis de abonado nitrogenado muestra una tendencia según un modelo lineal-meseta (Figura I.13-a y b) en 1994 y 1995 ($p < 0,001$ y $p < 0,01$ respectivamente) con unos coeficientes de determinación similares ($R^2 = 0,68$ para 1994 y $R^2 = 0,67$ para 1995). En 1996 los modelos lineal-meseta (grafico no representado), cuadrático-meseta y cuadrático (Figura I.13-c) mostraron ajustes y coeficientes de determinación equivalentes ($p < 0,001$ y $R^2 = 0,80$). La curva de ajuste según el modelo cuadrático-meseta coincidió exactamente con la del modelo cuadrático porque ambas ecuaciones fueron equivalente hasta el punto de máximo rendimiento

(14,263 Mg ha⁻¹). Este corresponde a la dosis más alta de las ensayadas (300 kg N ha⁻¹) y no se pudo apreciar la parte meseta de la curva que empezaría a los 302 kg N ha⁻¹. Por consistencia con los datos observados en 1996, se podrían considerar ambos modelos coincidiendo con las observaciones de Makowski *et al.* (1999) y a pesar de las recomendaciones de Cerrato y Blackmer (1990), Blackmer (1992) y Bullock y Bullock (1994) que sugieren que el ajuste cuadrático-meseta permite predecir mejor las necesidades de fertilizante N en maíz.

Este tipo de respuesta al abonado nitrogenado se ha observado en distintas condiciones de cultivo. Broadbent y Carlton (1978) y Bundy y Malone (1988) cosecharon un máximo de 9,5 Mg ha⁻¹ con aplicaciones de 220 kg N ha⁻¹ y 150 kg N ha⁻¹ respectivamente, dosis a partir de la cual no registraron mayores producciones. Cerrato y Blackmer (1990), en sus estudios sobre modelos de respuesta del rendimiento de maíz a la fertilización nitrogenada en Iowa o Scharf *et al.* (2005) en Mississippi (USA), concluyeron que el modelo cuadrático-meseta es el que mejor se ajusta a la respuesta del cultivo, con un valor máximo a partir del cual no hay aumento aunque se incremente la dosis de nitrógeno. Sander *et al.* (1999) y Schmidt *et al.* (2002), a partir de sus trabajos en los regadíos del "Corn Belt"-USA, señalan que la estimación de la dosis de N óptima para el maíz varía según el tipo de ajuste que se tenga en cuenta, se adapta mejor a un tipo de ajuste o a otro según las condiciones, pero que siempre se alcanza un máximo de producción de grano (10,1-11,2 Mg ha⁻¹) a partir del cual no hay respuesta. En ensayos llevados a cabo en localidades próximas a Torregrosa, Berenguer *et al.* (en revisión), en un suelo Aquic xerofluvent y con rendimientos en grano medios de 11-12 Mg ha⁻¹, tampoco obtuvieron respuesta a dosis superiores a los 100 kg N ha⁻¹. Asociaron esta falta de respuesta a niveles iniciales en el suelo (0-120 cm) de 90-100 kg NO₃⁻-N ha⁻¹. Villar *et al.* (2000) propone una dosis de 125 kg N ha⁻¹ para cosechar máximas producciones (10,5-11 Mg ha⁻¹) en un suelo Typic calcixerept con niveles iniciales de 125 kg NO₃⁻-N ha⁻¹.

Al principio de los tres años del ensayo de Torregrosa, el contenido de nitrógeno nítrico del suelo tenía un valor medio de 135 kg ha⁻¹, similar al que obtuvieron Villar *et al.* (2000) y Berenguer *et al.* (en revisión) al iniciar sus ensayos. Este valor y el del contenido inicial medio en la segunda campaña (102 kg NO₃⁻-N ha⁻¹) pueden considerarse altos y explicarían, junto con la elevada cantidad de N aportada por el agua de riego, que no hubiera respuesta en el rendimiento con tratamientos superiores a los 102 kg N ha⁻¹, coincidiendo con Bundy y Malone (1988). La respuesta a la dosis de abonado nitrogenado el tercer año, que aumentó con las dosis superiores ensayadas, sería posiblemente debida a unos contenidos iniciales en el suelo inferiores (alrededor de 48 kg NO₃⁻-N ha⁻¹).

El aumento del contenido en materia orgánica del horizonte superficial, que pasó de 1,03 a 2,48% en dos años de ensayo (apartado 2.1.3) y la correspondiente mejora de las características físicas del suelo podrían también explicar el incremento de los rendimientos observados.

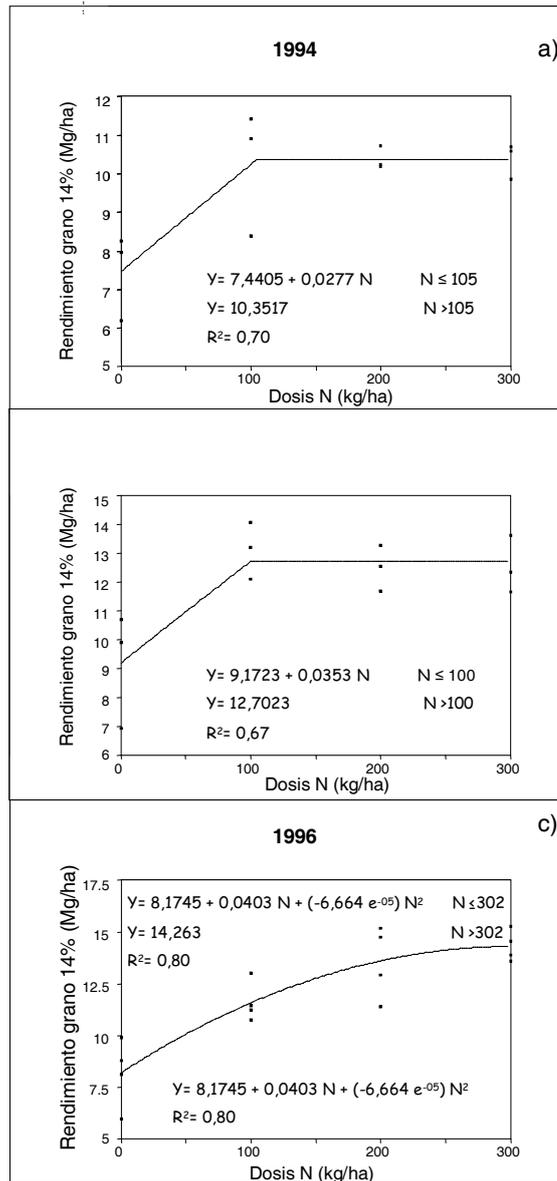


Figura I.13. Comportamiento del modelo de ajuste lineal-meseta en 1994 (I.13.-a; P<0,001) y 1995 (I.13.-b; P<0,01) y del modelo cuadrático y cuadrático-meseta en 1996 (I.13.c; P<0,001) respecto al rendimiento en grano (14 % humedad) para las dosis de N ensayadas (0, 100, 200, 300 kg N ha⁻¹). N: dosis de fertilizante (kg N ha⁻¹).

3.2.2. Componentes del rendimiento

Los componentes del rendimiento no presentan, generalmente, una respuesta significativa a la dosis de abonado N (Tabla I.9).

Aunque la **densidad de plantación** objetivo era de 75.000 plantas m⁻², en 1994 fue algo inferior (64.300 plantas ha⁻¹) debido a la costra superficial que se produjo poco después de la siembra y que dificultó la emergencia (Tabla I.9). En los dos años siguientes, la densidad obtenida se acercó a la planificada. El aumento del contenido de materia orgánica del horizonte superficial, citado anteriormente, posiblemente contribuyó a mejorar las condiciones de germinación del maíz.

Se contaron una media de 17 **filas por mazorca** en 1994, 17,5 en 1995 y 17,6 en 1996, sin variaciones según la dosis de abonado (Tabla I.9). Andrade *et al.* (1996) señalan que este componente del rendimiento viene más condicionado por el genotipo que por las condiciones ambientales (Bonhome *et al.*, 1984) y especifican la poca sensibilidad al N disponible (Uhart y Andrade, 1995a y b). El número medio de **granos por fila** fue de 30,8 en 1994, 31,5 en 1995 y 31,1 en 1996 (Tabla I.9). En 1994 y 1995, a pesar de no detectar diferencias en el número de granos por fila, el tratamiento 0 kg N ha⁻¹ presenta siempre valores inferiores. Únicamente en 1996 el número de granos por fila aumentó en función del abonado N hasta los 200 kg ha⁻¹, dosis a partir de la cual no se detectaron variaciones. Los valores oscilaron entre 25,5 (dosis 0 kg N ha⁻¹) y 34,6 granos por fila (dosis 200 kg N ha⁻¹).

Esta respuesta, habitual cuando se trabaja con dosis variables de N, corresponde a la diferencia de rendimiento observada anteriormente y podría explicarse con las conclusiones presentadas por Uhart y Andrade (1995b), Plenet *et al.* (1991) y Moser *et al.* (2006) que sugieren que una disminución del N disponible reduce el número de semillas por fila o por unidad de superficie. El número de filas por mazorca y el número de granos por fila registrados en 1994, ambos escasos, podrían igualmente venir provocados por la mala disponibilidad hídrica alrededor de la floración (Otegui, *et al.*, 1995; Andrade *et al.*, 1996). Estos dos componentes del rendimiento implican un tamaño de mazorcas inferior al habitual para la variedad y explicarían en parte la disminución del rendimiento de grano (Plenet *et al.*, 1991).

Tabla I.9. Componentes del rendimiento de grano de maíz en función de dosis de abonado nitrogenado los tres años de estudio (1994-96) y análisis de varianza para el conjunto de los tres años.

Tratamientos (kg N ha ⁻¹) y estadística	Densidad	Filas mazorca ⁻¹	Granos fila ⁻¹	Peso 1000 granos	Peso hectolítrico	Humedad grano
	pl. ha ⁻¹			g	kg Hl ⁻¹	g kg ⁻¹
1994						
0	64527	17.1	28.1	327	76.1	214
100	64033	16.8	32.9	337	77.4	208
200	64198	16.6	31.5	329	76.6	209
300	64691	17.3	30.8	324	77.0	209
Media	64362	16.9	30.8	329	76.8	210
LSD	—	—	—	—	—	—
Significación	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contrates:						
0 vs otros	—	—	—	—	—	—
Cuadrático	—	—	—	—	—	—
1995						
0	70453	17.8	29.3	362 A	67.8	242
100	73251	17.6	31.5	409 B	65.8	246
200	73909	17.0	32.5	417 B	67.0	244
300	72428	17.4	32.7	424 B	69.4	233
Media	72510	17.4	31.5	403	67.9	241
LSD	—	—	—	29	—	—
Significación	NS	NS	NS	**	NS	NS
Contrates:						
0 vs otros	—	—	—	**	—	—
Cuadrático	—	—	—	NS	—	—
1996						
0	70184	17.1	25.5 A	357	73.0	221
100	70326	17.2	30.3 B	383	71.2	231
200	71180	18.0	34.6 C	397	73.3	227
300	73173	18.0	34.1 C	401	72.7	231
Media	73226	17.6	31.1	384	72.5	227
LSD	—	—	3.6	—	—	—
Significación	NS	NS	**	NS	NS	NS
Contrates:						
0 vs otros	—	—	**	—	—	—
Cuadrático	—	—	*	—	—	—
ANOVA para el conjunto de los años						
Año (Y)	**	NS	*	**	**	*
Tratamiento (N)	NS	NS	NS	**	NS	NS
Y * N	NS	NS	NS	NS	NS	NS

*, ** Significativo para P<0,05 y P<0,01 respectivamente. NS, no significativo.

El **peso de 1000 granos** medio fue de 329 g en 1994, 403 g en 1995 y 384 g en 1996 (Tabla I.9). Únicamente en 1995 respondió a la aportación de abonado N, con pesos que aumentaron de 362 a 424 g. La respuesta, en este caso, indica un aumento de peso hasta la dosis de 100 kg ha⁻¹, a partir de la cual no hubo repuesta estadística, coincidiendo con el incremento de rendimiento observado anteriormente. Este último podría venir explicado en parte por este aumento de peso de la semilla, de acuerdo con

Plenet *et al.* (1991) o Uhart *et al.* (1995b). Por otra parte, Grant *et al.* (1989) indican el efecto que puede tener un período de estrés hídrico durante la fase de llenado del grano, reduciendo el peso de las semillas. Las irregularidades que se produjeron en el riego junto con la baja pluviometría y las temperaturas superiores a los 23°C durante el llenado de grano (Thompson, 1986) explicarían el bajo peso de las semillas y podrían justificar parcialmente los rendimientos obtenidos durante la campaña de 1994 en todos los tratamientos.

El **peso hectolítrico** fue homogéneo todos los años y varió entre 67,5 kg HI⁻¹ y 76,8 kg HI⁻¹ (Tabla I.9). La **humedad** del grano en el momento de la cosecha fue también homogénea según el tratamiento y con valores entre 21 % en 1994 y 24% en 1995. El reducido número de riegos, sobretodo al final del ciclo productivo en 1994, podría explicar el menor porcentaje de humedad de este año mientras que el retraso en la cosecha en 1996 respecto a 1995 (25 días) podría explicar los valores inferiores de 1996 en relación a las elevadas humedades de 1995.

3.2.3. Producción de biomasa y altura de planta

La producción media de biomasa del ensayo en madurez fisiológica fue de 22 Mg ha⁻¹ con unas producciones medias que variaron entre años: 19 Mg ha⁻¹ en 1994, 23 Mg ha⁻¹ en 1995 y 26 Mg ha⁻¹ en 1996 (Tabla I.10). Los resultados de los tres años son similares a los que observaron Villar *et al.* (2000) y Berenguer *et al.* (2006) en localidades próximas. Atendiendo a Andrade *et al.* (1996) que citan producciones de biomasa de 22,5 ó 30 Mg ha⁻¹ según si se trata de híbridos de ciclo corto o largo, la biomasa producida en 1994 podría considerarse baja y la de 1995 y 1996 normal. Según las indicaciones de Abrecht y Carberry (1993) y de Otegui *et al.* (1995), es probable que la menor producción del primer año de ensayo se deba al riego deficitario, como parece mostrar la menor altura de la planta. En la misma campaña, Villar *et al.* (2002) anotaron igualmente producciones de biomasa inferiores a las normales en el mismo tipo de suelos.

En floración, la biomasa producida, con un valor medio de 8 Mg ha⁻¹ en 1994, 9 Mg ha⁻¹ en 1995 y 11 Mg ha⁻¹ en 1996 ya indicaba la diferencia entre años, aunque a menor escala.

El análisis de varianza (Tabla I.10) muestra únicamente en 1996 un aumento de la biomasa final producida en función de la dosis de abonado N. Este incremento se produce hasta la dosis de 200 kg N ha⁻¹, dosis a partir de la cual se estabilizaron las producciones de biomasa, ajustándose a un comportamiento meseta como los que

observaron Cox *et al.* (1993) y Guillard *et al.* (1995) en sus ensayos y siguiendo la misma evolución que la producción de grano (apartado 3.2.1). En las parcelas no fertilizadas (0 kg N ha^{-1}) se produjeron 19 Mg ha^{-1} de materia seca y 30 Mg ha^{-1} en aquellas en las que se aportaron 300 kg N ha^{-1} . Esta diferencia, del orden del 27%, es equivalente a la que observan Cox *et al.* (1993) en sus ensayos. En 1994 y 1995 se aprecia igualmente una producción inferior en las parcelas sin abono, aunque sin ser estadísticamente significativa, coincidiendo con Villar *et al.* (2000) y Berenguer *et al.* (2006). Andrade *et al.* (1996) explican que las deficiencias de nitrógeno disponible reducen la producción de biomasa al disminuir la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y la eficacia con que éste convierte dicha radiación en biomasa. Esta menor eficacia se explica por el ritmo fotosintético, producto de un bajo contenido de nitrógeno en la hoja (Novoa y Loomis, 1981). Las condiciones climáticas registradas podrían también explicar esta diferencia entre años. Durante el ciclo de cultivo de 1996 se registraron las precipitaciones más elevadas de los tres años de ensayo que podrían explicar el mejor crecimiento del cultivo y, junto con un nivel inicial de nitrógeno nítrico en el suelo inferior ($48 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$), una mejor respuesta al abonado nitrogenado.

Los resultados de producción de biomasa suelen ser menos precisos que los de rendimiento de grano debido al menor tamaño de muestra utilizado. Para la evaluación del rendimiento se cosecharon 18 m^2 por parcela mientras que la producción de biomasa se determinó en $1,5 \text{ m}^2$. En consecuencia, aumenta el error experimental y resulta más difícil detectar diferencias entre tratamientos.

La biomasa acumulada en floración representó aproximadamente el 40% de la biomasa final, coincidiendo con Andrade *et al.* (1996). Cada año, los valores más bajos correspondieron al tratamiento sin abonado nitrogenado. En 1994 se observaron diferencias entre dosis de abonado, sin por ello estar relacionadas con un aumento de estas. Esto podría indicar que el contenido inicial de N en el suelo era suficiente para el desarrollo del cultivo hasta este estadio, sin precisar aporte de fertilizante (Scharf, 2001).

La **altura de la planta** aumentó en los tres años que duró el ensayo, coincidiendo con los aumentos de biomasa producida (Tabla 1.10). Las alturas variaron entre los 185 y los 237 cm, entre normales y altas para el cultivar Juanita y las condiciones de producción (Pioneer, comunicación personal, 2006). El déficit hídrico en 1994 podría explicar el menor tamaño en este año (Abrecht *et al.*, 1993 y Otegui *et al.*, 1995) mientras que en 1996 las plantas fueron particularmente altas. Cada año, la diferencia de altura de las plantas en función de la dosis de abonado N era visible en campo. Sin embargo estas

diferencias únicamente fueron estadísticamente significativas el último año del ensayo en que, a partir de la dosis de 100 N kg ha⁻¹, no se detectó aumento de altura.

Tabla I.10. Producción de biomasa final y en floración, altura de la planta, LAI y PARI en función de la dosis de nitrógeno (kg N ha⁻¹) los tres años de estudio (1994-96) y análisis de varianza para el conjunto de los tres años.

Tratamientos (kg N ha ⁻¹) y estadística	Biomasa final			Biomasa en Floración			Altura			LAI			PARI	
	1994	1995	1996	1994	1995	1996	1994	1995	1996	1994	1995	1996	1995	1996
	Mg ha ⁻¹			Mg ha ⁻¹			cm			m ² m ⁻²			%	
0	16	20	19 A	7 A	8	10	185	198	206A	2.7A	3.7	4.4	83	84
100	20	23	25AB	9 C	9	13	191	220	234B	4.3B	3.6	5.3	90	87
200	20	21	29 B	9 BC	10	12	190	211	234B	4.1B	4.4	5.6	88	88
300	22	25	30 B	7 A	9	11	196	214	238B	3.1 B	4.4	5.0	92	89
Media	19	23	26	8	9	11	190	210	228	3.5	4.0	5.1	88	87
LSD	—	—	5.5	1.6	—	—	—	—	17	0.75	—	—	—	—
Significación	NS	NS	**	*	NS	NS	NS	NS	**	**	NS	NS	NS	NS
Contrastes:														
0 vs otros	—	—	**	*	—	—	—	—	**	**	—	—	—	—
Cuadrático	—	—	NS	**	—	—	—	—	NS	**	—	—	—	—
ANOVA para el conjunto de los años														
Año (Y)	**			**			**			*			NS	
Tratamiento (N)	**			*			**			**			NS	
Y * N	NS			NS			NS			*			NS	

*, ** Significativo para P<0,05 y P<0,01 respectivamente. NS, no significativo.

3.2.4. Medidas de LAI y de PARI

El **índice de área foliar** (LAI) medido en floración presentó un comportamiento similar al de la biomasa en el mismo estadio. Los valores medios fueron de 3,5 m² m⁻² en 1994, 4,0 m² m⁻² en 1995 y 5,1 m² m⁻² en 1996 (Tabla I.10), normales para el cultivo (Uhart y Andrade, 1995a). Los valores de LAI en 1994, más bajos, estuvieron probablemente condicionados, como se ha venido comentando, por el déficit hídrico (Otegui *et al.*, 1995). Como la biomasa producida en floración, únicamente el LAI en 1994 presentó unas diferencias significativas en función del abonado nitrogenado pero no aumentó con la dosis. Estos resultados podrían estar condicionados por el alto nivel inicial de nitratos en el suelo que, junto con la baja disponibilidad de agua, podrían haber condicionado los resultados del análisis de varianza. Los índices más elevados, registrados en 1996, mostraron el mayor desarrollo vegetativo de las plantas. Todos los años se midió un LAI inferior en el tratamiento 0 kg N ha⁻¹ (2,7 m² m⁻² en 1994, 3,7 m² m⁻² en 1995 y 4,4 m² m⁻² en 1996) respecto a los otros tratamientos, sin llegar a las diferencias que citan otros

autores como Uhart y Andrade (1995a). Las parcelas sin abonar presentaron carencias de N en las hojas los tres años del ensayo. Esta apariencia podría venir explicada por Uhart y Andrade (1995a) y Borrás *et al.* (2002) cuando observan una senescencia prematura de las hojas en situaciones de poco N, aunque la luz sea suficiente. La reducción del LAI explica principalmente la disminución de la radiación interceptada citada anteriormente y justifica, a su vez, la reducción de producción de biomasa en situaciones de deficiencia de nitrógeno (Andrade *et al.*, 1996).

El índice de **intercepción fotosintéticamente activa** (PARI), que fluctuó entre el 83 y el 92%, no mostró diferencias significativas (Tabla I.10). Cada año, sin embargo, las plantas a las que se había aportado 0 kg N ha⁻¹ presentaron un menor índice. No se llegó, no obstante, al 30% de reducción que citan Muchow y Davies (1988) ni al 42% de Uhart y Andrade (1995a). Gardner *et al.* (1985) señalan que la mayor tasa de crecimiento del cultivo se obtiene cuando la intercepción se aproxima al 95%. Los valores de PARI obtenidos en el ensayo sugieren que no se alcanzaron los rendimientos máximos potenciales.

3.2.5. Índice de cosecha

Los índices de cosecha variaron entre 0,37 y 0,52, con valores medios de 0,43 en 1994, 0,45 en 1995 y 0,40 en 1996. Los índices de cosecha fueron cada año similares para las distintas dosis de fertilizante, salvo en 1995 en que mostraron una respuesta ($p < 0,05$) y aumentaron hasta la dosis 200 kg N ha⁻¹. No se detectó diferencia entre los años. En la dosis 300 kg N ha⁻¹, el índice de cosecha se situó entre el obtenido con 0 y 100 kg N ha⁻¹. Villar *et al.* (2000) consiguieron índices de 0,52, homogéneos para las distintas dosis de N que ensayaron en localidades y condiciones próximas a las de Torregrossa. Conviene sin embargo precisar que sus resultados se refieren a un único año de ensayo y es difícil prever que hubiera pasado si se hubieran situado tres años seguidos en la misma parcela. Berenguer *et al.* (2006), en cambio, consiguieron unos índices de cosecha comprendidos entre 0,41 y 0,47, similares cada uno de los tres años de sus ensayos y equivalentes a los que se obtuvieron en Torregrossa.

Aflakoui *et al.* (1993) obtuvieron un índice de cosecha de 0,62-0,64 en Ontario (Canadá) para dosis de 0 y 120 kg N ha⁻¹. Cuando sus índices fueron mayores, lo relacionan con cierto estrés hídrico al inicio del cultivo que habría limitado el crecimiento vegetativo, sin por ello, reducir la producción de grano. Este criterio no se podría aplicar en Torregrossa ya que la falta de agua afectó también el rendimiento en grano. El elevado desarrollo vegetativo de 1996, en cambio, podría explicar los bajos índices obtenidos.

3.2.6. Contenido en N del grano y de la planta. Extracciones de N por la parte aérea de la planta

Independientemente de la dosis de abonado, las concentraciones medias anuales de N en grano seco ($12,6 \text{ g kg}^{-1}$ en 1994, $11,7 \text{ g kg}^{-1}$ en 1995 y $9,5 \text{ g kg}^{-1}$ en 1996) fueron disminuyendo a lo largo de los tres años de estudio (Tabla I.11). Estos valores son inferiores a los que obtuvieron en localidades y suelos próximos Villar *et al.* (2000). En sus ensayos, la concentración de N del grano osciló entre $13,1$ y $15,3 \text{ g kg}^{-1}$, disminuyendo el segundo año, como en el ensayo de Torregrossa. Berenguer *et al.* (2006) detectaron contenidos medios de $12,1$ – $12,6 \text{ g kg}^{-1}$ de N, más parecidos.

El contenido en N en grano por tratamiento fertilizante varió entre $8,6$ y 14 g N kg^{-1} . Según el análisis de varianza (Tabla I.11), la aplicación de dosis crecientes de fertilizante dio lugar a un aumento de la riqueza de N y de las extracciones por el grano los tres años. Según las indicaciones de Blackmer y Mallarino (1996) el N aportado por encima de las necesidades fisiológicas del cultivo se habría transformado realmente en proteína y la planta habría sido capaz de traslocarlo en el grano. El LAF (1999b) evalúa las extracciones totales en N del maíz en 21 - 23 kg por tonelada de grano y Boixadera *et al.* (2005) en 22 - 27 kg , valores equivalentes a los que se obtuvieron en este ensayo. Si se dividen las extracciones totales de N por la producción en grano, las extracciones medias en 1994 fueron de 24 kg N Mg^{-1} , en 1995 de $26,1 \text{ kg N Mg}^{-1}$ y en 1996 de $24,5 \text{ kg N Mg}^{-1}$.

El contenido medio de N en la planta sin mazorca ($5,7 \text{ g kg}^{-1}$ en 1994, $7,5 \text{ g kg}^{-1}$ en 1995 y $6,8 \text{ g kg}^{-1}$ en 1996) varió según los años, entre $4,7$ y los $9,5 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabla I.11) y aumentó con la dosis de abonado N en 1995. Estos valores homogéneos (1994 y 1996) podrían indicar que se produjo una movilización del N desde la parte vegetativa hacia el grano. Paré *et al.* (1992) consideran que este tipo de movilización después de antesis se produce en condiciones de N reducido y puede llegar a ser más importante que una nutrición correcta. Los contenidos analizados son similares a los $6,1$ - $10,8$ que citan Cox y Cherney (2001) salvo los del año 1994 para las dosis 0 y 100 kg N ha^{-1} y el año 1995 para las parcelas sin fertilizar. Los contenidos de N en planta sin mazorca, inferiores en 1996 que en 1995, podrían ser estar relacionados con una menor disponibilidad de N en el suelo (Tabla I.4 y Tabla I.5) en 1996 a pesar de una absorción de N suficiente como para producir una cantidad de materia seca superior (Timoneda, 1998).

La extracción media de N por la parte aérea de la planta fue de 280 kg ha^{-1} : 233 kg ha^{-1} en 1994, 312 kg ha^{-1} en 1995 y 294 kg ha^{-1} en 1996 (Tabla I.11). Independientemente de

la dosis de abonado N, las extracciones de N fueron inferiores el primer año de estudio, coincidiendo con los datos de rendimiento y de producción de biomasa menores, de acuerdo con Bundy y Malone (1988). Las condiciones de cultivo del primer año condicionaron probablemente tanto el crecimiento como las extracciones de N, que hubieran podido ser superiores. Las irregularidades en el suministro del agua y la baja pluviometría durante el período de llenado del grano en 1994 explicarían mejor, según Ferrer *et al.* (2003), la baja extracción de N que el contenido en NO₃-N del suelo.

Tabla I.11. Contenido en N en el grano y en la planta sin mazorca (PsM) y extracción en N por el grano, por la planta sin mazorca y total bajo 4 dosis de abonado nitrogenado (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹) los tres años de estudio (1994-96). Análisis de varianza conjunto de los tres años.

Tratamiento (kg N ha ⁻¹) y estadística	N grano g kg ⁻¹	N PsM g kg ⁻¹	Extracción N Grano kg ha ⁻¹	Extracción N PsM kg ha ⁻¹	Extracción N total kg ha ⁻¹
1994					
0	10.8 A	4.7	80 A	75	155 A
100	12.7 B	6.7	130 B	111	241 B
200	12.9 B	6.2	134 B	124	258 B
300	14.0 B	6.1	145 B	134	279 B
Media	12.6	5.7	122	111	233
LSD	1.8	—	30	—	72
Significación	*	NS	**	NS	*
Contrates:					
0 vs otros	**	-	**	-	**
Cuadrático	NS	-	NS	-	NS
1995					
0	9.0 A	5.2 A	82 A	108 A	190 A
100	11.4 B	7.3 B	149 B	171 B	320 B
200	12.8 C	7.9 B	160 BC	164 AB	323 B
300	13.7 C	9.5 C	172 C	243 C	415 C
Media	11.7	7.5	140	171	312
LSD	1.4	1.5	21	60	61
Significación	**	**	**	**	**
Contrates:					
0 vs otros	**	**	**	**	**
Cuadrático	NS	NS	**	NS	NS
1996					
0	8.6 A	6.1	71 A	123 A	194 A
100	8.7 A	6.1	101 B	149 A	250 AB
200	9.7 AB	6.6	132 C	193 AB	326 BC
300	10.9 B	8.4	156 D	251 B	407 C
Media	9.5	6.8	115	179	294
LSD	1.3	—	23	81	93
Significación	**	NS	**	**	**
Contrates:					
0 vs otros	*	-	**	*	**
Cuadrático	NS	-	NS	NS	NS
ANOVA para el conjunto de los años					
Año (Y)	*	*	NS	*	NS
Tratamiento(N)	NS	NS	NS	NS	NS
Y * N	NS	NS	NS	NS	NS

*, ** Significativo para P<0,05 y P<0,01 respectivamente. NS, no significativo.

Según el análisis de varianza (Tabla I.11), esta extracción aérea respondió los tres años a la aportación de abonado nitrogenado y aumentó con la dosis. En las tres campañas, los valores inferiores (155 kg ha^{-1} , 190 kg ha^{-1} y 194 kg ha^{-1}) correspondieron a las parcelas sin abonar (0 kg N ha^{-1}) y los más elevados (279 , 415 y 407 kg ha^{-1} respectivamente) a la dosis 300 kg N ha^{-1} , con datos intermedios para las otras dosis ensayadas. El N acumulado en la parte aérea de la planta disminuyó en 44% en 1994, 54% en 1995 y 52% en 1996 en las parcelas sin abonado (0 kg N ha^{-1}) respecto a aquellas que recibieron 300 kg N ha^{-1} . Uhart y Andrade (1995a) observaron un descenso de las extracciones aún mayor (86%) pero en unas condiciones experimentales distintas (5,6% de Materia Orgánica y 180 kg N ha^{-1} frente a los 44 kg N ha^{-1} del control). Atendiendo a las sugerencias de Sogbedij (2000), la homogeneidad de las extracciones con dosis superiores a los 100 kg N ha^{-1} en 1994 y entre los tratamientos 100 y 200 kg N ha^{-1} en 1995 indicaría que el nitrógeno suplementario no fue aprovechado por el cultivo. En cambio el aumento de N extraído por el cultivo entre las dosis 200 y 300 kg N ha^{-1} en 1995 y para todas las dosis en 1996 sugeriría que se produjo un consumo de N "de lujo" ya que el rendimiento de grano fue similar para los distintos tratamientos. Según Francis y Shepers (1994) esta extracción de N adicional puede afectar la calidad del grano de maíz al cambiar el contenido en proteína.

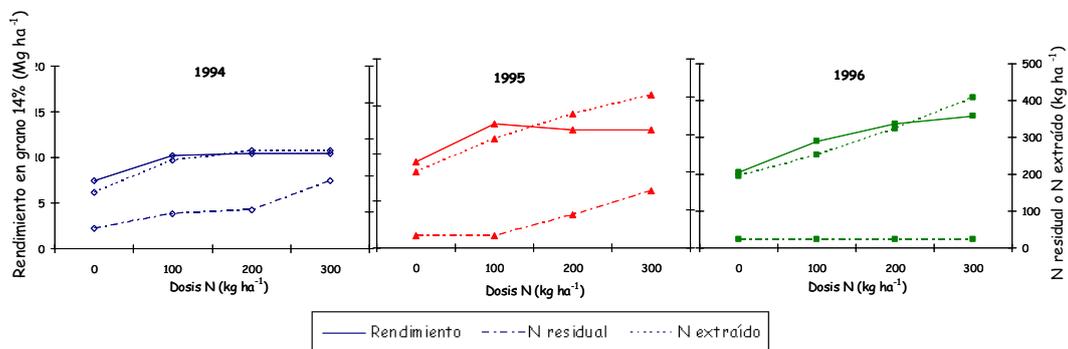


Figura I.14. Efecto de la dosis de fertilizante nitrogenado sobre el rendimiento en grano de maíz, la cantidad de N extraído por la planta y el $\text{NO}_3\text{-N}$ residual en el suelo (0-120 cm) durante los tres años de estudio.

La Figura I.14 muestra, los tres años de ensayo, el efecto de las distintas dosis de abonado nitrogenado sobre el rendimiento en grano de maíz, sobre la cantidad total de N extraído por la parte aérea de la planta y sobre el contenido residual de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el suelo en el momento de la cosecha. En las tres campañas se observan tendencias similares: el rendimiento se estabiliza a partir de cierta dosis de fertilizante, las

extracciones de N siguen un patrón similar al del rendimiento pero siguen aumentando cuando el rendimiento se ha estabilizado y el NO_3^- -N residual en el suelo aumenta a partir de la dosis de N con la que se consigue el máximo rendimiento (salvo en 1996 en que las condiciones climáticas y el bajo nivel de N inicial en el suelo condicionaron los resultados). Hubiera sido interesante ensayar dosis de N mayores para poder observar en qué punto las extracciones de N se hubieran estabilizado y si la acumulación de NO_3^- -N residual en el suelo hubiera seguido aumentando, como Scout mostró (Figura I.2) en 1974 (Rauschkolb y Hornsby, 1994).

En la Tabla I.11, las extracciones de N por la parte aérea de la planta vienen desglosadas en las extracciones que corresponden al grano cosechado y las que corresponden a la fracción vegetativa. Así, las diferencias entre extracciones totales se deben a variaciones en las extracciones por parte del grano (producto del rendimiento en grano por su riqueza en N) y por parte de la planta sin mazorca (producto de la cantidad de planta sin mazorca acumulada en cosecha por su contenido en N). Como ya se ha comentado anteriormente, todos los años, las extracciones de N por el grano respondieron a la dosis de abonado N, coincidiendo con los aumentos de rendimiento (apartado 3.2.1) y el contenido en N del grano. Las extracciones de N por la fracción vegetativa, en cambio, respondieron a la dosis de N únicamente en 1995 y 1996. En 1994, las extracciones de N por parte de la planta sin mazorca no presentaron variaciones y por ello, su participación a las diferencias entre las extracciones totales en N podría considerarse mínima. En 1995, las variaciones en las extracciones por la planta sin mazorca se deben únicamente al aumento en riqueza en N de esta ya que no hay diferencia en la producción de biomasa (apartado 3.2.3.). En 1996, finalmente, el aumento de las extracciones de N por la planta sin mazorca en función de la dosis de abonado N son debidas principalmente a las variaciones en la producción de biomasa. Estas observaciones muestran que la respuesta de las extracciones de N en la planta sin mazorca al abonado nitrogenado no corresponde a la respuesta a las extracciones en el grano y nos indicaría que la distribución de N en la planta variaría en función de las condiciones de cultivo. Delin *et al.* (2005) hacen incidencia en que, para conseguir rendimientos y contenido de proteína adecuados, conviene aportar el N que precisa el cultivo y esta cantidad depende de factores como características del suelo, N disponible para la planta y potencial productivo. Ferrer *et al.* (2003) insisten además en la climatología y la posibilidad de regar. Los resultados obtenidos sugieren que la dosis de abonado nitrogenado afecta la acumulación de N en las distintas partes de la planta pero más directamente en el grano que en la planta sin mazorca. En la Figura I.2 de Scout, se puede apreciar como, hasta una dosis de 224 kg N ha^{-1} , el contenido en N en el grano es mucho más elevado que en la parte aérea de la planta. La disponibilidad de N para la planta condicionaría su

acumulación en la planta y su distribución en el grano o en la planta sin mazorca, en rendimiento (de grano o de biomasa acumulada) o en riqueza de N. Según las observaciones realizadas, el N se acumula principalmente en el grano ya que el aumento de N absorbido por el cultivo se manifestó fundamentalmente como un incremento en rendimiento de grano y en su riqueza en N. Desvignes (1992), Andrade *et al.* (1996) y Ferrer *et al.* (2003) señalan que un exceso de N disponible se acumula en la planta sin manifestar un aumento de rendimiento. Así, dosis de N superiores se manifestarían en la planta sin mazorca (producción y riqueza en N), de aquí la utilización del análisis de NO_3^- en la base del tallo como método de diagnóstico del estado nutritivo de la planta.

Las extracciones de N por el grano respecto a las totales (53% en 1994, 45% en 1995 y 60% en 1996) fueron bajas según Shepers y Moasier (1991) pero normales (y reducidas en 1995) atendiendo a las indicaciones de Boixadera *et al.* (2005). Estos autores indican relaciones de 64-78% y 50-80% respectivamente.

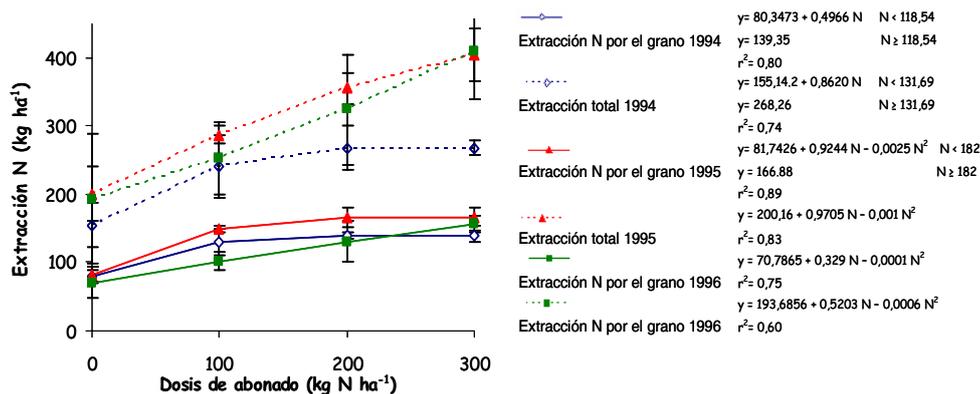


Figura I.15. Extracciones de N por parte del grano y totales en el momento de la recolección para las 4 dosis de N (N) ensayadas (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹) los tres años de ensayo (1994-96) según cada modelo de ajuste considerando el total de las repeticiones. Las barras de error muestran el error estándar de la cada media.

En la Figura I.15, la representación gráfica de las ecuaciones de ajuste para las extracciones de N totales y por el grano muestra como se obtienen valores de r^2 significativos para el grano y el total, no siendo así para la planta sin mazorca (curva no representada). Se trata de un comportamiento habitual en cereales, que Arregui (2006) observa también en trigo y cebada. Se puede apreciar un ajuste lineal-meseta (1994) y cuadrático-meseta (1995) de las curvas de respuesta de las extracciones en N por el grano a la dosis de abonado con una zona de respuesta hasta determinada dosis umbral a partir de la cual no se obtiene un incremento de extracciones. En 1996, en cambio, el volumen de las extracciones aumentó con las cuatro dosis de abonado N ensayadas.

Makowski *et al.* (1999) entre otros autores sugieren que las extracciones de N primero crecen linealmente con el aumento de la dosis de N aportada. Luego presentan una reducción de la tasa de crecimiento a partir de una dosis crítica de N (Makowski *et al.*, 1999). Las curvas obtenidas mostrarían que en 1996 no se alcanzó la dosis crítica con las ensayadas. Ambos comportamientos son semejantes a los que se observaron para el rendimiento en grano.

El error experimental puede haber distorsionado ligeramente los resultados, sobretodo de las extracciones por parte de la planta sin mazorca: tamaño del muestreo de la biomasa, dificultad en la toma de la muestra de planta sin mazorca representativa para la determinación del N y las extracciones por parte del zuro y de las raíces, ambas despreciadas, podrían explicar en parte los valores bajos de las extracciones por el grano respecto al total de la planta.

3.2.7. Diagnostico de la fertilidad en planta: SPAD y NO_3^- en la base del tallo

Los dos años en los que se evaluó indirectamente el contenido en N en la hoja (mediante unidades **SPAD**) en floración se detectaron respuestas a la aportación de abonado nitrogenado (Tabla I.12). Las unidades SPAD aumentaron con la dosis de abonado nitrogenado hasta alcanzar un valor crítico, correspondiente a la cantidad de fertilizante necesaria para conseguir el máximo rendimiento (Figura I.16). En 1995, este valor crítico fue de 53,5 alcanzado a partir de la dosis de 100 kg N ha⁻¹. En 1996, el valor SPAD meseta fue de 51,2, obtenido con la dosis 200 kg N ha⁻¹, pero siguió aumentando, con una pauta similar a la que del rendimiento en grano, sin ser por ello significativo estadísticamente. La dinámica de los resultados fue parecida a la que obtuvieron otros autores como Piekielek y Fox. (1992), Piekielek *et al.* (1995), Blackmer y Schepers *et al.* (1994) y Varvel *et al.* (1997a), que observaron una falta de respuesta a dosis de N superiores a un valor determinado y detectaron de esta manera las carencias de N.

Estos últimos autores obtuvieron, como en Torregrossa, unidades SPAD distintas los tres años que duró su estudio. Estas diferencias podrían venir explicadas por Schepers *et al.* (1992), Piekielek *et al.* (1995) y Binder *et al.* (2000) cuando subrayan que las lecturas SPAD pueden variar con la fertilidad nitrogenada pero, además, con el color característico del cultivar, con el estadio fenológico, con los daños por insectos o con las condiciones ambientales del cultivo. Para reducir el efecto estos distintos factores sobre el nivel de clorofila, Schepers *et al.* (1992) y Blackmer y Schepers (1995) recomiendan calcular el SPAD relativo (relación entre la media de cada unidad experimental y la media de las lecturas para el tratamiento teóricamente no limitante). Esta metodología permite

analizar los resultados en base al gráfico de Cate-Nelson. No obstante, son pocos los agricultores que están dispuestos a sobrefertilizar una parte representativa de su parcela.

Los resultados obtenidos, representados en las Figura I.16, permiten afirmar que, en las condiciones de cada una de las campañas, las dosis 100 y 200 kg N ha⁻¹ respectivamente fueron suficientes para obtener unos rendimientos en grano máximos. Aportaciones de abonado nitrogenado mayores fueron excesivas. Las lecturas SPAD avisaron del posible peligro de lixiviación o de las precauciones a tomar en el abonado de fondo de la campaña siguiente (Varvel *et al.*, 1997a). Aportaciones inferiores, en cambio, pueden considerarse insuficientes (Blackmer y Schepers, 1994) y en este caso, las lecturas SPAD sirvieron para detectar las deficiencias. Los resultados obtenidos permiten sugerir unas unidades SPAD de entre 52 y 53 unidades como nivel crítico en los regadíos del Canal d'Urgell y para el cultivar Juanita en floración, similares a las 52 unidades que recomiendan Piekielek *et al.* (1995). Con dosis superiores a las necesarias para alcanzar este nivel crítico hay una alta probabilidad de haber aportado un exceso de N.

Tabla I.12. Valor de lectura SPAD en floración 1995 y 1996 y contenido en nitratos en la base del tallo de maíz en cosecha los tres años de ensayo (1994-96) según la dosis de nitrógeno aportada.

Tratamientos (kg N ha ⁻¹) y estadística	SPAD		NO ₃ ⁻ -N en la base del tallo		
	1995	1996	1994	1995	1996
				<u>g kg⁻¹</u>	
0	41.2 A	35.0 A	0.02 A	0.0007A	0.03 A
100	53.1 B	43.6 B	0.16 A	0.02 A	0.03 A
200	54.3 B	51.2 C	1.35 AB	1.78 AB	0.17 AB
300	53.3 B	54.0 C	2.78 B	2.99 B	0.90 B
Media	50.5	45.9	1.08	1.13	0.28
LSD	7.8	4.5	1.9	1.6	—
Significación	*	**	*	*	NS
Contrastes:					
0 vs otros	**	**	NS	*	—
Cuadrático	*	NS	NS	NS	—
	<u>ANOVA para el conjunto de los años</u>				
Año (Y)		*		**	
Tratamiento (N)		**		**	
Y * N		NS		NS	

*, ** Significativo para P<0,05 y P<0,01 respectivamente. NS, no significativo.

Estos resultados muestran la utilidad que pueden tener las lecturas SPAD en floración (VT-R2) ya que permiten identificar la dosis más adecuada para la campaña siguiente. Al planificar la fertilización será preciso tener en cuenta que una aportación del fertilizante

fraccionada responde mejor a las necesidades fisiológicas de la planta. Entonces, una lectura en V6 permite ajustar las aportaciones a realizar en cobertera, a pesar de ser menos precisa (Piekielek *et al.*, 1995).

La Tabla I.12. muestra también el **contenido en nitratos de la base del tallo** en madurez fisiológica los tres años de estudio. La dosis de N aportada afectó la concentración de nitratos en 1994 y 1995. Los contenidos en nitratos fueron mínimos (0,0007-0,16 g NO₃⁻-N kg⁻¹) los dos primeros años para la dosis 0 y 100 kg N ha⁻¹ y aumentaron con las dosis superiores hasta los 2,78 (1994) y 2,99 g NO₃⁻ kg⁻¹ para las dosis 300 kg N ha⁻¹. En 1996 los valores cercanos a 0 g kg⁻¹ correspondieron a las dosis 0, 100 y 200 kg N ha⁻¹, y aumentaron ligeramente para la dosis 300 kg N ha⁻¹.

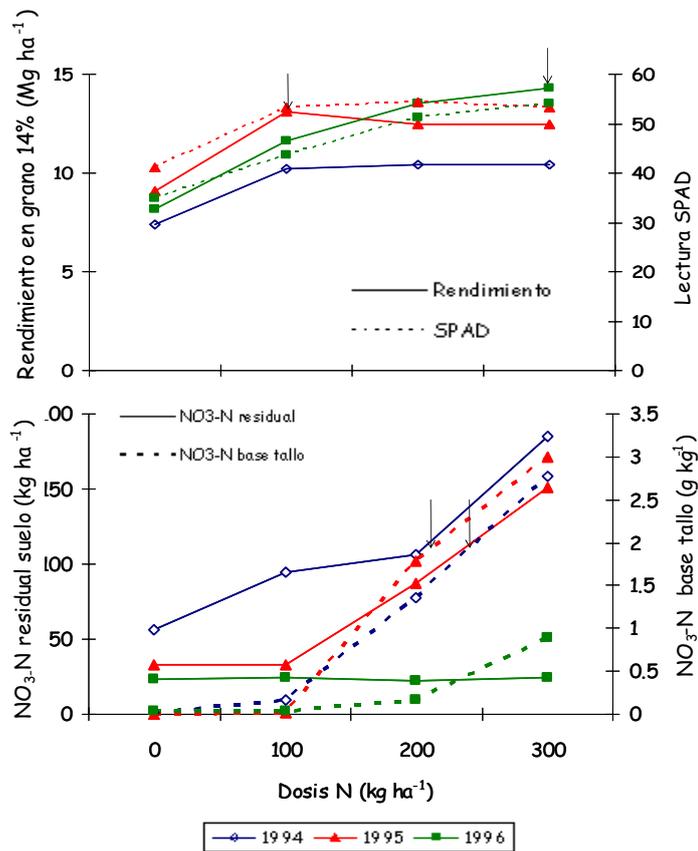


Figura I.16. Lecturas SPAD, rendimiento en grano, concentración de nitratos en la base del tallo y NO₃⁻-N residual en el suelo (0-120 cm) en función de la dosis de abonado N los tres años de ensayo (1994-96). Se han señalado con una flecha los valores máximos SPAD y el punto a partir del cual los contenidos de nitratos en la base del tallo superan los 2,0 g NO₃⁻-N kg⁻¹.

La Figura I.16 muestra la relación entre la concentración de nitratos en la base del tallo y la dosis de abonado nitrogenado, con un cambio brusco alrededor de un nivel crítico, similar al que exponen Binford *et al.* (1990). Binford *et al.* (1992b), concretaron que este cambio de respuesta se produce en el intervalo 0,7-2,0 g NO₃⁻-N kg⁻¹ en las condiciones del Corn Belt-USA y que indica si la dosis de fertilizante es suficiente o insuficiente para conseguir el máximo rendimiento. Las plantas con deficiencias en N traslocan el NO₃⁻ de la parte inferior del tallo durante el llenado de grano mientras que las plantas que disponen de un exceso de N no precisan hacerlo, observándose una acumulación de nitratos en la base del tallo (Binford *et al.*, 1990).

El análisis de la concentración de nitratos en la base del tallo aporta una medida rápida y fácil de identificar el exceso de N disponible. Concentraciones elevadas son resultado directo de un exceso de N durante el período de crecimiento de la planta. Un contenido de N disponible para la planta por encima del necesario para rendimientos máximos esta sujeto a lixiviaciones (Blackmer y Schepers, 1994). Según los niveles de Binford *et al.* (1992b) el nivel de nitratos en la base del tallo en este estudio mostró una deficiencia de N disponible para la planta en los tratamientos 0 y 100 kg N ha⁻¹ en 1994 y 1995 y 0, 100 y 200 kg N ha⁻¹ en 1996. Los niveles fueron adecuados para obtener un máximo rendimiento con la dosis 200 kg N ha⁻¹ en 1994 y 1995 y 300 kg N ha⁻¹ en 1996. Finalmente las lecturas correspondientes a las dosis 300 kg N ha⁻¹ en 1994 y 1995 sobrepasaron el punto en que el N disponible pasa a ser excesivo para las necesidades de la planta y pueden perderse por lixiviación (Varvel *et al.*, 1997a). Estas observaciones tienden a ser algo más restrictivas que las que se han anotado anteriormente para el rendimiento en grano. Convendría analizar datos de distintos años y localidades y dosis de N intermedias para determinar los valores críticos para los regadíos del Urgell o para poder afirmar que los valores críticos evaluados en otras áreas de producción son aplicables en la zona de estudio.

Así, este análisis de nitratos en la base de los tallos permitiría detectar excesos y deficiencias, evaluar al final de la campaña si el abonado nitrogenado se ha planificado correctamente y puede ayudar al ajuste de las recomendaciones los años siguientes. Evitando estos excesos, aumentarían la eficiencia del fertilizante y reducirían los problemas medioambientales correspondientes (Binford *et al.*, 1990).

En la Figura I.16 se han representado conjuntamente lecturas SPAD en floración, la concentración de nitratos en la base del tallo en madurez fisiológica, el rendimiento en grano y el NO₃⁻-N residual en el suelo para los tres años. Se puede apreciar como cada

año, las curvas de la concentración en nitratos en la base del tallo al final del cultivo y las del $\text{NO}_3\text{-N}$ residual en el suelo al final del ciclo productivo fueron prácticamente paralelas, mostrando un exceso de NO_3^- a partir de determinada dosis de fertilizante nitrogenado. Los tres años, los ambos valores aumentaron a partir de las dosis con las que se obtuvieron rendimientos y lecturas SPAD meseta. Ambas concentraciones siguieron incrementándose con las dosis suplementarias de N a pesar de que lecturas SPAD y rendimientos de grano se hayan estabilizado. Se alcanzó el valor crítico ($2,0 \text{ g NO}_3\text{-N kg}^{-1}$) propuesto por Binford *et al.* (1992b) con dosis de fertilizante nitrogenado superiores a las que dieron lecturas SPAD y rendimientos meseta y plantas con concentraciones en $\text{NO}_3\text{-N}$ en la base del tallo inferiores al valor crítico ($0,7 \text{ g}$) no presentaron sistemáticamente deficiencias de N. Estos resultados mostrarían que convendría ajustar el intervalo propuesto a las condiciones propias de los regadíos de la zona. El N residual en el suelo al final del ciclo productivo, en cambio coincide más con los rendimientos obtenidos: es bajo cuando la dosis de fertilizante N es baja o suficiente para obtener rendimientos máximos y aumenta con las dosis superiores. Varvel *et al.* (1997a) obtuvieron respuestas al abonado nitrogenado similares.

3.3. Balance N y eficiencia del N

Siguiendo la metodología descrita (apartado 2.2.9) se ha estimado que durante el cultivo de 1994 se mineralizaron 35 kg N ha^{-1} , 93 kg N ha^{-1} en 1995 y 119 kg N ha^{-1} en 1996. Como aportaciones de N por el agua de riego se han considerado 45 kg N ha^{-1} en 1994, 35 kg N ha^{-1} en 1995 y 50 kg N ha^{-1} en 1996.

En la Tabla I.13 se puede apreciar como las variaciones del contenido en N mineral en el perfil del suelo (0-120 cm) fueron distintas según los años. Comparando los valores medios para el conjunto de los tratamientos hubo un aumento del contenido de N mineral en 1994 y 1996 mientras que en 1995 una reducción mínima. En los tratamientos fertilizados, el balance de N osciló entre -33 y 70 kg N ha^{-1} en 1994, entre -27 y 22 kg N ha^{-1} en 1995 y entre 41 y 86 kg N ha^{-1} en 1996. Las variaciones no mostraron diferencias significativas en función del tratamiento ninguno de los tres años de estudio. En la Tabla I.13 se puede observar como, en general, hubo un enriquecimiento del contenido en N mineral después de cada campaña y para cada tratamiento salvo en el tratamiento 100 kg N ha^{-1} en que hubo pérdidas en 1994 y 1995 y en el tratamiento 300 kg N ha^{-1} en 1995.

Estos resultados son difícilmente comparables con los que se han obtenido en otros estudios en la zona (Berenguer *et al.*, 2006), regados por aspersión, donde se eliminaron

los residuos de planta después de la cosecha de grano y se contabilizó el $\text{NO}_3\text{-N}$ en un perfil de 0-90 cm de suelo. Sugieren que la variabilidad de resultados estaría relacionada con las condiciones de cada campaña y el manejo del cultivo.

Tabla I.13. Análisis de varianza para la variación del contenido en N mineral en el suelo (0-120 cm) (Δ NMIN), la eficiencia en el uso del fertilizante nitrogenado (EUN) y la eficiencia en el uso del N disponible (EUN) bajo 4 dosis de abonado nitrogenado (0, 100, 200, 300 kg ha^{-1}) los tres años de estudio (1994-96). Análisis de varianza conjunto de los tres años.

Dosis N (kg ha^{-1}) y estadísticos	Δ NMIN	Δ NMIN real	EUN	EU Ndisp
	kg N ha^{-1}	kg N ha^{-1}		kg kgN^{-1}
1994				
0	0	75 A	-	35 A
100	-33	78 A	0.86	31 A
200	49	173 B	0.51	29 AB
300	70	204 B	0.42	22 B
Media	21	133	0.60	29
LSD	-	51	-	7
Significación	NS	**	NS	*
1995				
0	0	108 A	-	41 A
100	-25	146 AB	1.30 A	37 AB
200	22	186 AB	0.67 B	31 B
300	-27	217 B	0.75 B	23 C
Media	-8	164	0.91	33
LSD	-	-	0.35	7
Significación	NS	NS	*	**
1996				
0	0	124 A	-	40
100	41	190 B	0.56	44
200	70	264 C	0.66	40
300	86	337 C	0.71	34
Media	49	229	0.064	39
LSD	-	22	-	-
Significación	NS	**	NS	NS

*, ** Significativo para $P < 0,05$ y $P < 0,01$ respectivamente. NS, no significativo.

Los valores negativos obtenidos en 1994 y 1995 coinciden, para la dosis 100 kg N ha^{-1} , con el valor meseta detectado para el rendimiento y las extracciones de N por parte de la planta (apartado 3.2.6) con extracciones máximas respecto a la dosis de fertilizante aplicada. En 1994, además, el $\text{NO}_3\text{-N}$ en el suelo al final del ciclo fue elevado. En 1995 y la dosis 300 kg N ha^{-1} , el valor negativo del balance viene determinado por unas

extracciones y un contenido final de NO_3^- -N en el suelo importantes. Atendiendo a las observaciones de Arregui *et al.* (2006) estos valores negativos podrían indicar la existencia de entradas de N no consideradas en el balance. A partir de 1995 se podría contemplar que la cantidad de N mineralizado, considerada homogénea en todos los tratamientos por simplificación, fue probablemente distinta según los tratamientos. Teniendo en cuenta que los restos de planta se picaban e incorporaban al suelo después de la cosecha, pero que la cantidad de paja producida aumentaba con la dosis de fertilizante, la cantidad de materia orgánica y el consiguiente N mineralizado no fue el mismo en todas las parcelas. Arregui (2006) hace el mismo tipo de observaciones en trigo y cebada cuando indica que esta asunción no es del todo correcta y Ma *et al.* (1999b) resaltan que estas simplificaciones también pueden ser excesivas en maíz.

Por otra parte, en los años o tratamientos en los que se ha detectado un enriquecimiento del NO_3^- -N en el suelo, los resultados avisan de un potencial riesgo de lixiviación de nitratos posterior al cultivo, durante el invierno. Según Arregui *et al.* (2006) también avisan que unas salidas del balance de N no han sido cuantificadas. En las condiciones del ensayo, se trataría principalmente del N perdido por lixiviación durante el cultivo, no medido. En 1994, estos valores coincidieron con los tratamientos 200 y 300 kg N ha⁻¹ que no mostraron un aumento de rendimiento de grano a pesar de incrementar la dosis de fertilizante. Este año, las extracciones fueron particularmente reducidas. Ferrer *et al.* (2003), en sus ensayos en maíz en una zona próxima y en suelos similares, ya avisaban que las pérdidas de N por lixiviación podría haber sido mucho mayores ya que el NO_3^- -N del suelo no fue usado por el cultivo y no se acumuló en madurez. Además, este abono nitrogenado suplementario, no aprovechado por el cultivo y residual en el suelo en el momento de la cosecha pudo participar al enriquecimiento en nitratos de la capa freática durante el periodo intercultivo, aunque la pluviometría durante el invierno fuera reducida. En 1995, únicamente se detectó acumulación de N mineral en el perfil del suelo durante el cultivo para la dosis 200 kg N ha⁻¹. La instalación de sondas de succión permitió detectar riquezas en nitratos en la solución del suelo particularmente elevadas para este tratamiento y hacen suponer importantes pérdidas de nitratos por lixiviación debidas a las altas dosis de riego a lo largo del cultivo. Durante el periodo intercultivo (cosecha 1995-siembra 1996) se registraron unos meses con lluvias particularmente importantes que podrían haber provocado una lixiviación de nitratos y explicaría los niveles bajos de N

mineral en el suelo al inicio de la tercera campaña (Abad, 2004) y su enriquecimiento durante el ciclo de cultivo, a pesar de las elevadas extracciones.

Según Addiscott *et al.* (1991), durante el ciclo de cultivo, las pérdidas de N mineralizado podrían haber sido mínimas comparado con las de N mineral debido a la sincronización entre la liberación del N y la extracción de N por el maíz, importante. Por otra parte, según Jarvis *et al.* (1989) y Addiscott *et al.* (1991), al enterrar los residuos de planta se reducen considerablemente las pérdidas por lixiviación. Los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica necesitan parte del N del suelo que, de otra manera, estaría lixiviable. Enterrar los residuos añade un factor adicional que complica la comprensión del balance del N.

Estas observaciones muestran las limitaciones de la metodología aplicada para la evaluación del balance de N en las condiciones del ensayo. El sistema de riego, impreciso, la falta de control del volumen lixiviado, la incorporación de los residuos y su posterior mineralización implican demasiados parámetros no cuantificados y simplificaciones excesivas. Timsina *et al.* (2001) sugieren que es probable que el balance sea ampliamente influido por las pérdidas de N y por las entradas de N que no fueron medidas directamente.

Por ello se evaluó un **Balance "real"** donde solo se tuvieron en cuenta las extracciones de N por el grano, siguiendo las indicaciones descritas en el apartado 2.2.9, y que intenta ajustarse a la realidad del ensayo. La planta sin mazorca, incorporada al suelo poco después de la cosecha, pasó por un proceso de inmovilización del N o mineralización negativa y, posteriormente, una liberalización de N o mineralización positiva (Jarvis *et al.*, 1996; Arregui, 2006). Este proceso no se midió pero las condiciones climáticas indican que la mineralización debió ser reducida los primeros meses después de la cosecha (otoño e invierno) y se prolongó durante el ciclo de cultivo siguiente. Entonces, coincidiendo con las temperaturas elevadas de primavera y verano y la humedad del riego, se aceleró. El Δ NMIN_{real} aumentó con la dosis de abonado todos los años y muestra como el riesgo de lixiviación de nitratos aumenta con las dosis elevadas de fertilizante.

Otros estudios llevados a cabo en la zona (Villar *et al.*, 2000; Villar *et al.*, 2002; Ferrer *et al.*, 2003 y Berenguer, 2006) comentan la importancia medioambiental y económica de

ajustar la fertilización nitrogenada en el maíz en regadío y la necesidad de disponer de herramientas de detección de la acumulación de NO_3^- -N que permitan ajustar las aplicaciones necesarias. Estos métodos de diagnóstico pueden basarse en el análisis de suelo (Magdoff, 1991; Binford *et al.*, 1992a) o de planta (Justes *et al.*, 1997; Plénet y Desvignes, 2000; Arregui, 2006)

La **Eficiencia en el Uso del fertilizante Nitrogenado** (EUN) varió entre 0,42 y 1,3 (Tabla I.13) y únicamente respondió a las dosis de fertilizante en 1995. Generalmente, las EUN tuvieron una relación inversa con la cantidad de fertilizante aportado y, se alcanzó la máxima eficiencia con la dosis que podía producir los máximos rendimientos, atendiendo a las indicaciones de Broadbent y Carlton, 1978. Los valores de EUN calculados son algo inferiores a los que obtuvieron Ferrer *et al.* (2003) a proximidad. En cambio son particularmente altos si se comparan con los que Berenguer *et al.* (2006) evaluaron en otro ensayo en la región pero regado por aspersión. En condiciones de riego por inundación como en Torregrossa, la EUN reduce debido a las sustanciales pérdidas por lixiviación que se producen (Timsina *et al.*, 2001).

La cantidad de N aportada por el agua de riego (entre 35 y 50 kg N ha⁻¹) y por la mineralización de la materia orgánica o de la planta sin mazorca enterrada (35 kg N ha⁻¹ en 1994, 93 kg N ha⁻¹ en 1995 y 119 kg N ha⁻¹ en 1996) podrían explicar estos valores elevados ya que no son contabilizados en el denominador al calcular la EUN. En 1995 para la dosis 100 kg N ha⁻¹ se obtuvo una EUN de 1,3, particularmente alta. Este valor podría venir explicado por unas extracciones de N (apartado 3.2.6) 70% superiores a las del testigo (0 kg N ha⁻¹) y similares a las que se midieron al duplicar el tratamiento (200 kg N ha⁻¹). En estas condiciones, además, las aportaciones de N durante el cultivo no contabilizadas en el cálculo de la EUN (agua de riego + mineralización) fueron del orden de 130 kg N ha⁻¹ lo que equivaldría a más que duplicar la dosis de abonado, sin tener en cuenta el contenido en NO_3^- -N en el suelo. Como ejemplo, si se hubiera contado con todo el N aportado durante el cultivo (fertilizante + agua de riego + mineralización) al calcular la EUN, esta hubiera sido de 0,57, valor sensiblemente inferior. La EUN se reduce considerablemente cuando el contenido en nitratos del suelo de diferentes orígenes supera las necesidades del cultivo.

Estas diferencias sugieren que la evaluación de la EUN no es fácil y depende de las condiciones del área de estudio (Abad, 2004). Ma *et al.* (1999a) subrayan que, al no

reflejar los efectos de la mineralización y la inmovilización del N en el suelo (Liang y McKenzie, 1994), se sobre-estima la EUN. Pierce y Rice, en 1988, advirtieron que en las rotaciones, las eficiencias en el uso del N son difíciles de calcular dado que el N disponible proviene de distintas fuentes. En el caso de este monocultivo de tres años de maíz, en el que se incorporaba un volumen importante de residuos de planta, el N también tendría distintos orígenes, dificultando la evaluación de la EUN.

La cantidad de fertilizante aplicado no se considera directamente en el cálculo de la **Eficiencia en el Uso del N disponible** (EU Ndisp) (Tabla I.13) por lo que, al estudiar esta eficiencia los valores se refieren al N que realmente ha estado disponible para el cultivo en vez del que ha sido aportado (Moll *et al.*, 1982; Huggins y Pan, 1993). El rendimiento en grano obtenido por cada unidad de N retenida por el sistema suelo-planta osciló entre 22 y 41 kg kg⁻¹N. En 1994 y 1995 se detectaron diferencias entre tratamientos y los valores decrecieron con el aumento de dosis de fertilizante. A partir de la dosis 100 kg N ha⁻¹ esta disminución estuvo asociada a un aumento de las extracciones y del contenido de NO₃⁻-N en el suelo a pesar de una estabilización de los rendimientos. Estos resultados coinciden con Huggins y Pan (1993) que indican que, normalmente, a medida que aumenta el N disponible para el cultivo, disminuye su eficiencia; podría ser a causa de aportaciones excesivas de fertilizantes (Arregui, 2006), de una acumulación de N_{mzdo} debido al historial de la parcela (Kumar y Goh, 2002) o de la calidad del agua utilizada para regar.

4. CONCLUSIONES

En relación al efecto del abonado nitrogenado en el maíz:

- Se obtuvieron rendimientos máximos de 10,4 y 13,1 Mg ha⁻¹ en 1994 y 1995 con dosis de 100 kg ha⁻¹ y de 13,5 Mg ha⁻¹ en 1996 con 200 kg ha⁻¹. Estas dosis permitirían reducir cuantitativamente las aportaciones de N y los problemas medioambientales correspondientes en los regadíos estudiados. Dosis de 300 N kg ha⁻¹, frecuentes, son generalmente excesivas en las condiciones del Canal d'Urgell.
- El rendimiento del cultivo respondió a los aumentos de dosis de la fertilización nitrogenada ajustándose a los modelos lineal-meseta o cuadrático-meseta según los años. Ambos modelos mostraron una zona de respuesta a la dosis de abonado hasta determinado valor umbral a partir del cual no se observó aumento en el rendimiento. La dosis umbral obtenida aplicando el modelo lineal-meseta en 1994 y 1995 fue de 105 y 100 kg N ha⁻¹ respectivamente; en 1996, se ajustó mejor el modelo cuadrático-meseta con una dosis umbral de 302 kg ha⁻¹.
- La dosis de abonado afectó a la acumulación de N en las distintas partes de la planta. El N se acumuló primero en el grano (rendimiento y riqueza). Con dosis superiores a la dosis umbral, el maíz tendió a absorber más nitrógeno y repercutió en un aumento de la riqueza en N del grano y en un incremento de las extracciones.

En relación al efecto del abonado nitrogenado en el suelo:

- El NO₃⁻-N residual en el suelo al final del cultivo tendió a aumentar con la dosis de fertilizante nitrogenado. Intervinieron, además, el contenido inicial de nitratos, el historial y el manejo de la parcela y las extracciones.
- Un ajuste de la dosis de fertilizante nitrogenado en función del nitrógeno nítrico residual en el suelo al inicio de la campaña permitirían reducir las pérdidas de N en el sistema.
- En las condiciones del estudio, la reincorporación en el suelo de los residuos de la planta después de la cosecha de grano (stover o "cañota") provocó un aumento del contenido en materia orgánica y del contenido de N en el horizonte superficial (0-30 cm). Se evaluó una mineralización neta entre la siembra y la cosecha del maíz de 35 kg ha⁻¹ en 1994, 93 kg ha⁻¹ en 1995 y 119 kg ha⁻¹ en 1996.
- Conviene contabilizar las aportaciones del agua de riego cuando éstas presentan un contenido en NO₃⁻ considerable. El agua del riego aportó entre 8 y 40 mg NO₃⁻-N L⁻¹ que corresponderían a una media de 45 kg N ha⁻¹ cultivo⁻¹.

- El contenido en NO_3^- -N de la solución del suelo a 120 cm de profundidad llegó a ser de 100 mg L^{-1} . Desde el punto de vista de la lixiviación de nitratos, el periodo de más riesgo de lavado va desde la aportación del abonado nitrogenado de fondo hasta el momento de máxima absorción de N por la planta (R2). Este riesgo estuvo asociado a la dosis de fertilizante nitrogenado.

Respecto a las estrategias y herramientas utilizadas para mejorar la eficiencia del N en el maíz:

- En las condiciones del ensayo, valores críticos del PSNT de 25 ó $32 \text{ mg NO}_3^- \text{-N kg}^{-1}$ fueron correctos los dos primeros años; el tercer año, un PSNT de $45 \text{ mg NO}_3^- \text{-N kg}^{-1}$ se adaptó mejor. Conviene considerar un valor de PSNT crítico adaptado a las condiciones de producción.
- Las lecturas SPAD indicaron un nivel crítico de 52-53 en floración para el maíz en los regadíos del Canal d'Urgell y coincidieron con la zona meseta de los rendimientos.
- En las condiciones del ensayo, el contenido en nitratos de la base del tallo en madurez fisiológica mostró un nivel crítico situado en el intervalo $0,7\text{-}2 \text{ g NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$. Son necesarios más estudios para validar los resultados, combinando campañas, localidades y cultivares.

CAPÍTULO II

El valor de sustitución de Nitrógeno de la alfalfa en las condiciones de regadío mediterráneas

Nitrogen replacement value of alfalfa
in irrigated Mediterranean conditions

NITROGEN REPLACEMENT VALUE OF ALFALFA IN IRRIGATED MEDITERRANEAN CONDITIONS

Abstract

In crop rotations based on alfalfa (*Medicago sativa* L.), the current agronomic and environmental concerns emphasize the need to determine the N fertilizer value of this legume. This value is a necessary tool for reducing production costs and increasing the sustainability of cropping systems. A 4-year study was conducted on a Typic Xerofluvent soil to determine the N-equivalent or the fertilizer replacement value (FRV) of a two-year alfalfa crop on subsequent crops of maize (*Zea mays* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) in an alfalfa-maize-wheat rotation. Maize production after alfalfa outyielded monoculture maize at all four rates of N fertilizer application analyzed in the study (0, 100, 200 and 300 kg N ha⁻¹). The FRV of two-year alfalfa for maize was 160 kg N ha⁻¹. The beneficial effects of growing alfalfa lasted, at least, two cropping seasons, because the wheat that was grown after the maize, and whose previous crop was alfalfa, outyielded that grown after maize in monoculture. The FRV of alfalfa for wheat that followed maize after alfalfa was estimated at approximately 76 kg N ha⁻¹. The soil nitrate NO₃⁻-N content after alfalfa was 85 kg N ha⁻¹ higher than the soil nitrate NO₃⁻-N content with continuous maize production (48 kg N ha⁻¹). This greater amount of soil nitrate persisted in the second crop after alfalfa and was probably one of the reasons for the better maize and wheat yields associated with the alfalfa rotation. Other factors such as the rotation effect or the slower release of N from alfalfa residues may also help to explain the observed differences. These results highlight the interest in rotating alfalfa with maize and its potential contribution to making savings in the use of N fertilizer and increasing crop yield.

Abbreviations: FRV, fertilizer replacement value.

The beneficial effects of cultivating legumes in order to enhance the productivity of subsequent crops have been recognized for centuries (Farmer, 1913; Francis and Clegg, 1990). It is also generally accepted that at least a part of this increase in productivity can be attributed to the N contribution from the legume. A 10 to 50% yield increase in production has been observed for non-legume crops grown after legumes as opposed to non-legume monoculture (Hesterman, 1988; Triboi and Triboi-Blondel, 2004).

In addition to this contribution of N, legume plowdown is also beneficial in breaking disease cycles, contributing to the accumulation of soil organic matter, and improving soil structure (Bruulsema and Christie, 1987; Bullock, 1992).

Growing maize after alfalfa is a common practice in several areas of the world, while the effects of growing alfalfa on subsequent maize production have mainly been studied and quantified in the US Midwest (Munson, 1978; Baldock and Musgrave, 1981; Bruulsema and Christie, 1987; Hesterman et al., 1987; Fox and Piekielek, 1988; El-Hout and Blackmer, 1990; Harris and Hesterman, 1990; Bundy and Andraski, 1993) and in a particular areas of France and The Netherlands (Spiertz and Sibma, 1986; Justes et al., 2001).

The response of maize in N fertilizer trials involving the cultivation of maize after alfalfa show that maximum maize yields often are achieved with the addition of little or no extra N fertilizer (Peterson and Russelle, 1991; Bundy and Andraski, 1993; Kelling et al., 1993).

However, although cultivating alfalfa has a positive effect upon subsequent maize crops, with a clear reduction in the amount of N fertilizer required and with higher yields than in monoculture, many producers apparently still do not fully accept that N is supplied by previous alfalfa crops (Peterson and Russelle, 1991).

Producer's profits are reduced by not taking into account this N from alfalfa while significant amounts of N may also be lost to the environment (Bundy and Andraski, 1993). It is difficult to understand why N fertilizer recommendations do not usually refer to these credits and why producers do not take them into account. As a result, maize grown after alfalfa is more likely to be over-fertilized than maize grown after other crops

(Blackmer, 1989). It is perhaps important to highlight that in some locations, the practice of adding extra fertilizer as an insurance against possible yield losses is considered a good practice and the mark of a good producer (Bundy and Andraski, 1993). Similar observations have been reported in Spain. A survey conducted in the main irrigated alfalfa growing areas showed that 90% of producers believe that growing alfalfa increases subsequent maize yields, although only 25% of these farmers subsequently reduce their rates of N fertilization (Alvaro and Lloveras, 2003).

A traditional way to evaluate the value bestowed by alfalfa to subsequent crops is the fertilizer N-equivalent or N-fertilizer replacement value (FRV); the amount of fertilizer N required to achieve the same yield in continuously cultivated maize as attained by non-N-fertilizer maize grown after a legume (Lory et al., 1995a; Valvel and Wilhelm, 2003). This FRV value can, however, change according to growing conditions: reported values ranged from 0 to 187 kg ha⁻¹, depending on such factors as the location and the duration and quality of the alfalfa crop (Sutherland et al., 1961; Munson, 1978; Baldock and Musgrave, 1980; Kurtz et al., 1984; Bruulsema and Christie, 1987; Fox and Piekielek, 1988; Kelling et al., 1993).

The alfalfa contribution effect may last for more than one year (Harris and Hestermann, 1990; Gault et al., 1995). Fox and Piekielek (1988) reported that the residual effect of fertilizer N equivalence from alfalfa to the second year of maize production following cultivation of a legume ranged from 67 to 89 kg ha⁻¹, whereas according to Kurtz et al. (1984), alfalfa influenced the second crop grown after maize by allowing the reduction in the amount of N from 22 to 56 kg N ha⁻¹.

The results of the researches presented above show that soil nitrate concentrations increased with an increase in the age of the alfalfa (Blackmer, 1989). However, the amount of N added to the soil by alfalfa due to its nitrogen-fixing capabilities varies according to the weather, soil conditions and crop management system employed (CASC, 2000). As a rule of thumb, about $\frac{2}{3}$ of the N content of the alfalfa crop is harvested as aerial biomass whereas $\frac{1}{3}$ is left in the soil and is theoretically available to the next crop (Munson, 1978). According to Gault et al., (1995), alfalfa contributed at least as much fixed nitrogen to the soil as was removed as harvested hay. It is clear that alfalfa contributes substantial quantities of N to subsequent grain crops, but there is uncertainty concerning the amounts in question (Morris et al., 1993).

Furthermore, Bullock (1992) and Baldock et al., (1981) concluded that rotations involving legumes do not provide as much N as fertilizer replacement methodologies estimate and

that much of the yield benefit which has been credited to the nitrogen contribution is actually due to other factors.

As indicated by Power (1990), the credit system used for legumes, when making N fertilizer recommendations, has generally been estimated on a state by state basis because of the amount of variation in potential N input by legumes.

The objective of this study was to determine the FRV associated with the short term cultivation of alfalfa and its influence on subsequent crops under irrigated Mediterranean conditions.

MATERIALS AND METHODS

Irrigated field experiments were conducted over four growing seasons (1994-1997) at the University of Lleida (UdL) - IRTA research fields at Torregrossa, Spain (41°34'51"N, 0°50'27"E), on Typic Xerofluvent soil.

Table 1. Mean monthly air temperatures (T_m) and total rainfall during the experiments[†].

Month	1994		1995		1996		1997	
	T_m	Rainfall	T_m	Rainfall	T_m	Rainfall	T_m	Rainfall
	- °C -	- mm -						
January	5,9	9,2	6,3	4,6	8,5	93,8	6,5	96,0
February	8,2	14,6	9,0	4,0	6,2	5,8	8,9	1,0
March	12,2	1,4	10,2	0,2	9,9	12,4	12,4	3,6
April	14,2	0,6	13,0	19,0	12,9	39,6	14,1	31,2
May	17,8	27,7	17,1	12,2	16,6	29,0	17,2	49,8
June	21,9	1,6	20,2	9,0	21,2	62,4	20,2	77,2
July	26,5	6,6	25,6	0,0	23,5	7,0	22,4	10,0
August	25,6	0,8	23,3	10,4	22,8	14,8	23,8	39,6
September	18,5	76,2	18,2	39,6	19,4	13,8	20,6	26,4
October	14,8	111,2	17,2	3,2	14,4	43,2	17,7	20,0
November	9,9	4,6	11,1	11,4	9,7	80,8	6,6	18,0
December	5,4	4,6	6,7	73,8	7,5	91,0	6,6	16,4
Average Temperature or total annual rainfall	15,4	259,1	14,0	187,4	14,1	493,6	15,1	389,2

[†] Long term (20 years) mean annual temperature and rainfall at Torregrossa were 14.7 °C and 369 mm, respectively.

The soil plow layer had a clay-loam texture with 239 g kg⁻¹ clay, 102 g kg⁻¹ organic matter content and a pH of 8.4. Initial levels of available K (NH₄Ac) and available P (Olsen method) were 162 and 14 mg kg⁻¹, respectively, whereas soil NO₃⁻-N was 42 kg ha⁻¹. The soil depth was about 120 cm. Mean monthly temperatures and total rainfall for

the 1994, 1995, 1996 and 1997 growing seasons and long-term averages are presented in Table 1.

To evaluate the N-fertilizer equivalent of the alfalfa, we designed a method for comparing monoculture maize with that grown after two years of producing alfalfa. The alfalfa-maize rotation and monoculture maize cultivation were established in 1994, with wheat subsequently being grown in the 1996-97 season.

The experimental design consisted of a split-split-plot design with four replications. The main plots were used for rotations of alfalfa-maize or monoculture maize, whereas four N fertilization rates were applied on the subplots for maize (0, 100, 200 and 300 kg ha⁻¹). For monoculture maize crops, these N rates were applied for three consecutive years on the same plots, whereas for the alfalfa-maize rotation, the N fertilizer rates were only applied in the third year when maize was planted after alfalfa.

In the alfalfa-maize rotation, alfalfa was grown for two years and in the third year maize was planted after plowing under alfalfa in winter. In the case of monoculture maize, the crop was grown for three consecutive years. As a result, comparisons between the two systems (alfalfa-maize vs monoculture maize) were only possible in the third year (1996). To evaluate the effects of growing alfalfa on a second crop after maize, all the plots were planted with wheat in the fourth year.

The whole plot size was 6m x 38m (including a 1m space separating subplots with different N rates for maize: as a consequence the size of each subplot was 6 m x 9 m. Each initial experimental plot of maize was split in two and two different N fertilizer rates (0 N and 100 kg ha⁻¹) were randomized before sowing the wheat crop.

Maize was sowed on 14th April 1994, 18th April 1995, and 26th April 1996, with a row distance of 75 cm and at a plant density of 75000 plants ha⁻¹. The 'Juanita' variety (Pioneer Hi-Bred) was used, which had been ranked among the most productive in the area in variety tests.

Maize was irrigated at 12 to 15 day intervals, depending on the irrigation turns of the area in question. Irrigation started 15 days before seeding, in order to prepare the soil, and had finished by mid September. A total of about 6500 m³ ha⁻¹ in 1994, 7000 m³ ha⁻¹ in 1995 and 8000 m³ ha⁻¹ in 1996 of water were applied.

Weeds in maize plots were controlled with Alachlor 35% + Atrazine 20% (6 l ha⁻¹) and hand weeding was carried out when necessary.

Soil insecticides, carbofuran 5% (10 kg ha⁻¹) and Diflubenzuron 25% (300 g ha⁻¹) were applied before seeding.

When the maize plants were at the V4-V5 stage, Chlorpyrifos 1.5 % (20 kg ha⁻¹) was used to control the European maize borer (*Ostrinia nubilalis* Hübener) and Mediterranean maize borer (*Sesamia nonagrioides* Lefevre).

The preseeding fertilizer for maize consisted of 87 kg ha⁻¹ of P and 166 kg ha⁻¹ of K respectively. N fertilization consisted of ammonium nitrate (33% N), whose application was split between preseeding and sidedress at six-leaf stage (V6) in order to increase the efficiency of N use.

In the case of wheat, the 'Cartaya' cultivar was used and was sown on 14th November 1996. The seeding rates were 450 seeds m⁻² with an inter-row spacing of 15 cm and a plot size of 3 m x 9 m.

Two N treatments were investigated; a control of 0 kg N ha⁻¹ and 100 kg N ha⁻¹. In this treatment, N was applied after tillering. The wheat was irrigated twice following established irrigation turns, it received a total of about 1500 m³ ha⁻¹ of water.

The grain yield of maize was evaluated by harvesting the three central rows of each plot using a Nurserymaster Elite plot combine adapted for a maize (HEGE Wintersteiger, Ried, Austria). The wheat yield was evaluated by harvesting a 1.5 m-wide central strip with a Nurserymaster Elite plot combine. Grain moisture level was measured from a 300 g sample (GAC II, Dickey-John, Auburn, Ill, USA) taken from each plot and grain yield was adjusted to 14% moisture.

The maize was harvested by 3rd October 1994, 28th September 1995, and 23rd October 1996 and the wheat was harvested by 15th July 1997.

In each year, maize residues were not removed from the field but ploughed under before the next crop.

'Aragon' alfalfa was seeded on 7th April 1994 with a seed rate of 30 kg ha⁻¹ and was ploughed under on 16th February, 1996. The crop was harvested four times in the first year and six in the second. The plot was the same size as the maize plots; 6 m x 38 m.

Preseeded fertilization consisted of applying 60, 87, and 250 kg ha⁻¹ of N, P and K, respectively, whereas annual fertilization applied in winter involved the application of 87 kg ha⁻¹ of P and 250 kg ha⁻¹ of K.

Preseeding herbicide consisting of benfluraline 18% (6 L ha⁻¹) was applied to the plots and in the second year weeds were controlled by applying hexazinone 90% (1 kg ha⁻¹) in January.

Insect control was achieved by spraying the plots twice or three times per year with fenvalerate 15% (0.1 kg ha⁻¹).

The plots were irrigated every 11-13 days from April to September according to local irrigation turns: a total of about 6500-7000 m³ ha⁻¹ of water was applied in each season to alfalfa.

Alfalfa forage production was estimated by harvesting two central strips of the whole plot using a plot harvested HALDRUP (Haldrup, Løgstor, Denmark).

A 200-g sample of herbage was collected from each plot at each harvest in order to determine the dry matter (DM) content.

To determine soil nitrate levels, soil samples were collected from each plot on two occasions during the growing season: first, before seeding the maize and wheat and then after their respective harvests, or after the plowing under the alfalfa. Soil samples were also taken before beginning the experiments.

Ten soil samples per plot were taken at depths of from 0 to 30 cm, and two soil samples per plot were taken at depths of from 30 to 60 cm, 60 to 90 cm and 90 to 120 cm, using Edelman cylindrical augers. Soil nitrates were extracted with water (1:1 soil/water ratio solution) and colorimetrically analyzed for NO₃⁻ using an Autoanalyzer (Anasol, ICA instruments. Paris. France).

The results were subjected to analysis of variance according to the General Linear Model procedure of Statistic Analysis System (SAS Institute, 1989).

RESULTS AND DISCUSSION

Fertilizer replacement value of alfalfa for maize grown after alfalfa

Maize yields for the different N fertilization treatments under monoculture maize and after cultivating alfalfa, are presented in Figure 1. Maize and alfalfa yields for the previous two years are presented in Table 2.

Table 2. Alfalfa (dry matter) and corn grain yields in the two years previous to the comparison between crop rotations.

Crop	Fertilizer treatment	1994	1995	Total
	kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹	
Alfalfa	-	7974	22738	30712
Corn	0	7443	9162	16605
	100	10213	13104	23317
	200	10357	12484	22841
	300	10359	12521	22880
ANOVA for the corn yield				
Sources of variation				
	Corn N fertilization	*	**	**
	Replication	NS	NS	NS
	Error	-	-	-

** , *significant at the 0.01 and 0.05 level, respectively. NS = non significant.

Nitrogen fertilization up to a rate of 100 kg N ha⁻¹ increased maize yields in 1994 and 1995, but there was no response to N applied at higher rates. Average grain yields for the area are between 11000 and 14000 kg ha⁻¹ (Villar et al., 2002; Dauden and Quilez, 2004). The lower grain yields in 1994 were due to a lack of water in the irrigation system by the end of the growing cycle.

The lack of response of corn yields at N application rates above 100 kg ha⁻¹ in 1994 and in 1995 was probably due to high soil NO₃⁻-N values before seeding: in 1994, the depth of 120 cm had an average N rate of 135 kg ha⁻¹, while in 1995, the level was 102 kg ha⁻¹. Our results show that even in irrigated areas, usual N recommendation rates of 250 – 300 kg ha⁻¹ based on plant extractions are not always needed.

Soil NO₃⁻-N content decreased with continuous maize cultivation (Table 3) and this was probably the reason for the larger response of maize to N fertilization in the last year

(1996) in comparison to the response observed in the two previous seasons (1994 and 1995). In the third growing season (1996), maize yields in monoculture adjusted very well to a second-degree polynomial. (Grain yield = $8174.5 + 40.278 \times (\text{N rate}) - 0.0664 \times (\text{N rate})^2$, $r^2 = 0.80$).

Table 3. Total soil nitrogen ($\text{NO}_3^- \text{N}$) from 0 to 120 cm, before the seeding of corn

Previous crop	Fertilizer treatment kg N ha ⁻¹	1994	1995	1996
		(beginning experiment)		(Comparison between rotations)
		kg ha ⁻¹ $\text{NO}_3^- \text{N}$		
Corn	0		94	49
	100		99	46
	200		105	49
	300		111	49
<i>Average</i>		<i>135</i>	<i>102</i>	<i>48</i>
Alfalfa		135	-	85
ANOVA				
Sources of variation				
Corn N fertilization (N)		NS	NS	
Replication (Rep)		NS	*	
Error		-	-	
Rotation (Rot)				**
Rep				NS
Error A				-
N				NS
N*Rot				NS
Error B				-

**, *significant at the 0.01 and 0.05 level, respectively. NS = non significant

In the last maize growing season (1996), monoculture yields were quite high (14273 kg ha⁻¹) for our conditions and were obtained with the application of 300 kg N ha⁻¹. However, it could be clearly seen that maize grown after alfalfa outyielded monoculture maize for all N fertilization application rates. Even so, the differences in maize yield between the two crop rotations decreased with increasing rates of N fertilization. The observed differences in yield between continuous maize crops and maize following alfalfa ranged from 4737 kg ha⁻¹ at 0 kg N ha⁻¹ to about 900 kg ha⁻¹ when maize was fertilized with 300 kg N ha⁻¹. This type of response, with higher maize yields after alfalfa or soybeans, has also been reported by other authors (Hesterman, 1988; Bundy and Andraski, 1993 and Varvel and Wilhelm, 2003) in the Midwest of the USA.

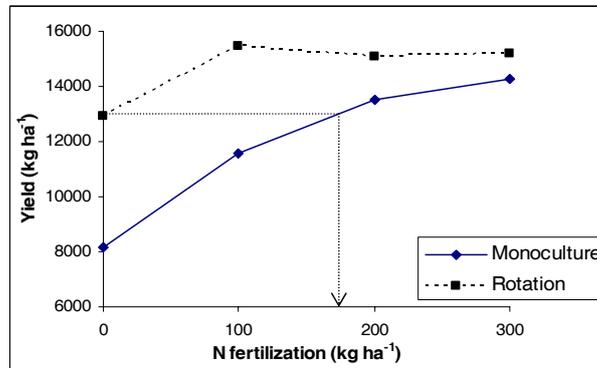


Figure 1. Grain yields of maize grown after alfalfa (rotation) or after Monocropped maize under four rates of N applied to maize.

Other authors reported that in the first year of maize after alfalfa, grain yields either did not increase as a result of applications of N or they were maximized by the addition of reduced amounts of N (30 to 50 kg N ha⁻¹) (Fox and Piekielek, 1988; Bundy and Andraski, 1993; Kelling et al., 1993; Morris et al., 1993; Aflakpui et al., 1994; Lory et al., 1995b).

In our case, the rate of N fertilization application associated with the highest maize yields after alfalfa was 100 kg N ha⁻¹. The differences between our yield responses (rate up to 100 kg N ha⁻¹), and those from the USA (30 to 50 kg N ha⁻¹) could have been due to our higher maize yields. They could also be explained by the short season duration of our alfalfa (2 years) compared with older alfalfa crops. It is relatively well established that soil nitrate concentrations increase with an increase in the age of alfalfa (Munson, 1978; El-Hout and Blackmer, 1990).

Applying the traditional N credit method (Lory et al., 1995a; Varvel and Wilhelm, 2003), the maize yields after alfalfa, with 0 N kg ha⁻¹, were 12898 Kg ha⁻¹. Substituting this quantity in the second-degree equation that adjusted for the response curve of growing maize in monoculture ($Y = 8174.5 + 40.28 N - 0.0664 N^2$), this would correspond to a rate of N fertilizer application of 160.5 kg ha⁻¹. This would probably be the FRV or N-fertilizer equivalent to the effect of a two-year alfalfa crop on a subsequent maize crop.

This value is greater than the credits assigned to alfalfa in most Midwestern states of the USA, which credit alfalfa with a nitrogen contribution of 100 to 125 kg N ha⁻¹ (Karlen et al., 1994).

Other values for the FRV reported that legume plowdown supported maize yields equivalent to those achieved with 90 to 125 kg ha⁻¹ of N fertilizer, suggesting levels of N availability from legume residue of 65 to 71% (Bruulsema and Christie, 1987).

In Pennsylvania, Fox and Piekielek (1988) reported that 3-yr total fertilizer N equivalences of alfalfa were estimated to be 187 kg ha⁻¹, and the average annual proportional contributions to the total were 70 % in the first year, 20 % in the second and 10 % in the third. On the other hand, Baldock and Musgrave (1980), working in the state of New York, concluded that two years of growing alfalfa contributed 135 kg ha⁻¹ to a maize crop. Kurtz et al. (1984) summarized some of these recommendations reporting values of from 56 to 157 kg ha⁻¹, for a good alfalfa crop depending on the particular area and growing conditions. In contrast, under poor growing conditions, they observed reductions in N fertilizer values for maize after growing legumes compared with those for continuous maize production from 0 to 56 kg N ha⁻¹.

In France, Justes et al., (2001), considered that in the two years after alfalfa plowdown about 100 kg N ha⁻¹ could be saved by grain producers.

Our values, obtained with only two years of alfalfa production, were similar to, or higher than, those cited in most of the data published for the US Midwest. In general, FRV estimates for subsequent maize production in the USA, present slightly lower values than those obtained in our investigation. This is probably because the N value for alfalfa may be related to forage yields (Munson, 1978; Gault et al., 1995) and these are normally high under irrigated Mediterranean conditions (Lloveras et al., 1998; Lloveras et al., 2001).

Even so, our values could perhaps be considered conservative because they were calculated from an alfalfa stand with only two years of production. Our FRV would possibly have been higher if the alfalfa had been under production for four years, as is usual in the area. Under the Mediterranean conditions of this trial, an alfalfa crop typically produces about 10 to 16 Mg ha⁻¹ in the first year of production, 17-26 Mg ha⁻¹ in the second, 13-22 Mg ha⁻¹ in the third, and 12-20 Mg ha⁻¹ in the fourth (Lloveras et al., 1998).

Bullock (1992), on the other hand, noted that the widely used FRV methodology probably overestimates the N contribution of legumes when there is a crop rotation. Hertelman et al. (1987) argued that the amount of N credited to legumes in a crop rotation in

northern-central USA may be inflated by as much as 123% when applying the FRV method.

According to Hesterman et al., (1987), Hesterman (1988) and Bullock (1992), yield increases after cultivating legumes cannot only be due to the effects of N fertilization but also to other factors that could not be measured in the present study. These yield-enhancing effects that are not directly associated with the N contribution are referred to as Rotation Effects (Bullock, 1992).

Rotations effects probably contributed to our FRV for alfalfa which was estimated at 160 kg ha⁻¹ when differences in soil nitrate NO₃⁻-N at maize seeding were only about 37 kg ha⁻¹ (Table 3). Another possible explanation for our high N-fertilizer equivalent was that part of the N could have come from the alfalfa roots and been made available in the course of the maize growing season (Justes et al., 2001). As Varvel and Wilhelm (2003) observed, N from legumes does not become available until much later in the growing season and this makes its detection difficult using conventional soil-testing methods.

A practical value for the legume contribution to subsequent crops has, however, been given to producers and, although questioned, these FRV may help to reduce N applications and to increase crop benefits while also helping to reduce possible water contamination due to the excessive application of N.

Second year crop following alfalfa

The effects of alfalfa in the rotation were still significant in the second crop (wheat) following alfalfa (Table 4). On average, wheat grown after the alfalfa-maize rotation yielded 6435 kg ha⁻¹, whereas that grown after maize in monoculture yielded 5197 kg ha⁻¹. The N fertilization rates for previous maize crops did not influence wheat yields, although wheat yields did increase when N fertilizer was applied to this crop at rates of 0 or 100 kg ha⁻¹.

In the alfalfa-maize-wheat rotation, wheat yields were respectively 5773 and 7096 kg ha⁻¹ for the 0 and 100 kg ha⁻¹ N fertilizer applications, whereas the yields on plots with previous crops of monoculture maize were 4105 and 6289 kg ha⁻¹ for the 0 and 100 kg N ha⁻¹ treatments (Figure 2).

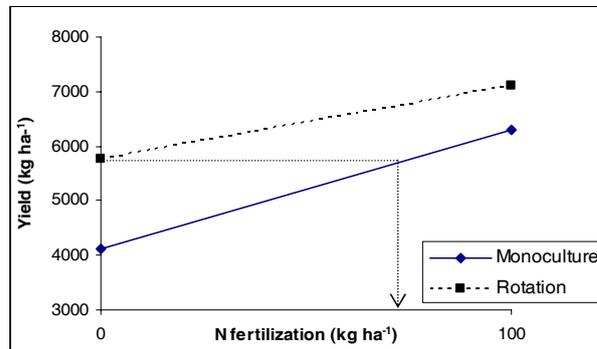


Figure 2. Grain yields of wheat grown after monocropped maize (maize-wheat) or after maize, in an alfalfa-maize-wheat rotation, under two rates of N applied to wheat.

Substituting 5773 kg ha^{-1} , which was the wheat yield for 0 N fertilization in the alfalfa-maize-wheat rotation, in the linear equation (yield = $4106 + 21.83 \times N$), used to adjust for the response to N fertilization in monoculture maize-wheat, gives an equivalent level of N fertilizer of 76 kg ha^{-1} . This suggests that this quantity is the FRV or the N-fertilizer equivalent of two-year alfalfa for the second crop following alfalfa. This value should be considered approximate because only two N rates (0 and 100 kg ha^{-1}) were used to adjust the response (Figure 2).

The higher wheat yields obtained from the alfalfa-maize rotation with respect to wheat yields from the continuous maize-wheat rotation could be explained, at least in part, by the higher soil NO_3^- -N content associated with the alfalfa rotation.

Munson (1978), Fox and Piekielek (1988), Peterson and Russelle, (1991), Justes et al., (2001), and Triboi and Triboi-Blondel (2004), also reported residual effects of alfalfa in second year crops following cultivation of a legume. Their reported values ranged from 67 to 90 kg ha^{-1} . On the other hand, Kurtz et al. (1984) reported that recommended N adjustments for a second year maize crop after alfalfa should be between 22 and 56 kg N ha^{-1} .

The results of the RFV for alfalfa for the second crop after alfalfa, also suggest that rotation effects probably contributed to the FRV of 76 kg ha^{-1} . The differences between rotations, in terms of soil nitrate content before the seeding of wheat, were of $41 - 24 = 17 \text{ kg N ha}^{-1}$ (Table 4), whereas the FRV was approximately 76 kg N ha^{-1} . Other possible explanations for our high FRV could be that part of the N from the alfalfa roots was gradually made available in the course of the second growing season (Justes et al., 2001) and that N from legumes became available later in the growing season (Varvel and Wilhelm, 2003).

Table 4. Wheat yields and total soil nitrogen (NO₃⁻-N) from 0 to 120 cm depth, before the seeding of wheat and after the harvest of wheat.

Previous crop (1994-95)	1996 N fertilizer treatment for corn	1997 N fertilizer treatment for wheat	1996 Before the seeding of wheat	1997 After wheat harvest	1997 Wheat yields
Corn	_____ kg N ha ⁻¹	_____	_____ kg ha ⁻¹ NO ₃ ⁻ -N	_____	_____ kg ha ⁻¹
	0	0	23	39	4219
		100		38	6114
	100	0	24	40	4266
		100		44	6623
	200	0	23	35	3908
		100		40	6184
	300	0	25	38	4027
		100		44	6235
<i>Average</i>			<i>24</i>	<i>40</i>	<i>5197</i>
Alfalfa	0	0	35	41	5065
		100		50	6807
	100	0	37	43	5379
		100		60	7728
	200	0	41	49	6339
		100		59	7003
	300	0	51	47	6307
		100		57	6845
<i>Average</i>			<i>41</i>	<i>51</i>	<i>6434</i>
ANOVA					
Sources of variation					
Rotation (Rot)			**	NS	**
Replication (Rep)			NS	NS	*
Error A			-	-	-
N fertilization (N Corn)			**	NS	NS
Rot * N Corn			*	NS	NS
Error B				-	-
N Wheat rate (N wheat)				**	**
Rot * N wheat				*	*
N Corn * N wheat				NS	NS
Rot * N Corn * N wheat				NS	NS
Error C				-	-

** , *significant at the 0.01 and 0.05 level, respectively. NS: non significant.

CONCLUSIONS

In irrigated Mediterranean systems, maize grown after two years of alfalfa outyielded monoculture maize at all of the application rates for N fertilizer used for comparison purposes: 0,100, 200 and 300 kg N ha⁻¹.

In our experiments, the FRV of alfalfa for the subsequent maize crop was 160 kg N ha⁻¹. This quantity could have been even higher if the alfalfa crop had been grown for four years, as it usually is in this area, instead of two, as in the experiment.

The effects of growing alfalfa persisted for at least, two growing seasons, because wheat crops grown after maize were affected by previous alfalfa crops. The FRV of alfalfa for this second crop was estimated to be 76 kg N ha⁻¹.

These FRV were, at least, partially due to an increase in soil N content after the alfalfa crop: greater soil N contents were associated with plots on which alfalfa was grown as compared with those on which maize was cultivated in monoculture. However, our results suggest that other factors, such as the rotation effect, could also be involved in this process. The high FRV values for alfalfa show the advantages of including this crop in the rotation, if it fits in with the cropping system.

Although FRV has been questioned, it can help to reduce N applications and to increase crop benefits while at the same time helping to reduce possible water contaminations due to N excess.

Acknowledgments

This research was supported by the CICYT (Spanish Ministry of Science and Technology). We would like to express our gratitude to M. Montori, J. Badia, M. Pons, R. Timoneda, J. Mesalles and J. del Campo, J. Betbesé and R. Mestres for their field and laboratory assistance.

REFERENCES

- Aflakpui, G.K.S., T.J. Vyn, G.W. Anderson, D.R. Clements, M.R. Hall, and C.J. Swanton. 1994. Crop management systems for corn (*Zea mays* L.) following established alfalfa (*Medicago sativa* L). *Can. J. Plant Sci.* 74:25-259.
- Alvaro, J. and J. Lloveras. 2003. Metodología de la producción de alfalfa en España [Methodology of the alfalfa production in Spain]. AIFE (Asociación Interprofesional de Forrajes Españoles). Ed. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Lleida. Spain. p.78
- Baldock, J.O. and R.B. Musgrave. 1980. Manure and mineral fertilizer effects in continuous and rotational crop sequences in Central New York. *Agron. J.* 72:511-518.
- Baldock, J.O., R.L. Higgs, W.H. Pailson, J.A. Jackobs, and W.D. Shader. 1981 Legume and mineral N effects on crop yields in several crop sequences in the Upper Mississippi Valley. *Agron. J.* 73:885-890.
- Blackmer, A.M. 1989. Nitrogen needs for corn in a sustainable agriculture. 44th. Annual Corn & Sorghum Research Conference. p. 1-14.
- Bruulsema, T.W. and B.R. Christie. 1987. Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. *Agron. J.* 79:96-100.
- Bullock, D.G. 1992. Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences.* 11:309-326.

- Bundy, L.G. and T.W. Andraski. 1993. Soil and plant nitrogen availability tests for corn following alfalfa. *J. Prod. Agric.* 6:200-206.
- CASC. 2000. Alfalfa: the crop for the soil. Certified Alfalfa Seed Council Inc. Davis, CA, USA.
- Dauden, A. and D. Quilez. 2004. Pig slurry versus mineral fertilization on corn yield and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated environment. *Europ. J. Agron.* 21:7-19.
- El-Hout, N.M. and A.M. Blackmer. 1990. Nitrogen status of corn after alfalfa in 29 Iowa yields. *J. Soil and Water Conservation* 45:115-117.
- Farmer, V. 1913. Roman Farm Management. The treatises of Cato and Varro. The MacMillan Company. New York. USA.
- Fox, R.H. and W.P. Piekielek. 1988. Fertilizer N equivalence of alfalfa, birdsfoot trefoil, and red clover for succeeding corn crops. *J. Prod. Agric.* 1:313-317.
- Francis, C.A. and M.D. Clegg, 1990. Crop rotations in sustainable production systems. p. 107-122. *In: CA Edwards, R Lal, P Madden, RH Miller and G House (ed.). Sustainable Agricultural Systems.* Soil & Water Conservation Society. Ankeney. Iowa. USA.
- Gault, R.R., M.B. Peoples, G.L. Turner, D.M. Lilley, J. Brockwell, and F.J. Bergense. 1995. Nitrogen fixation by irrigated lucerne during the first three years. *Aust. J. Agric. Res.* 46:1401-1425.
- Harris, G.H. and O.B. Hesterman. 1990. Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. *Agron. J.* 8:129-134.
- Hesterman, O.B. 1988. Exploiting forage legumes for nitrogen contribution in cropping systems. p.155-166. *In: Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen.* ASA-CSSA-SSSA Special publication 51. Madison WI.USA.
- Hesterman, O.B., M.P. Russelle, C.C. Sheaffer, and G.H. Heichel. 1987. Nitrogen utilization from fertilizer and legume residues in legume-corn rotations. *Agron. J.* 79:726-731.
- Justes, E., P. Thiebeau, G. Cattin, D. Larbre, and B. Nicolardot. 2001. Liberation d'azote après retournement de luzerne. Un effet sur deux campagnes. *Perspectives Agricoles* 264:23-28.
- Karlen, D.L., Varvel, G.E., Bullock, D.G., and Cruse, R.M. 1994. Crop rotations for the 21st century. *Adv. in Agronomy* 53:1-45.
- Kelling, K.A., L.G. Bundy, and R.P. Wolkowski. 1993. Why are legume nitrogen credits changing? *Procc. 23th. National Alfalfa Symposium.* Appleton, WI. USA.
- Kurtz, L.T., L.V. Boone, T.R. Peck, and R.G. Hoeft. 1984. Crop rotations for efficient nitrogen use. *Nitrogen in Crop Production.* p. 295-306. *In: R.D. Hauck (ed). Nitrogen in crop production.* ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI. USA.
- Lloveras, J., J. Ferran, J. Boixadera, and J. Bonet. 2001. Potassium fertilization effects on alfalfa in a Mediterranean climate. *Agron. J.* 93:139-143.
- Lloveras, J., A. López, J.A. Betbesé, M. Bagà, and A. López. 1998. Evaluación de variedades de alfalfa en los regadíos del valle del Ebro. *Análisis de las diferencias intervarietales.* Pastos 28:37-56.
- Lory, J.A., M.P. Russelle, and T.A. Peterson. 1995a. A comparison of two nitrogen credit methods: Traditional vs. Difference. *Agron. J.* 87:648-851.
- Lory, J.A., G.W. Randall, and M.P. Russelle. 1995b. Crop sequence effects on response of corn and soil inorganic nitrogen to fertilizer and manure nitrogen. *Agron. J.* 87:876-883.
- Morris, T.F., A.M. Blackmer, and N.M. El-Hout. 1993. Optimal rates of nitrogen fertilization for first-year corn after alfalfa. *J. Prod. Agric.* 6:244-350.
- Munson, R.D. 1978. The influence of alfalfa on subsequent crops. p. 30-33. *In: Eighth Annual Alfalfa Symposium.* Bloomington, MIN. USA.
- Peterson, T.A. and M.P. Russelle. 1991. Alfalfa and the nitrogen cycle in the Corn Belt. *J. of Soil and Water Conservation.* 46:229-235.

- Power, J.F. 1990. Legumes and crop rotations. p. 178-204. *In*: C.A. Francis, C. Butler and L.D. King. (ed.). Sustainable agriculture in temperate zones. John Wiley & Sons. New York. USA.
- SAS Institute. 1989. SAS user's guide: Statistics. Version 6.03. SAS Inst., Cary, NC. USA.
- Spiertz, J.H. and L. Sibma. 1986. Dry matter production and nitrogen utilization in cropping systems with grass, lucerne and maize. 2: Nitrogen yield and utilization. *Netherlands J. of Agric. Sci.* 34:37-47.
- Sutherland, W.N, W.D. Shrader, and J.T. Pesek. 1961. Efficiency of legume residue nitrogen and inorganic nitrogen in corn production. *Agron. J.* 53:339-342.
- Triboi, E. and A.M. Triboi-Blondel. 2004. Grain yield and nitrogen concentration of wheat in a cropping system using lucerne a nitrogen source. p. 685-686. *In*: S.E. Jacobsen, C.R. Jensen and J.R. Porter (ed.) Proceedings VIII ESA Congress. KVL Copenhagen. Denmark.
- Varvel, G.E. and W.W. Wilhelm. 2003. Soybean nitrogen contribution to corn and sorghum in Western Corn Belt rotations. *Agron. J.* 95:1220-1225
- Villar, J.M., P. Villar, C. Stockle, F. Ferrer, and M. Arán. 2002. On-farm monitoring of soil nitrate-nitrogen in irrigated cornfields in the Ebro Valley (Northeast Spain). *Agron. J.* 93:373-380.

CAPÍTULO III

El efecto de la alfalfa (*Medicago sativa* L.)
en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo
en los regadíos del Valle medio del Ebro

1. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS

Las rotaciones de cultivo y sus beneficios en la agricultura son ampliamente conocidos (Pierce y Rice, 1988). Entre sus efectos positivos conviene destacar que mejoran la estructura del suelo, con el consecuente aumento de la disponibilidad de agua y de nutrientes, mejoran su vida microbiana, ayudan al control de malas hierbas, plagas, enfermedades y cambian el nivel de alelopatías, todos ellos englobados bajo el concepto de *efecto rotación* (Power y Follett, 1987; Francis y Clegg, 1990), específico para cada zona (Bullock, 1992). Cuando en la rotación se introduce una leguminosa, uno de los principales responsables de este *efecto rotación* es el aumento de N disponible que deja la leguminosa en el campo.

Una aportación importante de N orgánico (procedente de un cultivo precedente de alfalfa) puede a menudo suplir significativamente las necesidades en N del cultivo posterior (Bundy y Andrasky, 1993; Scharf, 2001; Andrasky y Bundy, 2002), sobretodo si se trata de una especie exigente como el maíz. A veces, sin embargo, el cultivo puede necesitar una cantidad suplementaria de fertilizante (Aflakpui *et al.*, 1993). Para poder aprovechar esta aportación de N orgánico conviene disponer de métodos que permitan identificar los campos en los que es necesario aportar N suplementario (Scharf, 2001). A partir del momento en que se reconoció y aceptó que el N que cultivos anteriores dejaban en el suelo podía ser relevante, en Wisconsin y Minnesota (USA) se desarrollaron y adoptaron sistemas de determinación de nitratos en el suelo antes de la siembra de maíz (Scharf, 2001). Además de estas determinaciones previas al cultivo, conviene disponer de herramientas de diagnóstico que permitan detectar las deficiencias lo más pronto posible y de manera fiable (Andrasky y Bundy, 2002). Permitirá corregirlas, retrasando las aportaciones de N en cobertera pero sin llegar a que se produzcan pérdidas irreversibles. Scharf (2001), en base a sus ensayos en 16 localidades de Missouri (USA), considera que la concentración de N en la planta en V6 (30-45 cm de altura) es el mejor evaluador de la dosis óptima de N necesaria en cobertera, seguido de la concentración de clorofila (SPAD) medida también en V6. Para ambos métodos propone unas rectas de regresión que, en las condiciones de Missouri, permiten ajustar las aportaciones de fertilizante en cobertera (Figura III.1a y III.1b).

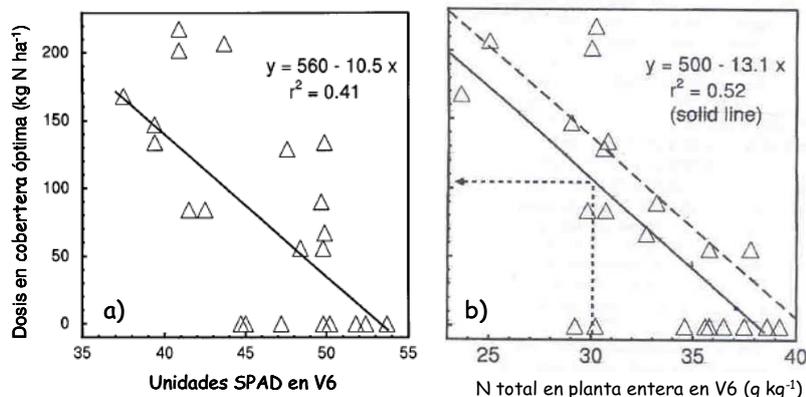


Figura III.1. Lecturas de contenido en clorofila SPAD (a) y contenido de N en la planta entera (b) tomadas en maíz en estadio V6 en Missouri (USA). Las rectas de regresión permiten determinar la dosis de fertilizante N a aportar en cobertura en función a) de la lectura SPAD y b) del contenido de N. (Scharf, 2001).

El *efecto rotación* en el maíz y en el trigo afecta principalmente al rendimiento, pero también otros aspectos de crecimiento del cultivo y de características del suelo. En el Capítulo II se han analizado los rendimientos obtenidos en ambos cultivos. También se ha propuesto una cuantificación de la aportación en N que hace la Alfalfa en los cultivos siguientes en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo en las condiciones de los regadíos del Canal d'Urgell (Lleida). Conviene conocer qué otros cambios ha provocado la rotación en las condiciones de producción y en las características de la planta, tanto en el maíz como en el trigo.

La alfalfa es un cultivo tradicional en los regadíos de Lleida y Huesca, que ha aumentado considerablemente los últimos años debido a los altos rendimientos y la política de subvenciones de la UE. Los productores de alfalfa de la zona (generalmente responsables de las industrias deshidratadoras) están interesados en la producción de alfalfa y, conocedores de los perjuicios que puede suponer repetir alfalfa tras alfalfa en un mismo campo, suelen intercalar un cultivo de maíz, planificando una rotación lo más breve posible (Comunicación personal¹, 2006). Por otra parte, reconocen que la alfalfa aporta N al suelo pero, a menudo, no lo tienen en cuenta al calcular la fertilización (Sisquella *et al.*, 2004). No se dispone de datos que especifiquen los distintos beneficios

¹ Distintos técnicos. 2006. 17 de julio. *Seminari de transferència per a la millora de la fertilització N del panís a Catalunya*. Organizado por RuralCat-DAR-Generalitat de Catalunya y por el Centro UdL-IRTA. Lleida.

que la alfalfa deja a los cultivos posteriores en las rotaciones de los regadíos del Valle medio del Ebro. Tampoco se dispone de datos que permitan mostrar a los productores que este *efecto rotación* puede durar más de un ciclo de cultivo y que justifiquen la oportunidad de alargar y/o diversificar la rotación. Los productores actuales, que tienen la oportunidad de utilizar la tecnología propia de la agricultura de precisión, necesitan datos que les permitan diseñar, seleccionar y mejorar el manejo del N (Blackmer, 1997).

Las rotaciones tienen un papel importante en la calidad medioambiental (Pierce y Rice, 1988). Beaudoin *et al.* (2005) consideran que un manejo adecuado del N a lo largo de la sucesión de cultivos es la principal norma para la prevención de la contaminación por nitratos. Sin embargo, distintos estudios europeos (Bélgica, norte de Francia, Países Bajos) muestran que la alfalfa puede tener un papel perjudicial aumentando la lixiviación de nitratos hacia la capa freática (Beaudoin *et al.*, 1992; Justes *et al.*, 2001; Spiertz y Sibma, 1986; Pierce y Rice, 1988). Aun sabiendo que en las rotaciones con alfalfa conviene ser prudente y no sobre-fertilizar, faltan datos en condiciones más meridionales. Éstos permitirían evaluar el potencial de lixiviación que presenta la alfalfa, con objeto de proponer pautas de manejo y reducir al máximo su impacto ambiental.

Los **objetivos** de este Capítulo son, en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo en el Valle medio del Ebro:

- Conocer la repercusión de la alfalfa en los cultivos siguientes, su aporte en el crecimiento de la planta y en las condiciones de producción.
- Evaluar la viabilidad y posibilidades de distintos métodos de diagnóstico para la evaluación de las necesidades en la fertilización nitrogenada después de la alfalfa.
- Diagnosticar el riesgo de lixiviación de nitratos después de la alfalfa en las condiciones de riego por gravedad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Condiciones experimentales

2.1.1. Localización del ensayo y condiciones edafológicas

El ensayo se llevó a cabo los años 1996 y 1997 en la parcela experimental del centro Universitat de Lleida (UdL)-IRTA descrita en el Capítulo I. Se trata del tercer y cuarto año de ensayo del mismo proyecto y en la misma parcela.

Las características edáficas coinciden con las descritas en el Capítulo I. Con objeto de concretar las condiciones del ensayo, antes de la siembra de 1996 se determinó el contenido en materia orgánica (MO) del horizonte superficial (0-30cm) y el Fósforo (P) y Potasio (K) de los horizontes 0-30 y 30-60cm. Se analizó el suelo de los distintos bloques experimentales muestreando las parcelas principales en cada bloque según el cultivo anterior: alfalfa (rotación) o maíz (monocultivo) (Tabla III.1).

Tabla III.1. Características del medio edáfico de la parcela distintas al iniciar el ensayo (abril 1996) de las descritas en el Capítulo I

		Bloque experimental							
		I		II		III		IV	
Determinación		Profundidad (cm)							
		0-30	30-60	0-30	30-60	0-30	30-60	0-30	30-60
MO oxidable (%)	Monocultivo	2.42	-	2.63	-	2.28	-	2.58	-
	Rotación	2.5	-	2.6	-	2.4	-	2.5	-
P asim. Olsen (ppm)	Monocultivo	64	21	43	13	44	10	34	10
	Rotación	39	25	30	15	31	14	27	8
K (ex. NH ₄ AcO) (ppm)	Monocultivo	325	171	407	188	351	117	468	206
	Rotación	277	176	269	150	278	157	302	168

2.1.2. Condiciones climáticas

El clima de la zona de estudio, típicamente mediterráneo, semiárido, continental templado (clasificación climática de Papadakis) cumple con los requisitos necesarios para el cultivo de la alfalfa y el maíz (siempre que sea en condiciones de regadío) y el trigo (de León, 1989). El diagrama ombrotérmico (Capítulo I, Figura I.5) muestra que el periodo seco se sitúa entre los meses de junio y septiembre, cuando el trigo prácticamente ya no está en el campo.

La Figura III.2 muestra la evolución de las condiciones térmicas durante la experimentación y permite comparar estos datos con las temperaturas medias de la serie de treinta años. Se puede observar como durante el cultivo del maíz, en verano de 1996, se registraron temperaturas ligeramente inferiores a las habituales; durante el cultivo del trigo, se registraron unas temperaturas algo más suaves.

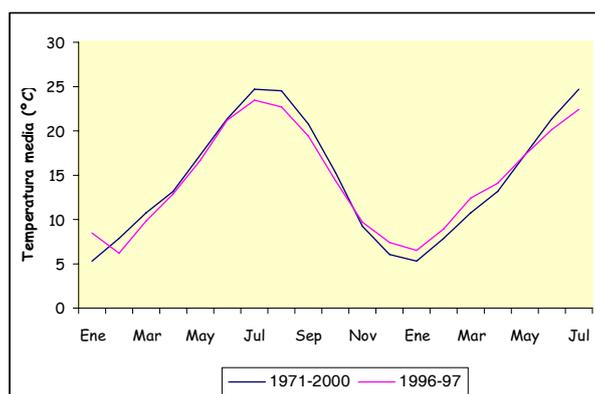


Figura III.2. Temperaturas medias mensuales durante los cultivos de maíz y de trigo (Estación de Juneda. Xarxa Agrometeorològica de Catalunya) y serie plurianual 1971-2000 (Estación de Lleida. INM)

Entre los meses de octubre 1995 y marzo 1996 previos al cultivo del maíz (Capítulo I, Tabla I.2), no hubo aportación de agua mediante riego. La pluviometría, que fue particularmente abundante (200 mm), pudo producir un lavado de nitratos del suelo, sobretodo en las parcelas principales en que el cultivo anterior había sido maíz (monocultivo), ya que el terreno estuvo sin cultivo durante 5-6 meses.

La Tabla III.2 muestra la evolución de la pluviometría durante el cultivo de maíz y de trigo, entre marzo 1996 y julio 1997 y permite comparar los datos con la pluviometría de la serie de treinta años. Se puede observar como se registró una lluvia importante en

junio 1996, durante el cultivo de maíz. Durante el cultivo del trigo, la pluviometría fue superior a la habitual, tanto por meses como el total anual. El otoño de 1996 fue particularmente lluvioso, repercutiendo en una mayor disponibilidad de agua para el cultivo.

Tabla III.2. Condiciones pluviométricas durante el ensayo (Estación de Juneda. Xarxa Agrometeorològica de Catalunya) y serie plurianual 1971-2000 (Estación de Lleida. Instituto Nacional de Meteorología)

	Pluviometría media mensual (mm)		
	1996 (Maíz)	1996-97 (Trigo)	Serie plurianual
Marzo	12.4	-	27
Abril	39.6	-	37
Mayo	29.0	-	49
Junio	62.4	-	34
Julio	7.0	-	12
Agosto	14.8	-	21
Septiembre	13.8	-	39
Octubre	43.2	-	39
Noviembre	-	80.8	28
Diciembre	-	91.0	28
Enero	-	96	26
Febrero	-	1	14
Marzo	-	3.6	27
Abril	-	31.2	37
Mayo	-	49.8	49
Junio	-	77.2	34
Julio	-	10	12
Total durante cultivo (maíz/trigo)	166.6	430.6	192/255

2.1.3. Técnicas de cultivo de los cultivos de la rotación

Alfalfa

El cultivo precedente, la alfalfa, cv. "Aragón", se había sembrado el 7 de abril de 1994 y levantado el 16 de febrero de 1996. El cultivo tuvo pues dos años de duración; se habían dado 4 cortes el primer año y 6 el segundo, obteniendo unos rendimientos de materia seca de 7.974 y 22.738 kg ha⁻¹ respectivamente.

La alfalfa se había regado por gravedad al mismo tiempo que el maíz, por turnos, cada 11-13 días, de abril a setiembre, con una dosis evaluada en 6.500-7.000 m³ ha⁻¹ año⁻¹.

Para el abonado de fondo de la alfalfa se habían aportado 60 kg N ha⁻¹, 87 kg P₂O₅ y 250 kg K₂O ha⁻¹. Además, cada año, durante el invierno se había abonado con 87 kg P₂O₅ y 250 kg K₂O ha⁻¹.

Las malas hierbas se habían controlado mediante un tratamiento herbicida en presiembra con benfluraline 18% (6L ha⁻¹) y, durante el invierno del segundo año, con hexazinone 90% (1kg ha⁻¹). Dos y tres veces por año respectivamente se había tratado contra plagas con fenvalerate 15% (0.1 kg ha⁻¹).

Maíz

Las técnicas de cultivo utilizadas para el cultivo de maíz fueron las mismas que las descritas en el Capítulo I. El maíz se sembró el 26 de abril y se cosechó el 23 de octubre. La cosecha se retrasó por las abundantes lluvias al final del ciclo.

Trigo

La preparación del terreno consistió en un laboreo profundo con incorporación de los residuos del cultivo anterior y un laboreo superficial para preparar el lecho de siembra.

El ensayo se sembró con una sembradora (Plotman, Wintersteiger, Ried, Austria) el 14 de noviembre, tres semanas después de la cosecha del cultivo precedente, el maíz. La densidad de siembra fue de 450 semillas por metro lineal con un espacio entre líneas de 0.14 m. El cultivar de trigo harinero sembrado fue "Cartaya", de ciclo medio precoz, obtención del INIA y habitual en la zona.

El trigo se recolectó el 15 de julio mediante de una microcosechadora para ensayos de 1,5 m de ancho (Nurserymaster Elite plot combine, Wintersteiger, Ried, Austria).

Durante la estación de crecimiento, se regó dos veces, por gravedad, con una aportación total aproximada de 1500 m³ ha⁻¹. El abonado nitrogenado consistió en una única aportación, en cobertera, en las parcelas que lo requerían según el diseño experimental (apartado 2.1.4). En estas parcelas se aportaron 100 kg ha⁻¹ de N, en forma de Nitrato Amónico (33,5% N), el 20 de febrero. El ensayo estuvo libre de malas hierbas y la incidencia de plagas y enfermedades fue tan reducida que no fue necesario aplicar tratamientos fungicidas e insecticidas.

2.1.4. Diseño experimental

Diseño experimental para evaluar el efecto de la rotación en el cultivo de maíz

El diseño experimental para el primer cultivo después de la alfalfa (1996) fue un Split-plot con cuatro repeticiones siendo la rotación, la parcela principal, y las dosis de abonado nitrogenado en el maíz, la subparcela.

Para estudiar el efecto de la rotación de la alfalfa en el maíz se compararon dos tratamientos: rotación alfalfa-maíz y monocultivo de maíz. En cada una de las cuatro repeticiones, se había sembrado una parcela por tratamiento los dos años previos. En unas de estas parcelas, las que se denominaron "BM", se había sembrado maíz durante dos años en monocultivo (estudiado en el Capítulo I); en las otras, denominadas "Rot", se había cultivado alfalfa durante los dos años anteriores. En el año 1996 se sembró maíz en las dos parcelas principales y fue el año en el que se pudo comparar el monocultivo con la rotación.

Cada parcela principal se dividió en cuatro subparcelas en las que se aplicaron cuatro dosis de abonado nitrogenado: 0, 100, 200, 300 kg N ha⁻¹, como se ha explicado en el Capítulo I.

En la Figura III.5 se representa esquemáticamente la distribución de bloques, parcelas principales y subparcelas experimentales del ensayo. En la Figura III.3 se puede apreciar el aspecto global del ensayo, en el momento de la cosecha. Como se ha descrito en el Capítulo I, las subparcelas donde se aplicaron los tratamientos de abonado nitrogenado en maíz tenían una superficie de 54 m²: 6m (8 filas) de ancho por 9 m de largo. Las 3 líneas centrales se destinaban a la recolección y, eliminando 0,5 m a cada extremo, permitían contar con 18 m² de cosecha. Descartando la línea de cada lado por el efecto borde, se podía contar con 3 líneas más para la toma de muestras de planta. Cada parcela principal ocupaba 234 m² y cada bloque 665 m², contando los pasillos. El total del ensayo ocupaba unos 3220 m².

Diseño experimental para evaluar el efecto de la rotación en el cultivo de trigo

En esta parte del estudio el diseño experimental consta de tres factores:

- Rotación alfalfa-maíz o monocultivo de maíz
- Dosis de abonado en el cultivo anterior, el maíz
- Dosis de abonado nitrogenado en el trigo, después del maíz.

El cuarto y último año de estudio (1996-97) se compararon dos dosis de abonado nitrogenado en el trigo: 0 y 100 kg N ha⁻¹ aportado en forma de Nitrato Amónico (33,5% N).

El diseño experimental fue pues un Split-split-plot con cuatro repeticiones, asignando el factor principal, rotación, con dos tratamientos, rotación con alfalfa (Rot) y monocultivo (BM), a las parcelas principales, el factor secundario, las cuatro dosis de fertilizante nitrogenado en maíz (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹), a las subparcelas, y el factor terciario, las dos dosis de abonado nitrogenado en trigo (0 y 100 Kg ha⁻¹), a las sub-subparcelas.

La Figura III.6 representa esquemáticamente la distribución de los tratamientos de los ensayos, bloques (repeticiones), parcelas principales, subparcelas y sub-subparcelas experimentales del ensayo. En la Figura III.4 se puede apreciar el aspecto general del ensayo, en la primavera 1997. El tamaño de la subparcela experimental de trigo, con una superficie de 27 m² (3m de ancho por 9 m de largo), permitía contar con las líneas centrales suficientes para garantizar que muestreos y cosecha no estuvieran condicionados por el efecto borde.



Figura III.3. Vista del ensayo en septiembre 1996. Se distingue bien el primer bloque en el que la parcela principal de la derecha es un monocultivo de maíz y la de la izquierda, la rotación tras alfalfa.



Figura III.4. Vista del ensayo.1997. Bloques, parcelas principales, subparcelas y sub-pubparcelas de trigo. En el pasillo central también se sembró trigo.

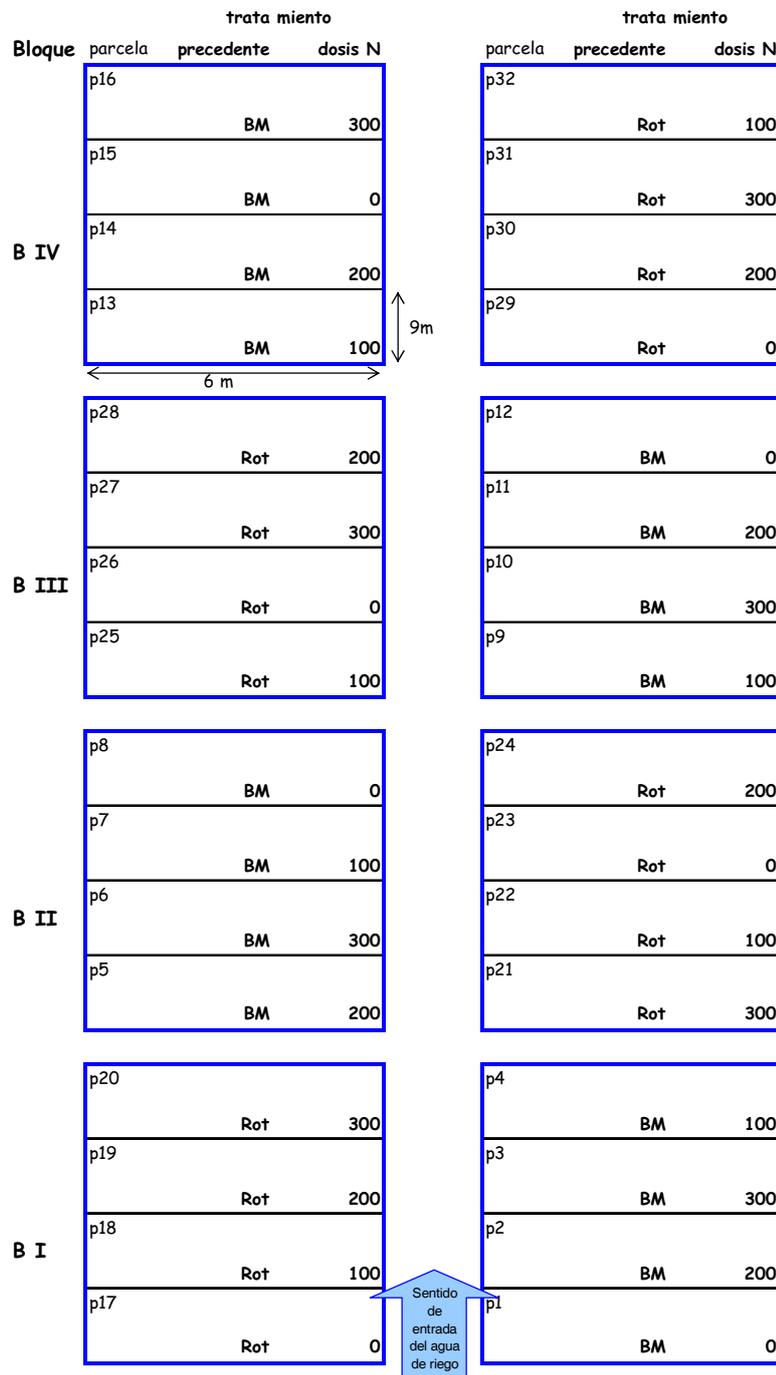


Figura III.5. Distribución de las parcelas en el ensayo en 1996 (cultivo de maíz) (BM: monocultivo de maíz; Rot: Rotación con alfalfa).

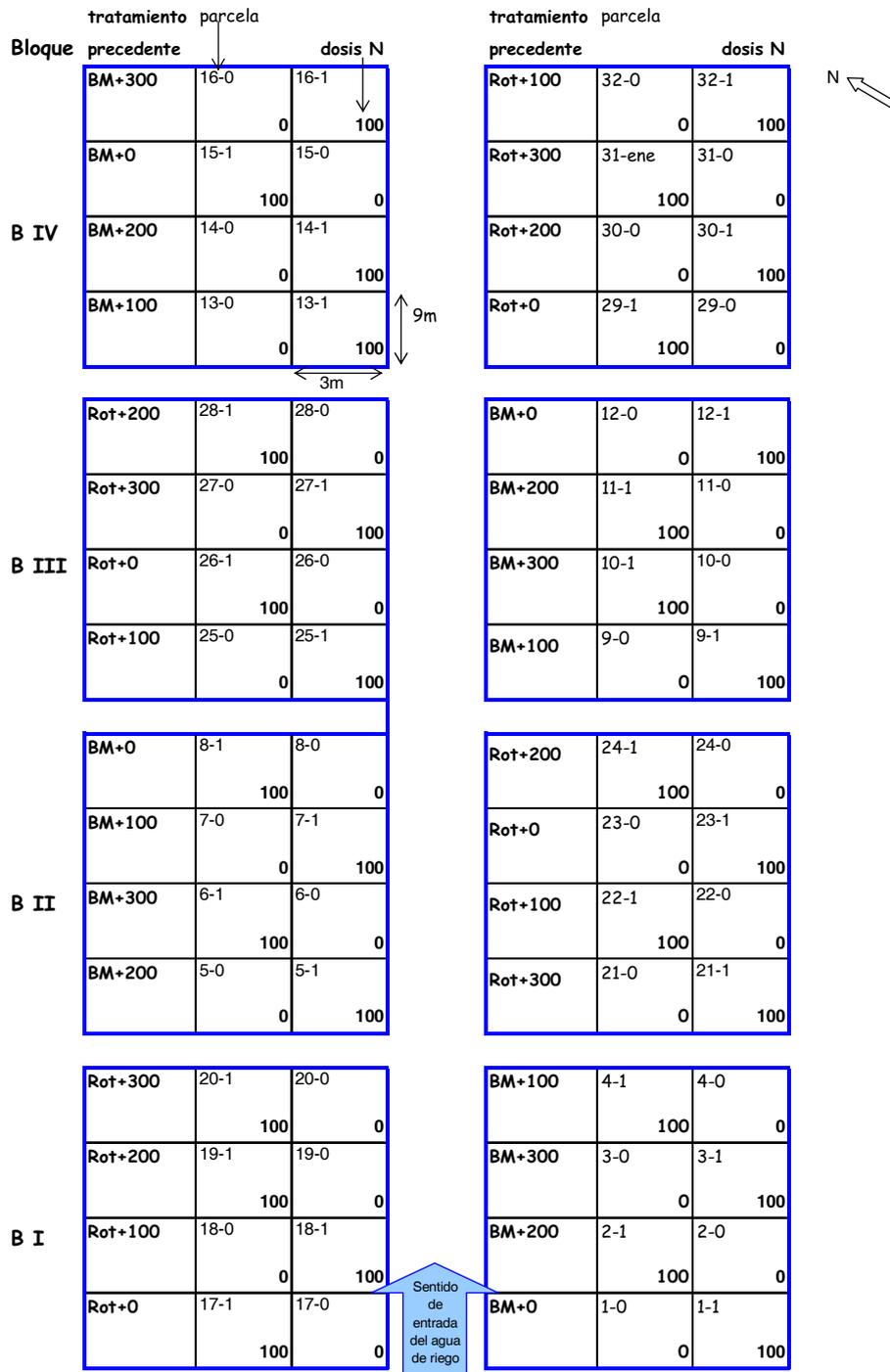


Figura III.6. Distribución de las parcelas en el ensayo en 1997 (cultivo de trigo). (BM: monocultivo de maíz; Rot: Rotación con alfalfa).

2.2. Métodos, técnicas y medidas realizadas

2.2.1. Contenido de nitratos en el suelo y su evolución

Para la determinación de los nitratos del suelo durante el **cultivo de maíz**, se siguió la metodología descrita en el Capítulo I, obteniendo para cada subparcela valores en tres momentos: antes de la siembra y del abonado de fondo y en el momento de la cosecha hasta 120 cm de profundidad (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 cm) y, antes de la aplicación del abonado de cobertera, del horizonte superficial (0-30 cm) (Tabla III.3).

Para la determinación del contenido de nitratos del suelo durante el **cultivo de trigo**, se tomaron muestras a cuatro profundidades (0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm) en tres momentos del ciclo de cultivo del trigo:

- antes de la siembra, en cada subparcela, ya que aún no se había aplicado el tratamiento diferencial (abonado nitrogenado en trigo) entre las dos sub-subparcelas. Estas muestras coincidían con las que se habían tomado en la cosecha del maíz anterior.
- antes de la aplicación del abonado de cobertera en trigo, siguiendo las mismas pautas que en la siembra ya que todavía no se había aportado el abono.
- en el momento de la cosecha del trigo en cada una de las sub-subparcelas.

La Tabla III.3 presenta de manera conjunta los días de muestreo de suelo para los dos cultivos relacionándolos con las fechas de siembra, de cosecha y de aplicación de abonado nitrogenado.

Tabla III.3. Fechas de toma de las muestras de suelo, de abonado nitrogenado, de siembra y de cosecha

	MAÍZ	TRIGO
1º muestreo de suelo	15 IV 96	25 X 96
Abonado de fondo	15 IV 96	-
Siembra	26 IV 96	14 XI 96
2º muestreo de suelo	3 VI 96	15 II 97
Abonado de cobertera	3 VI 96	20 II 97
Cosecha	23 X 96	15 VII 97
3º muestreo de suelo	25 X 96	17 VII 97

La metodología seguida para la determinación del contenido en nitratos fue la misma que la que se explica en el Capítulo I (apartado 2.2.1). El Laboratori d'Anàlisi i Fertilitat de Sòls (LAF) analizó las muestras y facilitó los resultados en $\text{kg NO}_3^- \text{ha}^{-1}$. Se calculó el contenido en nitrógeno nítrico en $\text{kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$.

2.2.2. Contenido de nitratos en el agua de riego y en la solución del suelo en el maíz

De una manera semejante a la metodología descrita en el Capítulo I, durante el cultivo de maíz se controló el contenido de nitratos en el agua de cada riego con un Nitracheck®.

Para evaluar la importancia del contenido en nitratos de la solución del suelo después de cada riego en maíz, se instalaron unas sondas de succión en cada subparcela de dos de los bloques. Se escogieron los bloques I y IV para poder, de esta manera, controlar la cantidad de agua que llegaba hasta el final de la parcela. El agua de riego entraba en el campo experimental por sur-oeste (bloque I) y se había observado que al bloque IV la cantidad que llegaba era inferior, lo que permitía suponer que el agua drenada y el nitrógeno lixiviado serían también inferiores.

2.2.3. Crecimiento de la planta, componentes del rendimiento y rendimiento

En el Maíz

Se determinaron los mismos parámetros de crecimiento de la planta que los expuestos en el Capítulo I (apartados 2.2.4-2.2.5). Se obtuvieron, de forma idéntica, datos de producción de biomasa en floración y madurez fisiológica, altura de planta, índice de área foliar (LAI), altura de planta e intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (PARI).

El rendimiento (al 14% de humedad) y sus componentes (plantas ha^{-1} , mazorcas ha^{-1} , $\text{filas mazorca}^{-1}$, granos fila^{-1} , peso de 1000 granos) fueron evaluados de la misma manera que los descritos en el Capítulo I (apartado 2.2.6).

En el Trigo

La producción de biomasa de trigo se determinó en dos momentos del ciclo de cultivo: en encañado y en madurez fisiológica. Para ello se cortaron a nivel del suelo las plantas de 1 m lineal en medio de cada parcela, se pusieron las plantas en bolsas de plástico bien cerradas y se llevaron rápidamente al laboratorio donde se determinó el peso fresco. Posteriormente se secaron las muestras en estufa a 70°C durante cuarenta y

ocho horas y se determinó la humedad de la muestra. Los resultados se expresaron en Mg ha^{-1} .

El número de plantas por metro lineal se evaluó en el momento de determinar la biomasa en madurez fisiológica. Teniendo en cuenta la distancia entre filas de siembra, se obtuvo el número de plantas ha^{-1} . Una vez en el laboratorio y antes de poner las muestras en la estufa se contó el número de espigas por metro lineal. Teniendo en cuenta el número de plantas que constituía la muestra, se calculó el número de espigas planta⁻¹. Se seleccionaron 20 espigas al azar de cada parcela, se desgranaron y se contó el número de granos que contenía la muestra con un contador de semillas (Numigral, GTEP, Villeneuve la Garenne, France) adaptado al trigo, obteniendo el n° granos espiga⁻¹. Finalmente, para determinar el peso de 1000 granos, se partió de la muestra obtenida, seleccionando 10 g de granos enteros y contando el número con el mismo cuentagranos.

La microcosechadora de parcelas de ensayo (Hege, Nurserymaster Elite plot combine, Wintersteiger, Ried, Austria) proporcionaba directamente en campo la producción de cada parcela experimental. El rendimiento en trigo se expresó en Mg ha^{-1} .

2.2.4. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en planta

Para el diagnóstico de la fertilización nitrogenada en la planta de **maíz**, se midieron los mismos indicadores descritos en el Capítulo I (apartado 2.2.7). Se evaluó el contenido en clorofila de las hojas (SPAD) en floración y se analizó el contenido de nitratos en la base del tallo y de N de la planta entera en madurez fisiológica. Además, se determinó el N en la planta entera en el estadio V6, siguiendo el método Kjeldhal.

2.2.5. Calidad

En maíz, los parámetros de calidad del grano evaluados fueron los mismos que los descritos en el Capítulo I (apartado 2.2.8): peso hectolítrico, humedad, contenido de N.

En el momento de la cosecha **del trigo**, se guardó una muestra de 1 kg de grano por parcela para la evaluación del contenido de N.

La determinación del peso hectolítrico y la humedad de la muestra se llevó a cabo simultáneamente mediante un equipo Dickey-John-GAC II siguiendo la metodología habitual. Las lecturas se tomaron directamente en kg HI^{-1} y en porcentaje (que se transformó en g kg^{-1}) respectivamente.

El contenido en proteína bruta del grano se determinó siguiendo el método Kjeldhal, a partir de las muestras de grano previamente molidas. Los resultados obtenidos se expresaron en g N kg⁻¹ de grano.

2.2.6. Extracciones de Nitrógeno

El cálculo de las extracciones de N del **maíz** se hizo como se ha descrito en el Capítulo I (apartado 2.2.9).

2.3. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron tratados estadísticamente mediante el paquete estadístico SAS (SAS Inst., 1989) usando el PROC GLM. Las diferencias significativas entre tratamientos se determinaron mediante el test de separación de medias LSD para P<0,05. Se llevaron a cabo contrastes ortogonales cuando se consideró necesario.

El ajuste de las curvas de respuesta del maíz a la dosis de N se realizó utilizando el programa TableCurve 2D V2.03 (Jandel Scientific, 1994).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evolución de las condiciones del suelo

3.1.1. Contenido de NO_3^- -N en el suelo

Los datos correspondientes al contenido de NO_3^- -N en el suelo en la siembra y la cosecha del cultivo de maíz se presentan en la Tabla III.4 y la Figura III.7; los de la siembra y cosecha del cultivo de trigo en la Tabla III.5.

Durante el cultivo de Maíz

El contenido medio de NO_3^- -N en el suelo (0-120 cm) en el momento de la siembra del maíz en el tercer año de monocultivo fue de 48 kg ha⁻¹ mientras que en la rotación después de alfalfa fue de 85 kg ha⁻¹. En cosecha, en el monocultivo, el contenido medio fue de 24 kg ha⁻¹ y en la rotación con la alfalfa aumentó con la dosis de fertilizante de 35 a 51 kg ha⁻¹.

La **dosis de N** en el maíz afectó el contenido de NO_3^- -N en el suelo en el momento de la cosecha para el conjunto monocultivo-rotación. Esta respuesta vendría condicionada por el aumento de NO_3^- -N en función de la dosis de N que se observó en las parcelas en rotación con la alfalfa y que, en cambio, no se detectó en el monocultivo (Figura III.7). Como se ha analizado en el Capítulo I (apartado 3.1.1) en el monocultivo, los contenidos similares y bajos en cosecha podrían ser debidos a unas extracciones por el cultivo mayores de las habituales y a una pluviometría y una dosis de riego elevadas que podrían haber provocado una lixiviación de nitratos. El contenido inicial de N antes de sembrar el maíz después de la alfalfa presentaba valores similares ya que se trataba de una parcela en la que se había cultivado alfalfa durante dos años con un manejo homogéneo en toda la superficie. En las parcelas en monocultivo, la homogeneización de los contenidos de NO_3^- -N en siembra se ha observado en las distintas campañas (Capítulo I, apartado 3.1.1) y podría deberse a una mineralización de la materia orgánica y una lixiviación de nitratos durante los meses invernales.

Tabla III.4. Contenido en NO_3^- -N en el suelo (0-120 cm) en la siembra y la cosecha del cultivo de maíz en función de la dosis de fertilizante aportada (Nm) y de la rotación (monocultivo de maíz -BM- o rotación con alfalfa -Rot). Torregrossa, 1996.

Tratamientos y estadística	MAÍZ			
	Siembra		Cosecha	
	Monocultivo (BM)	Rotación (Rot)	Monocultivo (BM)	Rotación (Rot)
Dosis en maíz (Nm) (kg N ha ⁻¹):	<u>kg NO₃⁻-N ha⁻¹</u>			
0	49	80	23	35
100	46	75	24	37
200	49	91	23	41
300	49	94	25	51
Significación	NS	NS	NS	*
Contraste:				
0 vs. otros	-	-	-	*
Cuadrático	-	-	-	NS
Rotación (R):				
BM	48		24	
Rot	85		41	
	<u>ANOVA para Monocultivo-Rotación</u>			
Significación				
Rotación (R)		*		**
Error a				
Nm		NS		**
Contraste:				
0 vs otros		NS		*
Cuadrático		NS		NS
Nm * R		NS		*
Error b				

** , * Significativo para $P < 0,01$ y $P < 0,05$ respectivamente. NS, no significativo.

El factor **Rotación** afectó el contenido en NO_3^- -N en el suelo tanto en el momento de la siembra como después de la cosecha del maíz. Como se puede apreciar en la Figura III.7, el contenido inicial medio de NO_3^- -N en el suelo en las parcelas en monocultivo fue sensiblemente inferior al de las parcelas en las que el precedente había sido la alfalfa (48 frente a 85 kg ha⁻¹). Teniendo en cuenta que en la parcela experimental de Torregrossa la textura es franca, pero al límite de clases texturales más finas (Capítulo I, apartado 3.1.3), estos valores presentarían diferencias inferiores a las que Lory et al. (1995b) encontraron en una rotación alfalfa-maíz. Estos autores citan diferencias de 40 kg NO_3^- -N ha⁻¹ después de la alfalfa respecto a un monocultivo en suelos franco-limo-arenosos y de 100 kg ha⁻¹ en suelos franco-arcillosos.

Al cosechar, los contenidos medios mantuvieron proporciones similares, siendo de 24 kg NO_3^- -N ha⁻¹ en el monocultivo y de 41 kg NO_3^- -N ha⁻¹ en la rotación. El-Hout y Blackmer (1990) propusieron una ecuación que explicaría la variación del contenido en NO_3^- -N en el suelo en base a la dosis de N aplicada pero también los años que duró la alfalfa. En la

parcelas de Torregrossa, la alfalfa estuvo en campo solo dos años, menos de lo habitual en la zona. Una alfalfa de 4 años, más frecuente, podría haber acumulado mayor cantidad de N (Lory *et al.*, 1995b). Justes *et al.* (2001), en una rotación alfalfa-trigo en el norte de Francia, observaron un enriquecimiento en NO_3^- -N del suelo debido a la leguminosa que empezó pocos días después de levantar la alfalfa y se fue produciendo de manera continua. Ferrer *et al.* (2003) observaron también en sus ensayos en las proximidades de Torregrossa un aumento de NO_3^- -N después de la alfalfa que no habían detectado en el monocultivo de maíz. Estos valores pondrían de manifiesto que el enriquecimiento en N del suelo debido a la alfalfa seguiría patente después de un cultivo de maíz y disponible para el cultivo siguiente o con un riesgo de lixiviación.

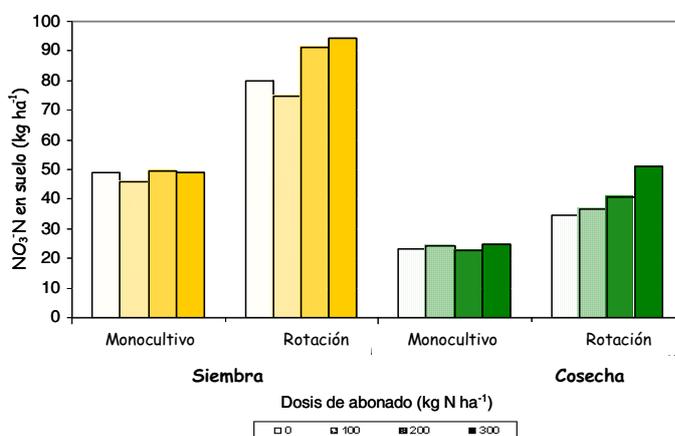


Figura III.7. Contenido de NO_3^- -N en el suelo (0-120 cm) en siembra y cosecha después de una rotación con alfalfa o en un monocultivo de maíz y con 4 dosis de fertilizante nitrogenado (0, 100, 200, 300 kg N ha^{-1}). Torregrossa, 1996.

La interacción **Dosis de N * Rotación** en cosecha indica una respuesta distinta a la dosis de abonado nitrogenado en la rotación y el monocultivo. En las parcelas en monocultivo se observa una homogeneidad que no presentan las parcelas en rotación con la alfalfa. Como se ha comentado anteriormente, esta similitud de resultados podría ser debida a un lavado de nitratos durante el cultivo y a unas extracciones particularmente elevadas. Hay que tener en cuenta que los factores que podrían facilitar la lixiviación (textura del suelo, lluvia, dosis de riego) y las aportaciones de N a través del agua de riego fueron los mismos para los dos tratamientos (rotación y monocultivo) y que las extracciones de N fueron mayores en las parcelas en rotación que en las en monocultivo (apartado 3.2.4). Por otra parte, el enriquecimiento en N del suelo debido a la mineralización de los residuos de los cultivos anteriores fue distinto en los dos

tratamientos: en las parcelas en monocultivo, se trata de restos de maíz, enterrados meses antes, mientras que en las parcelas en rotación, los residuos de la alfalfa, enterrados poco antes de la siembra, podrían haber producido un aumento paulatino del $\text{NO}_3\text{-N}$ en el suelo durante el cultivo. Además de ser enterrados en momentos distintos, los dos tipos de residuos presentan una relación C/N diferente (Smith y Sharpley, 1990). Varvel y Wilhelm (2003) observan que el N de las leguminosas tarda algún tiempo en estar disponible. De todas maneras este enriquecimiento se habría producido uniformemente en toda la parcela principal, ya que el manejo de la alfalfa anterior había sido el mismo, y no explicaría las diferencias de respuesta a la dosis de fertilizante nitrogenado en el maíz en cosecha. En consecuencia, únicamente el nivel inicial de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el suelo (prácticamente el doble en la rotación que en el monocultivo) podría explicar la interacción Dosis de N * Rotación. En las parcelas en monocultivo de maíz, donde el nivel de nitratos inicial fue reducido, se produjo un empobrecimiento del suelo, incluso con las dosis más elevadas de fertilizante. En las parcelas en rotación, donde se parte de un nivel de nitratos en el suelo mayor, el cultivo no extrajo todo el $\text{NO}_3\text{-N}$ disponible. Estos resultados sugieren la importancia de ajustar la fertilización N después de una leguminosa, aun teniendo en cuenta la dificultad de determinar su aportación con análisis de suelos convencionales (Varvel y Wilhelm, 2003; El Hout y Blackmer, 1990). Bundy y Andraski (1993) advierten que en una rotación alfalfa-maíz, un análisis de suelo al principio del cultivo no es un buen indicador del N disponible para el maíz ya que todavía solo se ha mineralizado una parte reducida del N orgánico potencialmente disponible de los residuos de la alfalfa. En estas situaciones aconsejan, como mejor medida, el PSNT.

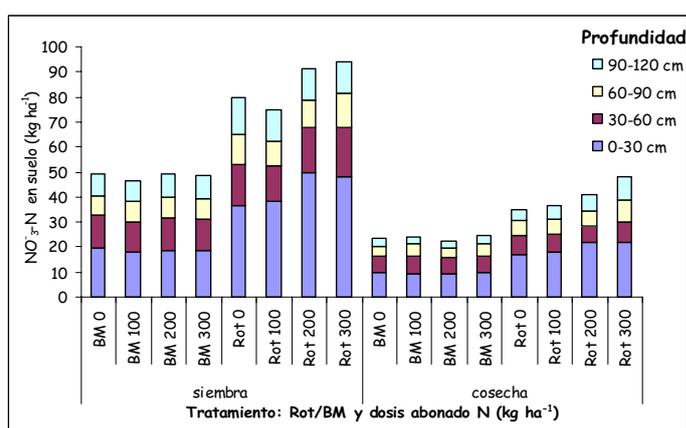


Figura III.8. Contenido en $\text{NO}_3\text{-N}$ del suelo por profundidades (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 cm) en siembra y cosecha después de una rotación con alfalfa o en un monocultivo de maíz y con 4 dosis de fertilizante nitrogenado (0 100, 200, 300 kg N ha^{-1}). Torregrossa, 1996.

El análisis de contenido en NO_3^- -N del suelo **por profundidades** mostró diferencias entre el monocultivo y la rotación, tanto en el momento de la siembra como en el de la cosecha para los horizontes 0-30 cm, 60-90 cm y 90-120 cm (análisis estadístico no mostrado). En la Figura III.8 se aprecia como en el momento de la siembra, el contenido en NO_3^- -N de las parcelas en rotación se concentra en gran medida en el horizonte superficial (0-30 cm). Además, este contenido de NO_3^- -N superficial es sensiblemente superior en la rotación ($43 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$) que en el monocultivo de maíz ($19 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$), mostrando que el enriquecimiento en N del suelo debido a la alfalfa se concentra principalmente en los 30 primeros cm del suelo. Este enriquecimiento estaría en relación con la presencia de la mayor parte de los nódulos fijadores de N_2 de la alfalfa en los 25 primeros centímetros del suelo (Gault *et al.*, 1995). Bundy y Andaski (1993) se basan en este aumento del nitrógeno-nítrico principalmente en el horizonte superficial para sugerir el análisis únicamente de los 0-30 cm para las recomendaciones de abonado. En el momento de la recolección, el contenido en NO_3^- -N se había reducido en todos los horizontes. Sin embargo, se observa una acumulación de NO_3^- -N en el horizonte superior que sigue siendo el doble después de la alfalfa (20 kg ha^{-1}) que en el monocultivo de maíz (10 kg ha^{-1}). Esta diferencia mostraría que la aportación de N debida a la alfalfa se siguió detectando, como mínimo, hasta el final del cultivo de maíz.

Durante el cultivo de Trigo

Los contenidos de NO_3^- -N en el suelo de la siembra del trigo coinciden con los de la cosecha del maíz (Tabla III.5), con una media de $24 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$ en el monocultivo y de $41 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$ después de la alfalfa, y una acumulación de NO_3^- -N en el horizonte superficial. Según el análisis estadístico, después del trigo no se detectaron diferencias en el contenido de NO_3^- -N en el suelo según el cultivo precedente (factor rotación), a pesar de registrarse contenidos de 51 y 40 kg ha^{-1} en la rotación y en el monocultivo respectivamente.

En la cosecha del trigo, el contenido en NO_3^- -N en el suelo fue de 42 kg ha^{-1} en las parcelas en las que no se había aportado fertilizante nitrogenado, valor que aumentó hasta 49 kg ha^{-1} donde se aportaron 100 kg N ha^{-1} en cobertera. Estos resultados indicarían que la dosis de N aportada al trigo condicionó el contenido final de NO_3^- -N en el suelo (0-120 cm) en el momento de la cosecha. El manejo posterior de la parcela tendría que evitar que este NO_3^- -N residual en el suelo esté sujeto a posibles lixiviaciones posteriores, aunque que la recolección se realizara en julio, época de menor riesgo (Justes *et al.*, 2001).

Tabla III.5. Contenido en de NO_3^- -N en el suelo (0-120 cm) en la siembra y la cosecha del cultivo de trigo en función de la dosis de fertilizante aportada al propio cultivo de trigo (Nt), de la dosis de fertilizante aportada al cultivo precedente de maíz (Nm) y de la rotación anterior (monocultivo de maíz - BM- o rotación con alfalfa - Rot). Torregrossa, 1996-97.

Tratamientos y estadística	TRIGO	
	Siembra	Cosecha
Dosis N en trigo (Nt) (kg N ha ⁻¹):	<u>kg NO₃⁻-N ha⁻¹</u>	
0	32	42
100	32	49
Dosis N en maíz (Nm) (kg N ha ⁻¹):		
0	29	42
100	30	47
200	32	46
300	38	47
Rotación (R):		
BM	24	40
Rot	41	51
	<u>ANOVA para BM-Rot</u>	
Significación		
Rotación (R)	**	NS
Error a		
Nm	**	NS
R * Nm	*	NS
Error b		
Nt	-	**
R * Nt	-	*
Nm * Nt	-	NS
R * Nm * Nt	-	NS
Error c		

** , * Significativo para $P < 0,01$ y $P < 0,05$ respectivamente.
NS, no significativo

En distintos estudios de rotaciones, se citan aumentos en el contenido en NO_3^- -N en el suelo hasta el segundo cultivo tras la alfalfa. Vanotti y Bundy (1995) realizaron un estudio sobre distintas rotaciones en Wisconsin (USA) y observaron que, en una rotación soja-maíz-avena, la absorción de N por parte de la avena estaba relacionada con el contenido de NO_3^- -N en el horizonte 0-30 cm en el momento de su siembra y del N que se pueda haber mineralizado durante el cultivo. En una rotación alfalfa-maíz-maíz que Halvorson *et al.* (2005) estudiaron en Colorado (USA), el NO_3^- -N residual en el suelo empezó a disminuir después de dos ciclos de maíz. Andraski *et al.* (2000), en Wisconsin (USA), detectaron contenidos de NO_3^- -N superiores en un maíz de segundo año después de la alfalfa, tanto en siembra como en cosecha. Justes *et al.* (2001) en sus rotaciones alfalfa-trigo-trigo en el norte de Francia, observaron un enriquecimiento en NO_3^- -N del suelo que se prolongó durante 18 meses y cuyo ritmo apenas disminuyó durante el invierno. El segundo cultivo tras la alfalfa aprovechó el efecto residual. En su caso, se

trata de suelos pedregosos y calcáreos donde las pérdidas fueron, probablemente, elevadas. A partir de estas observaciones, Justes *et al.* (2001) recomiendan medir sistemáticamente el contenido en NO_3^- -N al final de cada cultivo después de una alfalfa para ajustar la fertilización nitrogenada lo más posible para el cultivo siguiente.

Se observa, en cambio, que la fertilización mineral aportada en el cultivo de maíz anterior no afectó el contenido de NO_3^- -N en el suelo después del trigo.

La interacción **Rotación * Dosis de N en trigo** muestra, por su parte, el efecto acumulativo de los dos factores en el contenido en NO_3^- -N en el suelo. En las parcelas donde la sucesión de cultivos había sido Maíz-Maíz-Maíz-Trigo se detectaron 38 y 41 kg ha^{-1} según si el trigo se había abonado con 0 ó 100 kg N ha^{-1} . Donde la rotación había sido Alfalfa-Maíz-Trigo, el contenido fue de 45 y 57 kg ha^{-1} respectivamente. Así, la dosis 0 kg N ha^{-1} en la rotación Alfalfa-Maíz-Trigo, presentó valores superiores a los de la dosis 100 kg N ha^{-1} después del monocultivo Maíz-Maíz-Maíz-Trigo, poniendo de manifiesto que, después de la cosecha del segundo cultivo después de la alfalfa, se seguiría viendo un efecto residual de la alfalfa. Además, la acumulación de NO_3^- -N relacionada con la aportación de 100 kg N ha^{-1} , mayor en la rotación con la alfalfa que en el monocultivo, podría mostrar el efecto acumulativo del abonado N tras la alfalfa en el NO_3^- -N residual.

Los contenidos de NO_3^- -N en el suelo en encañado mostraron un comportamiento similar al de la cosecha (resultados no mostrados). No se detectó respuesta ni al abonado N en el maíz anterior, ni a la rotación, lo que mostraría que el paso de respuesta (en siembra) a la no respuesta (en cosecha) se produjo antes del mes de febrero, antes del encañado.

3.1.2. Contenido de materia orgánica del suelo en el momento de la siembra del maíz de tercer año

El contenido de MO del suelo, medido poco antes de la siembra del maíz, varió ligeramente en las distintas parcelas. Como se ha observado en el Capítulo I (apartado 3.1.3), la incorporación de los residuos vegetales después de la cosecha en el monocultivo de maíz cada año indujo algunas diferencias entre los distintos tratamientos, aún que no significativas estadísticamente. En aquellos en que había habido más producción de biomasa, la cantidad de MO era mayor (2,6%) que en aquellos en que la biomasa producida había sido inferior (2,3%), coincidiendo con las dosis más bajas de fertilizante nitrogenado. En cambio, los bloques en rotación en los que el cultivo precedente había sido alfalfa, el contenido en MO al inicio del cultivo de maíz fue homogéneo, del orden de 2,5%, similar al de las dosis más altas de fertilizante en el monocultivo (Figura III.9).

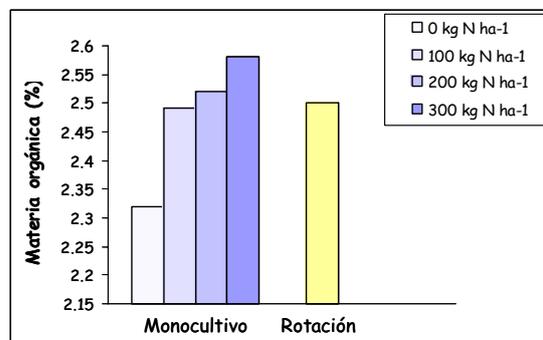


Figura III.9. Contenido en materia orgánica en el suelo (0-30 cm) en el momento de la siembra del maíz. En monocultivo, después de aplicar durante dos años cuatro dosis distintas de abonado N. En rotación, la media de las cuatro repeticiones después de dos años de alfalfa. Diferencias no significativas (NS) entre tratamientos.

Los residuos de la planta de maíz se habían incorporado al suelo poco después de la cosecha anterior. Los resultados analizados en el Capítulo I sugieren que se produjo algún tipo de mineralización durante los meses invernales, aunque reducida. La alfalfa, en cambio, había sido levantada poco antes de la preparación del terreno, en febrero. Es probable que los restos de coronas y sistema radicular incorporados al suelo no tuvieran tiempo de descomponerse y que la cantidad de N mineralizado haya sido mínima antes de la siembra del maíz en rotación con la alfalfa.

Estos aspectos de manejo indican que la MO se iría descomponiendo durante el cultivo, más o menos rápidamente en función de las condiciones de humedad y temperatura (Jarvis *et al.*, 1996). Hay que considerar que se trata de dos especies distintas, cuyos residuos, tallo, hojas y raíces de maíz por un lado y coronas y raíces de alfalfa por otra, tienen una relación C/N diferente (64,3 para el maíz y 15,6 para la alfalfa; Smith y Sharpley, 1990). Estos valores de C/N indican que la mineralización de N en las parcelas en rotación después de alfalfa y el enriquecimiento en N será más rápida que en las de monocultivo de maíz. El efecto de estos residuos y su manejo en el ciclo nutritivo del sistema, en el balance de N y en las necesidades de fertilización nitrogenada (Kumar y Goh, 2002; Raiesi, 2006) se vería afectado por estos valores de C/N pero también por las características del suelo y las condiciones ambientales (Gil y Fisk, 2001).

A partir de la ecuación del Balance de N de Meisinguer y Randall (1991) y utilizada en el Capítulo I (apartado 2.2.9), la mineralización calculada durante el período de cultivo fue de 119 kg N ha⁻¹ en el monocultivo y de 208 kg N ha⁻¹ en la rotación.

3.1.3. Contenido de nitratos en el agua de riego y efecto de la rotación en la solución del suelo

El contenido medio de nitratos del agua de riego medido durante el cultivo de maíz fue de 29 mg L^{-1} , con valores que llegaron en varias ocasiones a los 40 mg L^{-1} . Por lo tanto, a la hora de recomendar dosis de abonado N y de analizar los resultados del presente estudio, hay que tener en cuenta que mediante el riego se aportaron unos 50 kg N ha^{-1} durante la campaña.

El efecto del cultivo precedente (maíz o alfalfa) y de la dosis de fertilizante nitrogenado en la concentración de NO_3^- -N en la solución del suelo a 120 cm de profundidad durante el ciclo de cultivo viene representado en la Figura III.10. La falta de datos estadísticos se debe a que únicamente se colocaron sondas de succión en dos bloques (apartado 2.2.2).

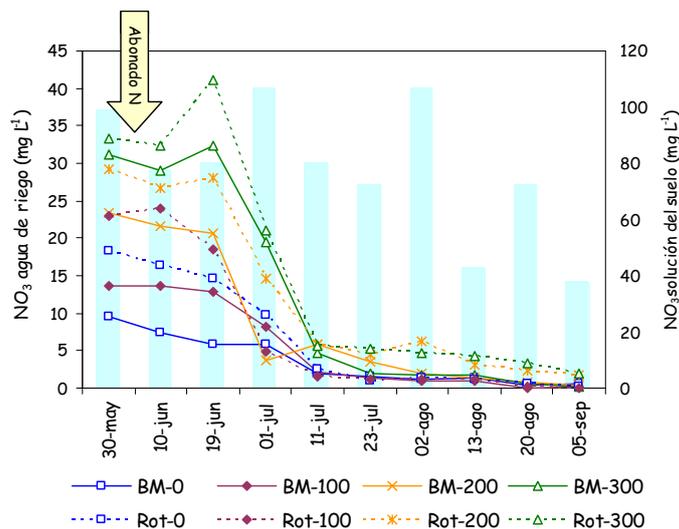


Figura III.10. Contenido de NO_3^- en el agua de riego (□) y evolución del contenido de NO_3^- -N en la solución extraída en las sondas de succión durante el ciclo de cultivo de maíz en monocultivo (BM) y en rotación con la alfalfa (Rot) en función de 4 dosis de abonado nitrogenado (0, 100, 200, 300 kg N ha^{-1}). Torregrossa, 1996.

A las observaciones anotadas en el Capítulo I conviene añadir las siguientes:

- Como se observaba en el monocultivo de maíz (Capítulo I, apartado 3.1.4), la disminución brusca del NO_3^- -N de la solución del suelo después de unas lluvias fuertes a finales de junio se observa igualmente en las parcelas en rotación. Esto indicaría que los nitratos provenientes de un cultivo precedente como la alfalfa

son sujetos a una lixiviación semejante a los que provienen del fertilizante mineral.

- La riqueza en $\text{NO}_3\text{-N}$ de la solución del suelo fue superior en las parcelas en rotación (primer año de maíz tras alfalfa) que en las de monocultivo (tercer año de maíz) para todas las dosis de fertilizante y a lo largo de todo el ciclo. Este enriquecimiento sería debido a la mineralización de la alfalfa precedente (Andrasky *et al.*, 2000). Hasta el final del mes de junio, el contenido de $\text{NO}_3\text{-N}$ de la solución del suelo fue un 40-60% inferior en el monocultivo que en la rotación. Posteriormente estas diferencias se redujeron.
- La curva correspondiente al contenido de $\text{NO}_3\text{-N}$ en la solución del suelo de las parcelas en rotación con la alfalfa en las que no se aportó fertilizante nitrogenado (Rot-0), se sitúa entre las curvas correspondientes a las dosis 100 y 200 kg N ha^{-1} en monocultivo (Mono-100 y Mono-200). Esto haría pensar que el contenido en nitratos en el suelo fue equivalente al de una dosis entre 100 y 200 kg N ha^{-1} hasta finales de julio, coincidiendo con el valor de sustitución de fertilizante nitrogenado (N-FRV) en una rotación Alfalfa-Maíz, evaluado en el Capítulo II.
- Al final del ciclo de cultivo, a partir del momento en que se han superado la fase de mayor absorción por parte del cultivo, el contenido de $\text{NO}_3\text{-N}$ en la solución del suelo es prácticamente insignificante. Únicamente las dosis 200 y 300 kg N ha^{-1} en rotación con la alfalfa (Rot-200 y Rot-300), presentan todavía alguna concentración detectable, del orden de 6,3 y 8,8 mg L^{-1} . Este contenido superior al de los otros tratamientos podría indicar la posibilidad que siga habiendo algún tipo de mineralización del N de la alfalfa residual. Justes *et al.* (2001) considera que la mineralización de los residuos de la alfalfa puede durar unos 18 meses en los suelos calcáreos de la Champagne (Francia).

La concentración media de $\text{NO}_3\text{-N}$ en la solución del suelo en las dosis 0 y 100 kg N ha^{-1} tras la alfalfa fue de 19 y 24 mg L^{-1} , parecida a los 18 y 24 mg L^{-1} que midieron Coth y Fox (1998) en un ensayo similar con dosis de 50 y 100 kg N ha^{-1} en un maíz después de tres años de alfalfa.

Estas pérdidas de nitratos superiores en las parcelas en rotación con una leguminosa respecto a las que están en monocultivo estarían en la línea de las conclusiones de Beaudoin *et al.* (1992), Rasse *et al.* (1999) y Spietz y Sibma (1986) cuando consideran

que la alfalfa puede llegar a ser un cultivo contaminante en el norte de Francia, Bélgica y Holanda. Por ello, Justes *et al.* (2001) aconseja, en la Champagne francesa, levantar la alfalfa poco antes de la siembra del cultivo siguiente, para evitar así las pérdidas de NO_3^- -N durante el periodo sin extracciones, o de sembrar un cultivo que extraiga estos nitratos suplementarios (catch crops). En los sistemas de regadío por gravedad del Valle del Ebro, la problemática es distinta de la de los países del norte de Europa, noreste de USA o Canadá, donde las lixiviaciones se producen entre otoño y primavera, cuando la evapotranspiración es baja. En las condiciones mediterráneas, con pluviometrías reducidas, la lixiviación se produce principalmente durante el cultivo, cuando el agua de riego facilita el drenaje (Daudén y Quílez, 2003). En las zonas vulnerables como el término municipal de Torregrossa, regadas por gravedad, la fertilización debe planificarse aún más adecuadamente después de una leguminosa para reducir las pérdidas de N por lixiviación y minimizar la concentración de NO_3^- -N en el agua de drenaje durante el cultivo.

La alfalfa puede aumentar o disminuir las pérdidas por lixiviación, dependiendo del sistema de manejo del cultivo (Rase y Smucker, 1999). Estos autores estudiaron la importancia de la lixiviación de nitratos en una maíz tras una alfalfa comparando un no-laboreo y un laboreo convencional. Las cantidades de nitratos que se perdieron por lixiviación durante el cultivo del maíz fueron similares. Los porcentajes de drenaje mayores en el no-laboreo se vieron compensados por concentraciones de nitratos menores en los lixiviados.

3.2. Efecto de la rotación en el maíz

3.2.1. Rendimiento en grano

Como se ha expuesto en el Capítulo II, el rendimiento en grano medio fue de 14,7 Mg ha^{-1} en la rotación con la alfalfa y de 11,9 Mg ha^{-1} en el monocultivo (Tabla III.6). Conviene resaltar que, después de dos años de alfalfa y sin fertilización nitrogenada en el maíz, se cosecharon 12,9 Mg ha^{-1} de grano al 14% de humedad, rendimiento correcto para el cv. Juanita en la zona de estudio.

A las observaciones anotadas en el Capítulo II acerca del rendimiento de grano, convendría añadir las siguientes:

- El nivel inicial de NO_3^- -N en el suelo en las parcelas en rotación, al que habría que añadir los 50 kg N ha^{-1} aportados mediante el agua de riego, podría explicar

en parte la escasa respuesta a la dosis de fertilizante después de la alfalfa. Sin embargo, en la misma parcela de estudio, en 1994 y 1995, se observaron diferencias en la producción de grano, a pesar de partir de niveles sensiblemente superiores de NO_3^- -N en el suelo. Estas observaciones pondrían de manifiesto el aumento paulatino de NO_3^- -N que se habría producido durante el cultivo (Paré *et al.*, 1992) y no cuantificado en los análisis iniciales del suelo en siembra.

- Bundy y Andraski (1993) y Andraski y Bundy (2002) en Wisconsin (USA) o Ferrer *et al.* (2003) en un ensayo cercano a Torregrossa tampoco detectaron respuesta al fertilizante nitrogenado después de la alfalfa mientras que en el monocultivo, si la encontraban. Paré *et al.* (1992) no observaron diferencias de rendimiento de grano de maíz entre las distintas dosis de N aportadas después de un cultivo de soja (*Glycine max* [L.] Merr.) o de haba (*Vicia faba* L.) en las condiciones del Québec (Canada). Rasse y Smucker (1999), a partir de resultados similares mostraron la necesidad de reducir drásticamente la fertilización nitrogenada en un maíz en rotación con la alfalfa. A partir de los resultados obtenidos en sus ensayos Lory *et al.* (1995b), matizaron que la respuesta al abonado N en la producción de grano tras una alfalfa puede variar en función de la textura del suelo, aunque ligeramente. En 1995, Bundy y Andraski vieron la necesidad de realizar más estudios que permitieran separar las condiciones de producción en las que cabe esperar alguna respuesta al abonado N tras la alfalfa de aquellas en las que no habría respuesta.
- Con la alfalfa como cultivo precedente, el rendimiento fue de $12,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ en las parcelas sin fertilizar y de $15,1$ - $15,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ en las parcelas que recibieron cierta dosis de N. Estos resultados coinciden con los que obtiene Scharf (2001) en las condiciones de Missouri (USA). Esta diferencia, a pesar de no ser estadísticamente significativa, puede ser importante para el agricultor.
- El rendimiento en las parcelas en monocultivo fue inferior al de las parcelas en rotación. En el Capítulo II se ha anotado que después de la alfalfa y sin abonar, el rendimiento fue equivalente al que se habría obtenido con una dosis de 160 kg N ha^{-1} en el monocultivo.
- Este aumento de rendimiento podría ser debido a la aportación de N por parte de la alfalfa pero también al *efecto rotación* que incluiría una mejora de las condiciones del suelo y una reducción de la incidencia fitopatológica. Paralelamente, la reducción del rendimiento en el monocultivo podría ser debida al efecto negativo de tres años de monocultivo de maíz en una misma parcela (Vanotti y Bundy, 1995).
- Atendiendo a las observaciones de Blackmer (1987), podría llegar un punto en que el rendimiento en grano del maíz, que no responde a la dosis de N después

de la alfalfa, se igualara al del monocultivo con altas dosis de N. Un estudio con dosis más altas de fertilizante nitrogenado habría permitido ver con qué dosis los rendimientos son equivalentes en ambos sistemas de producción.

- Para el conjunto rotación-monocultivo se observa una respuesta a la dosis de fertilizante.
- La interacción Dosis de N * Rotación muestra que la respuesta a la dosis de fertilizante no fue la misma en el monocultivo que en la rotación. Como se ha explicado en el Capítulo II, el aumento en rendimiento de grano fue más importante en el monocultivo que en la rotación.

Tabla III.6. Rendimiento de grano de maíz (14%) en función de la dosis de abonado nitrogenado en maíz (Nm) Y del tratamiento monocultivo (BM) o Rotación (Rot). Torregrossa, 1996.

Tratamientos y estadística	Rendimiento en grano	
	Monocultivo (BM)	Rotación (Rot)
Dosis en maíz (Nm) (kg N ha ⁻¹):		
	<u>Mg ha⁻¹</u>	
0	8.2 A	12.9
100	11.6 B	15.4
200	13.5 C	15.1
300	14.3 C	15.2
Significación	**	NS
Contrastes:		
0 vs. otros	**	—
Cuadrático	**	—
Rotación (R):		
BM		11.9
Rot		14.7
	ANOVA para Monocultivo-Rotación	
Significación		
Rotación (R)		**
Error a		
Nm		**
Contrastes:		
0 vs otros		**
Cuadrático		**
Nm * R		*
Error b		

** , * Significativo para P< 0,01 y P<0,05 respectivamente.

NS, no significativo

La respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada responde a los modelos de ajuste de curvas propuestos por Cerrato y Blackmer (1990), Bullock (1994) y Makowski (1999) con una zona de respuesta hasta una dosis determinada a partir de la cual no aumenta el rendimiento. En este caso, la zona de no respuesta se produjo a partir de valores sensiblemente distintos según si se trataba de la rotación o del monocultivo. En rotación,

el ajuste fue marcadamente cuadrático-meseta y aumentó hasta el valor máximo (o umbral) de 15,245 Mg ha⁻¹ que correspondería a una dosis de 87 kg N ha⁻¹. Como se ha visto en el Capítulo I (apartado 3.2.1), el rendimiento en monocultivo se ajustó a los modelos cuadrático y cuadrático-meseta ya que las ecuaciones de ambos eran equivalentes hasta el punto de máximo rendimiento (14,263 Mg ha⁻¹) correspondiente a la dosis de 302 kg N ha⁻¹. En la Figura III.11, se han representado las curvas de ajuste para ambos tratamientos curvas. En monocultivo, únicamente se ha expuesto la ecuación correspondiente al ajuste cuadrático-meseta para facilitar las comparaciones.

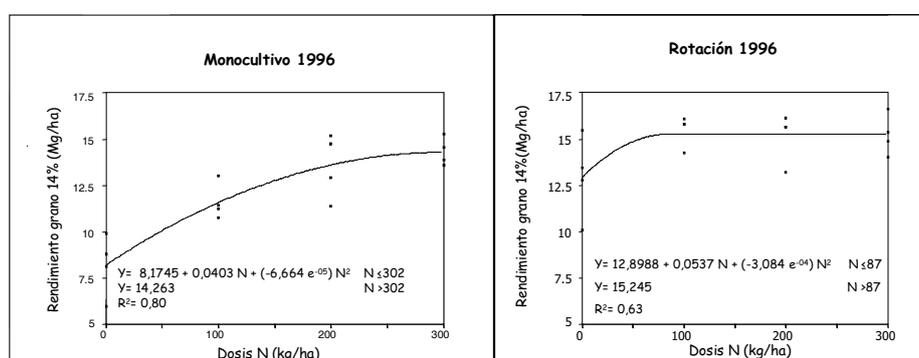


Figura III.11. Comportamiento del modelo de ajuste cuadrático-meseta en monocultivo ($P < 0,001$) y en rotación ($P < 0,01$) respecto al rendimiento en grano de maíz (14 % humedad) para las dosis de N ensayadas (0, 100, 200, 300 kg N ha⁻¹). N: dosis de fertilizante (kg N ha⁻¹).

3.2.2. Componentes del rendimiento

En la Tabla III.7 se presentan los efectos del abonado nitrogenado y de la rotación en los distintos componentes del rendimiento del maíz. Únicamente el número de granos por fila y el peso de 1000 granos respondieron al factor rotación.

El **número de granos por fila** aumentó con la dosis de abonado N y pasó de 29,1 granos por fila en las parcelas sin fertilizar a 35,0 en las que recibieron 300 kg N ha⁻¹. Además, varió en función del cultivo anterior, ya que fue de 35,5 en la rotación con la alfalfa y de 31,1 en el monocultivo. Ambos resultados vendrían explicados por un aumento en el contenido en NO₃-N en el suelo, aunque de origen distinto, y coincidirían con la respuesta que se suele observar en ensayos de abonado N (Uhart y Andrade, 1995b; Plénet *et al.*, 1991; Moser *et al.*, 2006), en que se incrementa el número de granos al aumentar las dosis de N. Si se analiza la respuesta al abonado N en el monocultivo de maíz, se observa que el número de granos por fila aumenta con la dosis, de 25,5 (0 kg N ha⁻¹) a 34,1 granos por fila (300 kg N ha⁻¹), mientras que en la rotación

presenta valores de alrededor de 35,5 granos por fila. La diferencia de comportamiento del número de granos por fila respecto a la dosis de fertilizante N según si se trata de la rotación con la alfalfa o del monocultivo de maíz podría explicar la interacción Rotación * Dosis de N. El nivel inicial de NO₃-N en el suelo, superior, explicaría que después de la alfalfa en rotación, no hubo respuesta de este componente del rendimiento al abonado.

Tabla III.7. Componentes del rendimiento del maíz en función de la dosis de abonado nitrogenado en maíz (Nm) y del tratamiento monocultivo (BM) o Rotación (Rot). Torregrossa, 1996.

Tratamientos y estadística	Densidad	Filas mazorca ⁻¹	Granos fila ⁻¹	Peso 1000 granos	Peso hectolítrico	Humedad grano
Dosis en maíz (Nm) (kg N ha ⁻¹):	<u>pl. ha⁻¹</u>			<u>g</u>	<u>kg Hl⁻¹</u>	<u>g kg⁻¹</u>
0	6868	17.2	29.1	377	72.7	223
100	6923	17.4	33.3	386	71.8	229
200	6958	17.9	35.7	403	73.1	230
300	7028	17.8	35.0	411	72.8	233
Rotación (R):						
BM	6947	17.6	31.1	385	72.5	227
Rot	6941	17.6	35.5	404	72.6	230
ANOVA para Monocultivo-Rotación						
Significación						
Rotación (R)	NS	NS	**	*	NS	NS
Error a						
Nm	NS	*	**	**	NS	NS
Contraste						
0 vs otros	-	*	**	**	-	-
Cuadrático	-	NS	**	NS	-	-
R * Nm	NS	NS	*	NS	NS	NS
Error b						

** , * Significativo para P< 0,01 y P<0,05 respectivamente. NS, no significativo

El **peso de 1000 granos** aumentó en la rotación con la alfalfa respecto al monocultivo de maíz. De acuerdo con Plénet *et al.* (1991) y Uhart *et al.* (1995b) este aumento de peso estaría relacionado con la mayor la cantidad de NO₃⁻-N disponible y explicaría en parte el aumento de producción. Además, el peso de 1000 granos respondió a la dosis de N para el conjunto monocultivo-rotación y en las parcelas en las que el cultivo precedente había sido alfalfa. No obstante, si se analizan separadamente las respuestas a las dosis de N, se observa cierto aumento pero sin llegar a ser diferencias significativas ni en el monocultivo (357-400 g) ni en la rotación (396-422 g).

La **humedad** del grano no se vio afectada por los distintos tratamientos.

3.2.3. Producción de biomasa, LAI, PARI e Índice de cosecha

En la Tabla III.8 presenta la respuesta de la biomasa final, la biomasa en floración, la altura de la planta, el índice de área foliar (LAI) y el índice de intercepción fotosintéticamente activa (PARI) a la rotación y a la dosis de abonado N.

Se puede observar como la **biomasa final** respondió a ambos factores (rotación y dosis de N). En la rotación con la alfalfa, las producciones medias fueron de 30 Mg ha⁻¹, mientras que en el monocultivo, de 26 Mg ha⁻¹. Al mismo tiempo había aumentando de 23 a 32 Mg ha⁻¹ con la dosis de fertilizante. Según las indicaciones de Andrade *et al.* (1996) que citan producciones de 22,5 a 30 Mg ha⁻¹, la biomasa producida en este ensayo podría considerarse como normal-alta. Incluso la producción media acumulada en las parcelas sin fertilizar presentaría valores normales. Analizando los resultados obtenidos en estas últimas en la rotación y el monocultivo individualmente, se puede apreciar como se produjeron cantidades inferiores en el monocultivo (19 Mg ha⁻¹) mientras que en la rotación con la alfalfa, fueron de 26 Mg ha⁻¹. Esta diferencia mostraría el efecto que puede tener un precedente como la alfalfa en la producción de biomasa en el maíz. El contenido en NO₃⁻-N del suelo podría explicar esta respuesta (Andrade *et al.*, 1996) pero es probable que otros factores incluidos en el *efecto rotación* hayan favorecido también esta mayor producción. Finalmente, las condiciones pluviométricas elevadas de 1996 podrían haber favorecido un mayor crecimiento de la planta.

La falta de diferencias entre tratamientos en la **biomasa en floración** podría indicar que el NO₃⁻-N disponible en el suelo habría sido suficiente para el desarrollo de las plantas hasta este estadio y que no se habrían detectado todavía diferencias ni entre el maíz en rotación y el monocultivo de maíz, ni en función de la dosis de N. Ma *et al.* (2003) estudiaron distintas rotaciones que incluían alfalfa y maíz en los ciclos productivos cortos de Canadá y concluyeron que el efecto de la leguminosa en la biomasa de maíz se expresaba sobretodo durante el llenado de grano. Esta consideración explicaría también la falta de respuesta de la biomasa en floración a ambos tratamientos.

Las plantas fueron particularmente **altas** atendiendo a las características del cultivar empleado (Juanita). Sin embargo, son alturas que se pueden presentar en determinadas condiciones de producción (Pioneer, comunicación personal, 2006). La diferencia de altura entre las parcelas en rotación y las de monocultivo era fácilmente apreciable en campo. Esta altura estaría en consonancia con el aumento de producciones de biomasa

final y asociada a los mismos factores: mayor disponibilidad de NO_3^- -N, *efecto rotación*, disponibilidad hídrica, etc.

Tabla III.8. Producción de biomasa final y en floración, altura de la planta, LAI y PARI en función de la dosis de nitrógeno en el maíz (Nm) y del tratamiento Monocultivo (BM) o Rotación (Rot). Torregrossa, 1996.

Tratamientos y estadística	Biomasa final	Biomasa en Floración	Altura	LAI	PARI
Dosis en maíz (Nm) (kg N ha ⁻¹):	<u>Mg ha⁻¹</u>		<u>cm</u>	<u>m² m⁻²</u>	<u>%</u>
0	23	11	222	4.7	86
100	28	12	241	5.6	89
200	30	12	240	5.7	89
300	32	12	244	4.9	89
Rotación (R):					
BM	26	11	228	5.1	87
Rot	30	12	245	5.4	90
	ANOVA para Monocultivo-Rotación				
Signific.					
Rotación (R)	**	NS	*	NS	NS
Error a					
Nm	**	NS	**	*	NS
Contraste:					
0 vs otros	**	NS	**	*	NS
Cuadrático	NS	NS	*	**	NS
R * Nm	NS	NS	NS	NS	NS
Error b					

** , * Significativo para $P < 0,01$ y $P < 0,05$ respectivamente.

NS, no significativo

El **LAI** medido en floración no mostró diferencias significativas entre el maíz en monocultivo y el maíz producido en la rotación con la alfalfa. Sin embargo, analizando los resultados individualmente, se puede apreciar como en la dosis 0 kg N ha⁻¹ se detecta un aumento de 0,6 m²m⁻² entre los dos tratamientos y que este incremento va reduciendo a medida que aumenta la dosis de fertilizante hasta igualarse en la dosis 300 kg N ha⁻¹. Además, tanto en la rotación como en el monocultivo, el LAI máximo se alcanza con la dosis 200 kg N ha⁻¹ y disminuye con la dosis máxima (300 kg N ha⁻¹). En todos los casos, se trata de valores de LAI normales según Uhart y Andrade (1995a).

El **PARI** mostró valores similares para el maíz con distintas dosis de fertilizante y en la rotación o el monocultivo. Los índices fluctuaron entre 84 y 92%. Estos valores más altos mostrarían que en estos tratamientos (Rot-100, Rot-200 y Rot-300), prácticamente se alcanzó la mayor tasa de crecimiento potencial, atendiendo a las indicaciones de Gardner *et al.* (1985).

El **Índice de cosecha** medio fue de 0,43 en la rotación con la alfalfa y de 0,40 en el monocultivo, con valores homogéneos en función de la dosis de N aplicada. Estos resultados coincidirían con Aflakpui *et al.* (1993) que observaron un índice de cosecha superior en el maíz en rotación respecto al maíz en monocultivo.

3.2.4. Contenido en N de grano y planta. Extracciones de N

El contenido en N del grano, el de la planta sin mazorca y las extracciones por el grano, por la planta sin mazorca y totales, respondieron a la dosis de fertilizante aportado (Tabla III.9).

El contenido en **N del grano** aumentó de 8,8 a 11,1 g kg⁻¹ al aumentar la dosis de N. Se trata de valores bajos si se comparan con los que se contabilizaron los dos primeros años del monocultivo (Capítulo I, apartado 3.2.6) o los que obtuvieron Villar *et al.* (2000) o Berenguer *et al.* (2006) en monocultivo en localidades cercanas. En una rotación alfalfa-maíz similar a la estudiada, Bundy y Andraski (1993) evaluaron riquezas de 15,2-15,4 g N kg⁻¹ en el grano del maíz que no recibió fertilizante, valores sensiblemente superiores a los obtenidos en este ensayo. Por otra parte, estos mismos autores y Blackmer (1990) indicaron que, en determinadas ocasiones, la concentración en N del grano puede aumentar con un abonado nitrogenado sin por ello aumentar la cantidad de grano producido, coincidiendo con los resultados obtenidos en este estudio. Lory *et al.* (1995b) vieron en sus rotaciones que el N necesario para obtener una riqueza máxima de N en el grano es sensiblemente inferior al que se precisa en un monocultivo. En Torregrossa se alcanzó un contenido en N del grano de 10,3 g kg⁻¹ con 100 kg N ha⁻¹ en la rotación y con 300 kg N ha⁻¹ en el monocultivo, coincidiendo con las observaciones de Lory *et al.* (1995b).

En la parte de **planta sin mazorca** (stover), el contenido en N también aumentó con la dosis de fertilizante, de 6,5 a 8,6 g kg⁻¹. Atendiendo a las indicaciones de Paré *et al.* (1992), estas diferencias de contenido de N en la parte de planta sin mazorca mostrarían que se produjo, en las dosis más bajas (0, 100 kg N ha⁻¹), una traslocación de N de la parte vegetativa hacia el grano. Si se analizan los contenidos de N en planta sin mazorca en el monocultivo y en la rotación después de la alfalfa separadamente, no se detecta diferencia significativa en ninguno de los dos. Los resultados, sin embargo, sugieren que esta traslocación se habría producido principalmente en el monocultivo.

Si se comparan las parcelas sin fertilizar, el maíz tras la alfalfa presentó unos contenidos de N en el grano y en la parte de planta sin mazorca mayores que en el monocultivo. El cultivo precedente no afectó estadísticamente ambos contenidos de N a pesar de presentar valores mayores en la rotación que en el monocultivo (Tabla III.9).

Tabla III.9. Contenido en N en el grano y en la planta sin mazorca (PsM) y extracción en N por el grano, por la planta sin mazorca y total en función de la dosis de nitrógeno en el maíz (Nm) y del tratamiento Monocultivo (BM) o Rotación (Rot). Torregrossa, 1996.

Tratamientos y estadística	N grano	N PsM	Extracción N Grano	Extracción N PsM	Extracción N total
Dosis en maíz (Nm) (kg N ha ⁻¹):	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
0	8.8	6.5	93	154	247
100	9.5	6.9	130	193	323
200	10.3	7.4	149	220	369
300	11.1	8.6	164	274	438
Rotación (R):					
BM	9.4	6.8	115	179	294
Rot	10.4	7.8	153	241	394
ANOVA para Monocultivo-Rotación					
Signific.					
Rotación (R)	NS	NS	**	*	*
Error a					
Nm	**	*	**	**	**
Contraste:					
0 vs otros	**	NS	**	**	**
Cuadrático	NS	NS	NS	NS	NS
R * Nm	NS	NS	NS	NS	NS
Error b					

** , * Significativo para P< 0,01 y P<0,05 respectivamente. NS, no significativo

Las **extracciones de N** por parte del grano, de la planta sin mazorca y totales, en cambio, mostraron una respuesta a la dosis de fertilizante pero también a la rotación (Tabla III.9). Esta respuesta de las extracciones a la rotación podría venir condicionada por los aumentos de producción de grano y de biomasa analizados anteriormente (apartado 3.2.1 y 3.2.3 respectivamente). En el maíz en monocultivo, el N acumulado en la parte aérea de la planta disminuyó un 43% en las parcelas sin fertilizar respecto a la dosis máxima aplicada (300 kg N ha⁻¹) mientras que en la rotación sólo se redujo en un 15%. Esta diferencia estaría relacionada con las altas producciones de grano y de biomasa del maíz que sigue a la alfalfa aunque no se haya aportado N. Podría mostrar que, durante el ciclo del cultivo, se produjo un enriquecimiento progresivo en NO₃-N en el suelo debido a la alfalfa anterior que, junto con el nivel inicial y las aportaciones por

el agua de riego, habrían representado un nivel de N suficiente para el correcto desarrollo y acumulación de N en la planta. Lory *et al.* (1995b) en un estudio similar en Minnesota detectaron respuestas al cultivo precedente en las extracciones de N por el grano. Sus extracciones por el grano presentaron valores parecidos a los de Torregrossa (90-150 kg N ha⁻¹ en monocultivo y 120-160 kg N ha⁻¹ después de alfalfa) a pesar de obtener rendimientos inferiores (10 Mg ha⁻¹ en la rotación y 8 Mg ha⁻¹ en el monocultivo) indicando mayor riqueza en proteína.

Las extracciones de N totales variaron entre los 22 y los 31 kg por tonelada de grano producido, con valores similares en la rotación y en el monocultivo. Estos valores son medios y altos respectivamente en comparación a los que indican el LAF (1999b) o Boixadera *et al.* (2005)

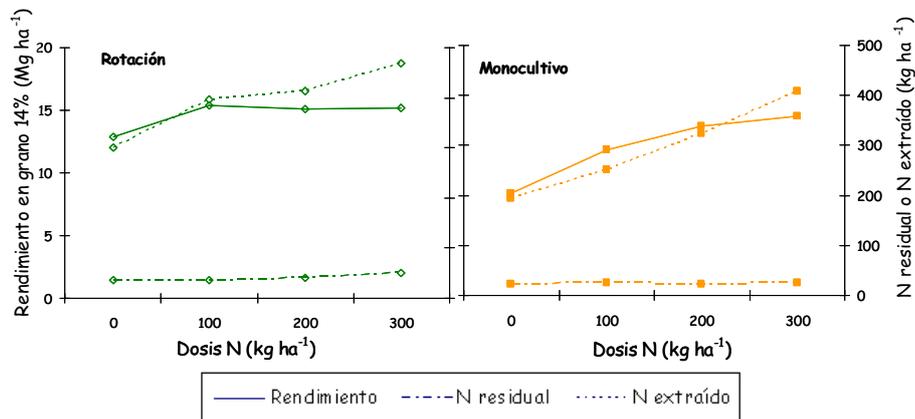


Figura III.12. Efecto de la dosis de fertilizante nitrogenado sobre el rendimiento en grano de maíz, la cantidad de N extraído por la planta y el NO₃⁻-N residual en el suelo (0-120 cm) en el maíz en rotación con la alfalfa y el maíz en monocultivo. Torregrossa, 1996.

La Figura III.12 permite comparar, en el monocultivo de maíz y en el maíz en rotación con la alfalfa, el efecto de las distintas dosis de abonado nitrogenado sobre el rendimiento en grano de maíz, sobre la cantidad total de N extraído por la parte aérea de la planta y sobre el contenido residual de NO₃⁻-N en el suelo en el momento de la cosecha. En ambos casos se observa como, a pesar de una estabilización del rendimiento en grano, las extracciones siguieron aumentando, más en la rotación que en el monocultivo. También se puede apreciar como la acumulación de NO₃⁻-N en el suelo fue reducida en ambos sistemas de producción. Como se ha comentado en el Capítulo I, es probable que este bajo nivel de NO₃⁻-N en el suelo fuera debido a las condiciones climáticas del año, con importantes lluvias a finales de junio y dosis de riego abundantes

que pudieron afectar el nivel de pérdidas de nitratos. Sería interesante poder comparar esta respuesta en campañas menos lluviosas o con menor dotación de agua.

3.2.5. Interés de los métodos de diagnóstico de la fertilidad nitrogenada en el maíz

En la Tabla III.10 se han recopilado las mediciones obtenidas con los distintos métodos utilizados para el diagnóstico del estado nutricional del maíz en este estudio, con objeto de evaluar las necesidades de fertilización del cultivo. Se presentan separados los resultados obtenidos en la rotación con la alfalfa y en el monocultivo para facilitar la discusión de los resultados obtenidos.

Tabla III.10. Contenido en NO_3^- -N en el suelo (0-30 cm) antes del abonado de cobertera (PSNT), contenido de N en la planta entera en V6, lecturas SPAD y contenido de nitratos en la base del tallo en función de la dosis de nitrógeno aportada al maíz (Nm) y del tratamiento Monocultivo (BM) o Rotación (Rot). Torregrossa, 1996.

Tratamientos y estadística	PSNT (0-30 cm)		N V6		SPAD		NO_3^- -N base tallo	
Dosis en maíz (Nm) (kg N ha ⁻¹):	<u>BM</u>	<u>Rot</u>	<u>BM</u>	<u>Rot</u>	<u>Rot</u>	<u>BM</u>	<u>BM</u>	<u>Rot</u>
	<u>kg N ha⁻¹</u>		<u>g kg⁻¹</u>				<u>g kg⁻¹</u>	
0	18 A	29 A	35	36 A	47.5 A	35.0 A	0.03 A	0.03 A
100	21 A	27 A	37	37 A	53.3 B	43.6 B	0.03 A	0.26 AB
200	30 B	42 AB	40	39 A	55.5 B	51.2 C	0.17 AB	0.93 B
300	24 AB	46 B	40	46 B	56.2 B	54.0 C	0.90 B	2.55 C
Rotación (R):								
	BM	23	38		45.9		0.28	
	Rot	36	40		53.1		0.94	
	ANOVA para Monocultivo-Rotación							
Significación								
Rotación (R)		**	NS		**		*	
Error a								
Nm		**	**		**		**	
Contraste:								
0 vs otros		**	**		**		**	
Cuadrático		NS	NS		*		**	
R * Nm		NS	NS		**		*	
Error b								

** , * Significativo para P< 0,01 y P<0,05 respectivamente. NS, no significativo.

El contenido en nitrógeno nítrico en el horizonte superficial del suelo (0-30 cm) antes del abonado de cobertera (**PSNT**) varió en función del cultivo precedente. En las parcelas sin fertilizar, se detectaron 18 kg N ha⁻¹ en el monocultivo y 29 kg N ha⁻¹ en la rotación. El contenido en el monocultivo de maíz fue siempre inferior al de la rotación y, tanto en el monocultivo como en la rotación, respondió al abonado N. Teniendo en cuenta que el enriquecimiento en N por parte de la alfalfa se produce sobretodo en el horizonte superficial (Aflakpui *et al.*, 1992; Ferrer *et al.*, 2003) y que la cantidad de residuos de la

alfalfa fue uniforme en todas las parcelas, las diferencias que se aprecian en el PSNT no pueden ser más que debidas al abono aportado en fondo. En aquellas parcelas en las que no se abonó, no se detectó un empobrecimiento de N, resultado esperable al tratarse de residuos de una leguminosa. En una recopilación de 100 ensayos en Wisconsin, Andraski y Bundy (2002) observaron también contenidos de NO_3^- -N en el suelo (0-30 cm)-PSNT superiores en las rotaciones alfalfa-maíz que en un segundo año de monocultivo de maíz. Al aplicar en fondo sólo $0-22 \text{ kg N ha}^{-1}$, sus observaciones fueron ligeramente inferiores a las medidas en este estudio. En cambio, las determinaciones de PSNT que hicieron en otros ensayos donde no se había aportado todavía fertilizante (todo se aportaba en cobertera) fueron sensiblemente inferiores a las de este ensayo y similares a las de las parcelas sin fertilizar (Bundy y Andraski, 1993).

En base al razonamiento explicado en el Capítulo I (apartado 3.1.2), y utilizando como valor crítico de PSNT de $25 \text{ mg NO}_3^- \text{ N ha}^{-1}$ (Blackmer *et al.*, 1993), en el monocultivo se hubiera tenido que abonar en cobertera con $70-80 \text{ kg N ha}^{-1}$ en todas las parcelas. En la rotación, en cambio, una aportación en cobertera de 70 kg N ha^{-1} en las dosis 0 y 100 kg N ha^{-1} y de 50 kg N ha^{-1} en las dosis 200 y 300 kg N ha^{-1} hubieran sido suficientes. Con el valor crítico de $22 \text{ mg NO}_3^- \text{ N ha}^{-1}$ que Blackmer *et al.* (1997) propusieron para rotaciones con alfalfa en Iowa, las aportaciones en cobertera hubieran tendido que ser de $40-60 \text{ kg N ha}^{-1}$ en todas las parcelas. Posteriormente, Andraski y Bundy (2002) aconsejaron un valor crítico de $21 \text{ mg NO}_3^- \text{ N ha}^{-1}$ en Wisconsin (USA) para después de una alfalfa o cuando ha habido aplicaciones de purines, valor que hubiera implicado aportaciones de $35-55 \text{ kg N ha}^{-1}$ en cobertera. Finalmente, considerando el valor de PSNT crítico que Ferrer *et al.* (2003) propusieron para los regadíos de Lleida y rendimientos de 14 Mg ha^{-1} como los obtenidos en las parcelas en rotación, se hubieran de haber aportado $130-150 \text{ kg N ha}^{-1}$.

Teniendo en cuenta los datos de rendimiento obtenidos, podría decirse que los valores de PSNT $21-22 \text{ mg NO}_3^- \text{ N kg}^{-1}$ indicados por Andraski y Bundy (2002) y por Blackmer *et al.* (1997) respectivamente, serían los más indicados en las rotaciones Alfalfa-Maíz de los regadíos por gravedad de Lleida. Convendría, sin embargo, estudiar el interés económico que pueden tener aplicaciones de $35-60 \text{ kg N ha}^{-1}$ si se tienen en cuenta los costes de aplicación y la dificultad que supone distribuir homogéneamente dosis reducidas.

Scharf (2001) y Fox *et al.* (1989) consideran que la potencial ventaja del PSNT es que indica cuanto N orgánico se está mineralizando en el campo. Este dato puede ser importante en campos que cuentan con una aportación de N orgánico como un cultivo anterior de alfalfa. Estos mismos autores recomiendan, en Iowa o en Pennsylvania

(USA), no abonar cuando, después de una alfalfa, el PSNT es igual o superior a 25 mg $\text{NO}_3^- \text{N ha}^{-1}$. Andasky y Bundy (2002) explican que el PSNT se utiliza en Wisconsin desde 1994 para ajustar las necesidades de N en plantaciones de maíz después de alfalfa (segundo año) o en aquellas en las que se han aportado purines. En su estudio mostraron que, utilizando el PSNT, se suelen reducir las aportaciones en 90-100 kg N ha^{-1} y, de esta manera, pueden disminuir las pérdidas potenciales de nitratos al medio ambiente. A partir del momento en que los agricultores tienen en cuenta la aportación de N que hace una leguminosa en rotación, el PSNT puede considerarse como un método que confirma la cantidad de N disponible para el cultivo siguiente (Bundy y Andraski, 1993; Fox *et al.*, 1989).

La concentración de **N en la planta en V6**, justo antes del abonado de cobertera, respondió a la dosis de fertilizante para el conjunto monocultivo-rotación. Teniendo en cuenta los niveles iniciales de $\text{NO}_3^- \text{N}$ en el suelo, bajos y uniformes (apartado 3.1.1), esta respuesta se debería a la aportación de fertilizante en fondo. Las diferencias en función de la dosis observadas en las parcelas en rotación y que no se detectan en el monocultivo (NS) serían debidas al nivel inicial de $\text{NO}_3^- \text{N}$ en el suelo, superior en la rotación, y al aumento que éste haya podido experimentar en el periodo siembra-V6 debido a los residuos de alfalfa enterrados. Finalmente, la falta de diferencia en el contenido de N en V6 entre la rotación y el monocultivo podría ser debida al estadio inicial del cultivo, unas 6 semanas después de la siembra.

Si se aplican en este ensayo las indicaciones que Scharf (2001) sugirió para Missouri-USA (Figura III.1.b), en cobertera se hubiera tenido que aportar 50 kg N ha^{-1} en las parcelas sin fertilizar (0 kg N ha^{-1}), tanto en el monocultivo como en la rotación con alfalfa. En las parcelas a las que se había asignado la dosis 100 kg N ha^{-1} y donde se habían aportado 50 kg N ha^{-1} en fondo, 20-30 kg N ha^{-1} en cobertera hubieran sido suficientes en el monocultivo y en la rotación. En las dosis superiores (200 y 300 kg N ha^{-1}) no habría hecho falta fertilizar en cobertera. Teniendo en cuenta los rendimientos de grano obtenidos, estos ajustes podrían considerarse válidos para la rotación después de la alfalfa y parecen indicar que el análisis del N en la planta en V6 podría ser un método de diagnóstico utilizable por el agricultor. En el monocultivo, en cambio, donde se observó un aumento de rendimiento hasta dosis más elevadas, las indicaciones de Scharf (2001), válidas para Missouri y rendimientos de 10-11 Mg ha^{-1} , no se adaptarían a las condiciones de este ensayo. Sería necesario, en base a una serie de experimentos en monocultivo y en rotación con la alfalfa, ajustar la recta de regresión adaptándola a las condiciones de cultivo del Valle medio del Ebro.

El contenido en N de la hoja, evaluado indirectamente mediante las unidades **SPAD** en floración masculina, mostró una respuesta a la rotación y a la dosis de fertilizante. Además, se produjo una interacción Rotación * Dosis de N.

En el monocultivo, las unidades SPAD aumentaron con la dosis de abonado hasta un valor meseta de 51,2 obtenido con la dosis 200 kg N ha⁻¹ (Capítulo I, apartado 3.2.7). En la rotación, el valor meseta se situó en 53,3 unidades SPAD y correspondió a las parcelas abonadas con 100 kg N ha⁻¹. Si se tiene en cuenta que en el monocultivo las lecturas SPAD y el rendimiento siguieron aumentando a partir de este valor, aunque no significativamente, y que en la rotación, los rendimientos no mostraron respuesta significativa a la dosis de fertilizante, pero que se apreció un aumento entre las dosis 0 y 100 kg N ha⁻¹, ambas lecturas coincidirían con la cantidad de fertilizante necesaria para obtener el máximo rendimiento de grano. Las aportaciones superiores fueron excesivas y lecturas inferiores indicarían deficiencias (Varvel *et al.*, 1977a; Blackmer y Schepers, 1994). Como se ha concretado en el Capítulo I, los resultados obtenidos permiten sugerir unas unidades SPAD de entre 52 y 53 unidades como nivel crítico en el Canal d'Urgell, para el cv. Juanita en floración, unidades que serían válidas también en una rotación con la alfalfa.

La respuesta de las lecturas SPAD al tratamiento rotación-monocultivo mostraron para la rotación un resultado que igualó los valores arriba indicados. Este resultado podría sugerir que la fertilización fue innecesaria en toda la rotación, sin llegar a ser excesiva, mientras que en el monocultivo, sí cabía esperar algún tipo de respuesta al abonado.

La separación de medias en el monocultivo y en la rotación explicarían la interacción Rotación * Dosis de N. Si bien hubo respuesta a la rotación, ésta no fue la misma en los dos tratamientos ya que el valor meseta se alcanzó con dosis de N distintas.

Estos resultados sugerirían que las lecturas SPAD en floración pueden ser una ayuda al agricultor para planificar la fertilización de un maíz después de una alfalfa en condiciones de producción similares a las de este estudio. También pueden ayudar a determinar la necesidad de fertilizar en cobertera, siempre y cuando se esté dispuesto a correr el riesgo de esperar la floración masculina para aportar el nitrógeno necesario, y a pesar de la dificultad que implica abonar en esta fase del ciclo productivo. En un estudio efectuado por Scharf *et al.* (2002) se observó una disminución del rendimiento del 3% cuando la aplicación de fertilizante se había retrasado hasta V12-V16. Cuando se retrasó hasta la emergencia de las sedas, a pesar de no alcanzar rendimientos máximos, observó una respuesta muy alta a la aplicación de N. De todas maneras, en 2001, Scharf

recomendó las mediciones con SPAD en V6 como una de las mejores herramientas para la determinación de las necesidades de fertilización nitrogenada en el maíz después de un cultivo de alfalfa o de un abonado orgánico. A pesar de ser mediciones menos precisas que cuando el cultivo está más adelantado, permiten evaluar las necesidades en un momento en que la fertilización es todavía fácil. No lo recomienda, en cambio, si se ha aportado fertilizante en presembrado o si la fertilización es mineral. Este mismo autor sugirió incluso una gráfica (Figura III.1a) que permitiría cuantificar el abono necesario en función de la lectura SPAD en V6 para las condiciones de Missouri (USA).

Por otra parte, el contenido de **Nitratos en la base del tallo** en madurez fisiológica se vio afectado tanto por la rotación como por la dosis de N. Los contenidos fueron mínimos ($<0,2$) en el monocultivo hasta la dosis 200 kg N ha^{-1} y aumentaron ligeramente para la dosis 300 kg N ha^{-1} , mostrando que, según los criterios de Binford *et al.* (1992b), la dosis había sido insuficiente para la dosis 0, 100 y 200 kg N ha^{-1} y adecuada para la dosis 300 kg N ha^{-1} (Capítulo I, apartado 3.2.7). En rotación, en cambio, atendiendo a los valores que presentaron los contenidos de $\text{NO}_3\text{-N}$ en la base del tallo y según los intervalos propuestos ($0,7\text{-}2,0 \text{ g kg}^{-1}$) por Binford *et al.* (1992b) para el Corn Belt (USA), habría faltado N en las parcelas sin abonar y en las que recibieron 100 kg N ha^{-1} , la fertilización habría sido adecuada con la dosis 200 kg N ha^{-1} y excesiva con la dosis 300 kg N ha^{-1} . Estos datos no coinciden exactamente con los expuestos anteriormente ya que los rendimientos mostraron que en la rotación la dosis 100 kg N ha^{-1} fue suficiente y que dosis de 200 y 300 kg N ha^{-1} fueron excesivas. Para poder utilizar este parámetro como indicador para agricultores en condiciones similares, convendría ajustar los intervalos de Binford *et al.* (1992b) a las condiciones de las rotaciones en el Valle medio del Ebro.

Otros autores han mostrado la utilidad del método de diagnóstico. Bundy y Andraski (1993) observaron, en base al contenido de $\text{NO}_3\text{-N}$ en la base del tallo, que el N aportado por una alfalfa de 3 y 4 años puede llegar a ser excesivo para un maíz de primer año posterior. En las condiciones del estudio en Torregrosa, la alfalfa duró solo dos años y el enriquecimiento en N del suelo podría haberse visto reducido respecto al que es habitual después de alfalfas de 4 años.

Este método podría sugerir una reducción de la dosis de fertilizante en la rotación, disminuyendo así los riesgos medioambientales (Binford, 1990) y aumentando la rentabilidad del cultivo. No obstante, la utilidad del análisis de nitratos en la base del tallo es interesante principalmente para la planificación de la fertilización de los cultivos siguientes es decir los segundos cultivos tras la alfalfa (Bundy y Andraski, 1993).

La interacción Rotación * Dosis de N vendría explicada por la diferencia de concentración de nitratos en la base del tallo, según si se trata del monocultivo o de la rotación. Mostraría que el manejo de un maíz tras una alfalfa tendría que ser distinto del de un maíz en monocultivo y, concretamente la fertilización, debería plantearse bajo un punto de vista diferente.

La Figura III.13 muestra la relación entre las lecturas SPAD en floración, la concentración de nitratos en la base del tallo, el rendimiento de grano y el NO_3^- -N residual en el suelo según si se trata de un tercer año de monocultivo de maíz o una rotación con alfalfa. Se puede apreciar como aumenta el contenido de NO_3^- -N residual en el suelo cuando se detecta una acumulación de NO_3^- -N en la base del tallo, coincidiendo con lecturas SPAD y rendimientos meseta.

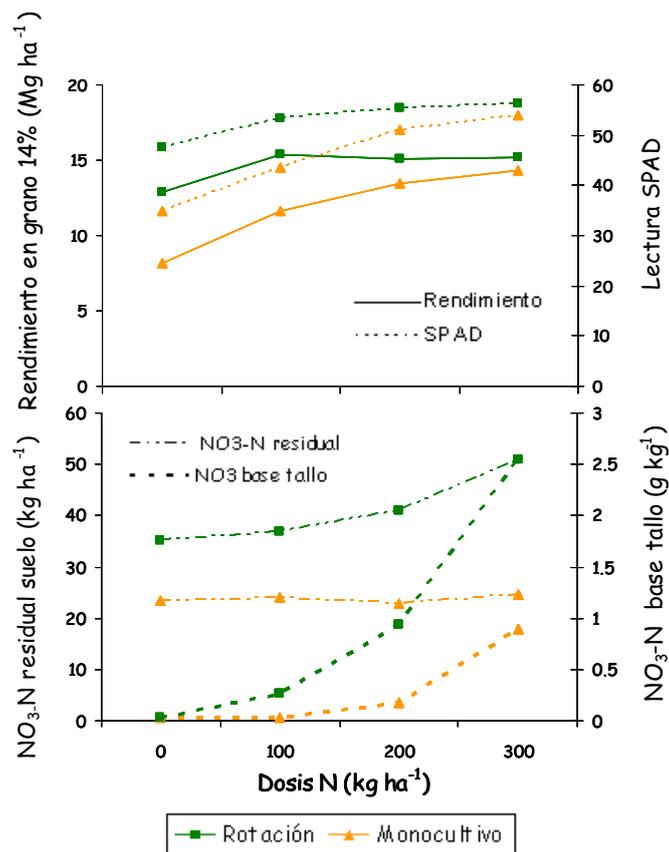


Figura III.13. Lecturas SPAD, rendimiento en grano, concentración de nitratos en la base del tallo y NO_3^- -N residual en el suelo (0-120 cm) en función de los dos tratamientos: Rotación-Monocultivo y dosis de abonado N. Torregrossa, 1996.

La Tabla III.11 resume las recomendaciones en fertilización que se habrían hecho en la rotación después de la alfalfa en base a los distintos métodos de diagnóstico utilizados.

Tabla III.11. Diagnóstico del estado nutricional de la plantación según los distintos métodos utilizados para la rotación Alfalfa-Maíz según la dosis de N aportada. En cursiva, coincidencia entre la recomendación y la fertilización real en el ensayo.

Dosis en maíz (kg N ha ⁻¹)	PSNT (22)	N V6	SPAD flor	NO ₃ ⁻ -N base tallo
0	Aportar 60 kg N ha ⁻¹ <i>Faltaron</i>	Aportar 50 kg N ha ⁻¹ <i>Faltaron</i>	Falta	Falta
100	Aportar 60 kg N ha ⁻¹ <i>Correcto</i>	Aportar 20-30 kg N ha ⁻¹ <i>+/- correcto</i>	Correcto	Falta
200	Aportar 40 kg N ha ⁻¹ <i>Sobraron 60 kg N ha⁻¹</i>	No aportar <i>Sobraron 100 kg N ha⁻¹</i>	Exceso	Correcto
300	Aportar 40 kg N ha ⁻¹ <i>Sobraron 90 kg N ha⁻¹</i>	No aportar <i>Sobraron 150 kg N ha⁻¹</i>	Exceso	Exceso

Se puede observar como, en base a los resultados obtenidos en este ensayo, las recomendaciones podrían considerarse semejantes según los distintos métodos de diagnóstico utilizados, aunque convendría validar algunos de los valores críticos a las condiciones de estudio. Descartando la medición de SPAD en floración y los NO₃⁻-N en la base del tallo que informan a posteriori, el PSNT y el contenido de N en V6 serían métodos que facilitarían resultados similares y podrían ser una ayuda al agricultor en el momento de decidir si es necesario fertilizar en cobertera después de la alfalfa y la cantidad a aportar. Aspectos técnicos de la analítica como dificultad del muestreo, tiempo de respuesta o precio podrían influir en la metodología de diagnóstico escogida. El tiempo que transcurre entre la toma de muestra para ambas metodologías (suelo o planta) y la recepción de los resultados analíticos es similar aunque puede, en determinadas circunstancias, ser uno-dos días más largo para el PSNT que para en N en planta (LAF, comunicación personal). El precio de ambos análisis y la dificultad de la toma de muestras también pueden considerarse similares.

3.3. Efecto de la rotación en el trigo

3.3.1. Rendimiento en grano y componentes del rendimiento

La Tabla III.12 presenta la respuesta en el trigo del rendimiento de grano y de los distintos componentes del rendimiento a la dosis de abonado nitrogenado en el propio

trigo, a la dosis de abonado nitrogenado aportada al cultivo de maíz precedente y a la rotación con la alfalfa anterior.

Tabla III.12. Rendimiento de grano de trigo y componentes del rendimiento en función de la dosis de N en el trigo (Nt), de la dosis de N en el maíz precedente (Nm) y del tratamiento monocultivo (BM)-Rotación (Rot). Torregrossa, 1997.

Tratamientos y estadística	Rendimiento de grano	Densidad	Espigas planta ⁻¹	Granos espig ⁻¹	Peso 1000 granos	Peso hectolítrico	Humedad grano	N grano
	Mg ha ⁻¹	pl. ha ⁻¹			g	kg Hl ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹
Dosis N en trigo (Nt) (kg N ha ⁻¹):								
0	4.9	491	1.25	18.8	40.6	74.6	143.3	16.8
100	6.7	529	1.27	28.4	38.5	75.2	142.5	17.4
Dosis N en maíz (Nm) (kg N ha ⁻¹):								
0	5.6	484	1.29	22.9	39.2	74.8	143.2	17.2
100	6.0	536	1.21	23.2	39.9	74.9	142.5	17.1
200	5.9	469	1.28	23.8	39.7	74.9	143.5	16.9
300	5.8	550	1.26	24.4	39.4	75.0	142.1	17.1
Rotación (R):								
BM	5.2	517	1.27	21.9	39.53	74.8	143.8	16.7
Rot	6.4	503	1.25	25.3	39.55	75.1	141.8	17.5
	ANOVA							
Signific.								
Rotación (R)	**	NS	NS	*	NS	NS	NS	**
Error a								
Nm	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R * Nm	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Error b								
Nt	**	NS	NS	**	**	**	NS	**
R * Nt	*	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Nm * Nt	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R * Nm * Nt	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Error c								

** , * Significativo para P< 0,01 y P<0,05 respectivamente. NS, no significativo

Como se ha expuesto en el capítulo II, el **rendimiento en grano de trigo** medio fue de 6,4 Mg ha⁻¹ después de la rotación Alfalfa-Maíz y de 5,2 Mg ha⁻¹ después del monocultivo de maíz (Tabla III.11). Conviene destacar que, en el trigo sin fertilización nitrogenada después de dos años de alfalfa y uno de maíz también sin fertilizar, se cosecharon 5,1 Mg ha⁻¹ de grano. Además, después de tres años de maíz sin ninguna aportación de abono N, el trigo sin fertilizar (un total de cuatro ciclos productivos sin aportar N), produjo 4,2 Mg ha⁻¹.

En el Capítulo II se ha anotado que se siguió observando un aumento de la producción en el segundo cultivo después de la alfalfa en la rotación Alfalfa-Maíz-Trigo respecto al Maíz-Maíz-Maíz-Trigo. El elevado nivel inicial de NO₃⁻-N en el suelo, su enriquecimiento durante el ciclo productivo debido a los residuos de alfalfa aún presentes y un posible

efecto rotación podrían explicar este incremento. Además se sugiere un valor de N-FRV de la alfalfa de 76 kg N ha⁻¹ en un trigo como segundo cultivo tras un maíz.

Se puede observar como el rendimiento del trigo respondió a la dosis de N aportada al propio cultivo y, en cambio, no se vio influenciado por el abono aportado al maíz anterior. Finalmente el aumento de rendimiento que se observó después de la rotación con la alfalfa respecto al monocultivo, mayor cuando no se fertilizó en trigo (5,6 y 4,1 Mg ha⁻¹ respectivamente) que cuando se aportaron 100 kg N ha⁻¹ (7,1 y 6,3 Mg ha⁻¹), explicaría la interacción Rotación * Dosis de N en trigo.

Los resultados muestran que la alfalfa aportó, además de gran parte del N necesario para el maíz que le siguió en una rotación Alfalfa-Maíz-Trigo, una parte menor pero sustancial del N que precisó el segundo cultivo para su crecimiento y desarrollo, coincidiendo con los resultados obtenidos por Vanotti y Bundy (1995), pero en una rotación alfalfa-maíz-maíz o soja-maíz-maíz en Wisconsin (USA). Cuando estos autores analizaron una rotación soja-maíz-avena, observaron que esta última produjo menos que tras un monocultivo de maíz y explicaron este comportamiento más por un *efecto rotación* negativo de la soja respecto a la avena que por un diferencia de N disponible en el suelo.

En el sur de Australia, Holford y Crocker (1997) mostraron que la alfalfa puede eliminar las necesidades de fertilizante N durante al menos 1-2 ciclos de trigo posteriores. Según Kumar y Goh (2002), el trigo y otros cereales cultivados después de una leguminosa mostraron rendimientos de grano mayores que aquellos cultivados después de una no-leguminosa. Estos mayores rendimientos se podrían asociar a una mayor mineralización del N procedente de la leguminosa en comparación con los residuos de las no-leguminosas que provocarían un aumento de la absorción de N por el trigo siguiente.

Berzsenyi y Györfy (1997) analizaron durante 30 años distintas rotaciones típicas de la agricultura húngara. Detectaron que en las rotaciones alfalfa-maíz-trigo el aumento de rendimiento que se observaba en el trigo había sido mayor que el que se había obtenido en rotaciones como alfalfa-trigo o maíz-trigo. Cosecharon del orden de 1,1 Mg ha⁻¹ más de grano en la rotación que en monocultivo de trigo, aumento similar al que se obtuvo en Torregrossa.

En una rotación alfalfa-maíz-maíz que estudiaron Aflakpui *et al.* (1993), el primer maíz tras la alfalfa tampoco respondió al nitrógeno aportado. En cambio el rendimiento del

maíz de segundo año aumentó con la dosis de fertilizante, mostrando, en este caso también, que el residuo de la alfalfa no era suficiente para este segundo cultivo.

En una rotación alfalfa-cucurbitácea-maíz-maíz de Colorado en la que habían aportado entre 0 y 280 kg N ha⁻¹ al primer cultivo de maíz (segundo cultivo tras la alfalfa), Halvorson et al. (2005) no detectaron respuesta a la dosis de N. Hay que tener en cuenta que las cucurbitáceas no son exigentes en N como el maíz ya que las dosis habituales de fertilización en regadío y al aire libre son de 80-120 kg N ha⁻¹. Este primer cultivo tras la alfalfa no habría consumido el NO₃⁻-N disponible en el suelo y quedaría una cantidad suficiente para que en el maíz siguiente no hiciera falta fertilizar. A partir del segundo cultivo de maíz, Halvorson et al. (2005) detectaron una reducción del NO₃⁻-N residual del suelo que provocó una respuesta significativa a la dosis de N aportada.

Finalmente, Lory *et al.* (1995b) detectaron que, en un segundo cultivo de maíz tras alfalfa, era necesario aportar la misma cantidad de N que en un monocultivo si se trataba de un suelo franco-limoso (grueso). En cambio, en un suelo franco-arcilloso, era necesario aportar menos N en la rotación que en el monocultivo, mostrando la influencia que la granulometría del suelo puede tener en el tiempo que puede durar el enriquecimiento en N del suelo y su disponibilidad.

De acuerdo con Peterson y Russelle (1991), los resultados obtenidos en Torregrosa sugerirían que, cuando el agricultor tiene en cuenta la aportación de N por la alfalfa, puede reducir la dosis de N también en el segundo cultivo después de la alfalfa.

El-Hout y Blackmer (1990) especificaron que la cantidad de N en el suelo depende, entre otros aspectos, de los años que ha durando el cultivo de alfalfa. Si la alfalfa de este ensayo hubiera durado los 4 años habituales en la zona, es posible que el efecto en el trigo como segundo cultivo hubiera sido más importante. Sería interesante estudiar en condiciones similares a las de este estudio, el efecto de una alfalfa comercial de 4 años.

Únicamente el número de **granos por espiga** se vio afectado por la alfalfa como cultivo precedente en la rotación (Tabla III.11). Atendiendo a las indicaciones de Abad (2004), esta respuesta explicaría el incremento del rendimiento en la rotación respecto al monocultivo e indicaría que el nivel de NO₃⁻-N inicial en el suelo no era excesivo ni en el monocultivo no en la rotación.

El efecto de la alfalfa en la rotación afectó el **contenido en N del grano** de trigo (Tabla III.11). El trigo tras una rotación Alfalfa-Maíz presentó una riqueza media de 17,5 g kg⁻¹

y, el que se cultivó tras un monocultivo de maíz, de 16,7 g kg⁻¹. La dosis de N aportada al maíz anterior no influyó en el contenido en N del grano. La dosis de N en trigo, en cambio, repercutió en un incremento en el contenido en N del grano. En la rotación Alfalfa-Maíz-Trigo, los contenidos fueron respectivamente de 17 y 18 g kg⁻¹ para las dosis 0 y 100 Mg ha⁻¹ y tras el monocultivo, de 16,5 y 16,8 g kg⁻¹. Estos resultados mostrarían la respuesta al NO₃⁻-N del suelo en el contenido en N del grano. Entre otros autores, Triboi *et al.* (2002) especifica que la aplicación de N puede mejorar la calidad del grano y que cuando estas aplicaciones se distribuyen a lo largo del cultivo la mejora es todavía más importante. Como se ha visto anteriormente, los distintos indicios muestran que los residuos de la alfalfa fueron enriqueciendo paulatinamente el N durante el ciclo de cultivo del maíz pero también del trigo, y habrían provocado la respuesta a la alfalfa en la rotación.

3.3.2. Producción de biomasa

La Tabla III.13 presenta la respuesta de la biomasa final y en encañado del trigo a la dosis de abonado nitrogenado en el propio trigo, a la dosis de abonado nitrogenado aportada al cultivo de maíz precedente y a la rotación con la alfalfa anterior.

Tabla III.13. Producción de biomasa final y en encañado en trigo en función de la dosis de N en el trigo, del tratamiento monocultivo (BM) o Rotación (Rot) y de la dosis de N en el maíz precedente. Torregrossa, 1997.

Tratamientos y estadística	Biomasa final	Biomasa en encañado
Dosis N en trigo (Nt) (kg N ha ⁻¹):	<u>Mg ha⁻¹</u>	
0	9.1	1.7
100	12.3	1.9
Dosis N en maíz (Nm) (kg N ha ⁻¹):		
0	9.3	1.6
100	11.1	1.7
200	11.1	2.0
300	11.3	2.0
Rotación (R):		
BM	10.0	1.4
Rot	11.5	2.2
	ANOVA	
Signific.		
Rotación (R)	NS	**
Error a		
Nm	NS	NS
R * Nm	NS	NS
Error b		
Nt	**	**
R * Nt	**	NS
Nm * Nt	NS	NS
R * Nm * Nt	NS	NS
Error c		

** , * Significativo para P< 0,01 y P<0,05 respectivamente.

NS, no significativo

El efecto de la alfalfa en la rotación afectó la producción de biomasa únicamente hasta el estadio de encañado. Este resultado podría mostrar una repercusión de la evolución del contenido de NO_3^- -N en el suelo que varió en función de la rotación en el momento de la siembra del trigo pero que fue homogéneo en el momento de la cosecha (apartado 3.1.1).

La biomasa total acumulada se vio afectada por la aportación de N en el trigo y por la interacción Rotación * N en trigo. A pesar de no mostrar una respuesta estadísticamente significativa a la presencia de la alfalfa en la rotación, después del monocultivo se produjeron $10,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomasa de trigo mientras que tras la rotación Alfalfa-Maíz, $11,5 \text{ Mg ha}^{-1}$. En la rotación, se habían acumulado $12,1$ y $10,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomasa según si se había aportado N en cobertera o no. Tras el monocultivo de maíz, la acumulación fue de $12,5$ y $7,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ respectivamente. La diferencia de respuesta al abonado N en cobertera en trigo según si se cultiva tras un monocultivo de maíz o tras una rotación Alfalfa-Maíz explicaría la interacción Rotación * Dosis de N en trigo. Además, estos resultados mostrarían la respuesta del desarrollo y crecimiento de la planta al NO_3^- -N (orgánico o mineral) del suelo durante todo el ciclo de cultivo.

4. CONCLUSIONES

Respecto al efecto de la alfalfa en el cultivo de maíz en la rotación Alfalfa-Maíz:

En la planta

- El rendimiento en grano medio de maíz fue de 14,7 Mg ha⁻¹ en la rotación y de 11,9 Mg ha⁻¹ en el monocultivo. En la rotación no se observó la respuesta al abonado nitrogenado que se detectó en el monocultivo.
- A pesar de que en la rotación la respuesta del maíz a la dosis de fertilizante no fue estadísticamente significativa, entre las dosis 0 kg N ha⁻¹ y 100 kg N ha⁻¹ el rendimiento aumentó en 1,5 Mg ha⁻¹, cantidad sustancial para un agricultor.
- El rendimiento del cultivo de maíz se ajustó al modelo cuadrático-meseta para los dos sistemas de producción. Ambos ajustes aumentaron con la dosis de abonado hasta un valor umbral determinado a partir del cual no se observó un incremento del rendimiento. Esta dosis umbral corresponde a 302 kg N ha⁻¹ en el monocultivo y a 87 kg N ha⁻¹ en la rotación.
- La biomasa final del maíz se vio condicionada por un cultivo precedente como la alfalfa y por la dosis de N. Las plantas de maíz en rotación con la alfalfa fueron más altas que las plantas en monocultivo.
- Las extracciones de N se vieron condicionadas por la alfalfa como cultivo precedente. La reducción del N acumulado en la parte aérea de la planta en las parcelas sin fertilizar respecto a las dosis máxima (300 kg N ha⁻¹) fue mayor en el monocultivo que en la rotación.

En el suelo

- El enriquecimiento en NO₃-N del suelo debido a la alfalfa siguió patente después del cultivo del maíz en la rotación Alfalfa-Maíz. Este se concentró principalmente en los 30 primeros cm del suelo.
- En las condiciones del estudio, se evaluó una mineralización neta durante el cultivo de 119 kg N ha⁻¹ en el monocultivo y de 208 kg N ha⁻¹ después de la alfalfa.

Viabilidad de los métodos de diagnóstico

- El Valor crítico de PSNT de 21-22 kg N ha⁻¹ se ajustó a las aportaciones adecuadas para un máximo rendimiento en las rotaciones Alfalfa-Maíz en los regadíos del Canal d'Urgell.

- La determinación del contenido de N en la planta en V6 podría ser un método de diagnóstico de las necesidades de N en una rotación. Son necesarios más estudios para validar los resultados en las condiciones del Valle medio del Ebro.
- Las lecturas SPAD indicaron un nivel crítico de 53 unidades en floración para el maíz en rotación en las condiciones del ensayo que coincidió con la zona meseta de los rendimientos. Una lectura en V6 podría ser más interesante después de la alfalfa ya que permitiría determinar las necesidades de fertilización N en cobertera.
- El contenido de nitratos en la base del tallo en madurez fisiológica del maíz en una rotación con la alfalfa podría servir de indicativo de las necesidades de fertilización en el segundo cultivo tras la alfalfa, ya que la fertilización se puede reducir sustancialmente. Son necesarios más estudios para ajustar los valores críticos a las condiciones de estudio.

Riesgo de lixiviación

- El agua del riego aportó el equivalente a unos 50 kg N ha⁻¹ durante el cultivo de maíz, cantidad que convendría contabilizar.
- El contenido de NO₃⁻ en la solución del suelo a 120 cm de profundidad medido durante el cultivo de maíz mostró un mayor riesgo de lixiviación de nitratos en las parcelas en rotación (Alfalfa-Maíz) que en el monocultivo. Los contenidos registrados en las parcelas en rotación, pero sin fertilizar, se situaron entre los valores correspondientes a las dosis 100 y 200 kg N ha⁻¹ en el monocultivo.

Respecto al efecto de la alfalfa en el cultivo de trigo en la rotación Alfalfa-Maíz-Trigo:

- La alfalfa aportó parte del N necesario para el segundo cultivo en la rotación estudiada. El rendimiento medio en grano de trigo fue de 5,2 Mg ha⁻¹ en la sucesión Maíz-Maíz-Maíz-Trigo y de 6,4 Mg ha⁻¹ en la rotación Alfalfa-Maíz-Trigo.
- Después de dos años de alfalfa y un cultivo de maíz sin fertilizar, el trigo sin aportación de N produjo 5,1 Mg ha⁻¹.
- El rendimiento en grano respondió a la alfalfa en la rotación pero no respondió a la dosis de N aportada al maíz posterior a la alfalfa y anterior al trigo.
- La presencia de la alfalfa al inicio de la rotación repercutió en un aumento de la riqueza en N del grano.
- Al final de la rotación Alfalfa-Maíz-Trigo se siguió apreciando el efecto de la alfalfa, combinado con la aportación de fertilizante nitrogenado en el trigo, en el contenido de NO₃⁻-N en el suelo.
- Al final de la rotación Alfalfa-Maíz-Trigo el contenido de NO₃⁻-N en el suelo en las parcelas sin fertilizar fue superior al de la dosis 100 kg N ha⁻¹ en el monocultivo de maíz.

CONCLUSIONES GENERALES

En los monocultivos de maíz en los regadíos del Canal d'Urgell y del Valle medio del Ebro:

- Se obtuvieron rendimientos máximos de 10,4 y 13,1 Mg ha⁻¹ en 1994 y 1995 con dosis de 100 kg ha⁻¹ y de 13,5 Mg ha⁻¹ en 1996 con 200 kg ha⁻¹. Estas dosis permitirían reducir cuantitativamente las aportaciones de N y los problemas medioambientales correspondientes en el Canal d'Urgell, donde las dosis son a menudo superiores.
- Un ajuste de la dosis de fertilizante nitrogenado en función del nitrógeno nítrico en el suelo al inicio de la campaña permitiría reducir las pérdidas de N por lixiviación.
- Conviene tener en cuenta las aportaciones de NO₃⁻ del agua de riego cuando presentan un contenido considerable y la mineralización de los restos de cultivos anteriores cuando se incorporan al suelo.
- El PSNT puede ser útil como método de diagnóstico de las necesidades de fertilización en cobertera, pero conviene tener en cuenta las condiciones de producción. Las lecturas SPAD indicaron un nivel crítico de 52-53 en floración para el maíz en las condiciones del estudio.

En las rotaciones Alfalfa-Maíz-Trigo en los regadíos del Canal d'Urgell y del Valle medio del Ebro:

- El N-FRV de la alfalfa en las condiciones del estudio fueron de 160 kg N ha⁻¹ para un primer cultivo de maíz.
- El N-FRV de la alfalfa para el segundo cultivo de trigo se estimó en 76 kg N ha⁻¹.
- El rendimiento en grano medio de maíz y de trigo fue mayor después de dos años de alfalfa que en el monocultivo para todas las dosis de N ensayadas.
- El enriquecimiento en NO₃⁻-N del suelo debido a la alfalfa siguió patente después del cultivo del maíz. Al final de la rotación Alfalfa-Maíz-Trigo se siguió apreciando el efecto de la alfalfa en el contenido de NO₃⁻-N en el suelo.
- El Valor crítico de PSNT de 21-22 kg N ha⁻¹ fue adecuado para un maíz después de una alfalfa. El contenido de N en la planta en V6 podría ser un método de diagnóstico de las necesidades de N en una rotación. Las lecturas SPAD indicaron un nivel crítico de 53 unidades en floración. Una lectura en V6 podría ser más interesante.
- El contenido de nitratos en la base del tallo en madurez fisiológica del maíz en rotación podría ser un indicativo de las necesidades de fertilización en el segundo cultivo en rotación tras la alfalfa.
- Los riegos de pérdidas de N por lixiviación durante el cultivo de maíz fueron mayores después de la alfalfa que en el monocultivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, A. 2004.** *Efecto del abonado nitrogenado en la calidad y rendimiento del trigo harinero (Triticum aestivum L.) y del trigo duro (Triticum turgidum L. var. durum) y en el contenido de nitratos en el suelo en los regadíos del Urgell (Lleida)*. Tesis doctoral. Universitat de Lleida.
- Abrecht, D.G. y P.S. Carberry. 1993.** *The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield*. Field Crops Research. 31:55-69.
- Addiscott, T.M., A.P. Whitmore y D.S. Powelson. 1991.** *Farming, fertilizers and the Nitrate problem*. Ed. CAB International. Wallingford. UK.
- Aflakpui, G.K.S., T.J. Vyn, M.R. Hall, G.W. Anderson y C.J. Swanton. 1993.** *Effects of tillage on nitrogen response in corn (Zea mays L.) after established alfalfa (Medicago sativa L.)*. Canadian Journal of Plant Science. 73:73-81.
- Aflakpui, G.K.S., T.J. Vyn, G.W. Anderson, D.R. Clements, M.R. Hall y C.J. Swanton. 1994.** *Crop management systems for corn (Zea mays L.) following established alfalfa (Medicago sativa L.)*. Canadian Journal of Plant Science. 74:25-259.
- Agustí, M. 1988.** *Llibre primer dels secrets d'Agricultura, casa rústica i pastoril*. En: *Llibre dels secrets d'Agricultura, casa rústica i pastoril*. (ed. 1988) Ed. Altafulla. Barcelona.
- AIFE. 2007.** *Evolución de la producción de forrajes transformados*. [en línea]. Asociación Interprofesional de Forrajes Españoles. [Consultado en marzo 2007]. Disponible en internet: <http://www.aife.es/>
- Aldrich, S.R. 1964.** *Are crop rotations out of date?* En: W. Hexickendorn y J. Sutherland (eds.) *Proceedings 19th Annual Hybrid Corn Industry Research Conference*. p. 7-13. American Seed Trade Association. Washington. D.C. USA.
- Alvaro, J. y J. Lloveras. 2003.** *Metodología de la producción de alfalfa en España*. AIFE. Ed. MAPA. Lleida.
- Andrade, F., A. Cirilo, S. Uhart y M. Otegui. 1996.** *Ecofisiología del cultivo del maíz*. Ed. La Barrosa. Buenos Aires. Argentina.
- Andraski, T.W., L.G. Bundy y K.R. Brye. 2000.** *Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching*. Journal of Environmental Quality. 29:1095-1103.
- Andraski, T.W. y L.G. Bundy. 2002.** *Using the presidedress soil nitrate test and organic nitrogen crediting to improve corn nitrogen recommendations*. Agronomy Journal. 94:1411-1418.
- Angle, J.S., C.M. Gross y M.S. McIntosh. 1989.** *Nitrate concentrations in percolate and ground-water under conventional and no-till Zea mays L.* Agriculture, Ecosystem and Environment. 25:279-286.
- Arnon, I. 1992.** *Crop sequences and associations*. En: *Agriculture in drylands: principles and practices*. p. 747-785. Elsevier Sciences. Amsterdam. The Netherland.
- Argemí, L. 1988.** *Presentació*. En: *Llibre dels secrets d'Agricultura, casa rústica i pastoril*. Ed. Altafulla. Barcelona.
- Arregui, L.M. 2006.** *Estrategias para mejorar la eficiencia del nitrógeno en sistemas cerealistas de secano en clima Mediterráneo húmedo*. Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- Arregui, L.M., I. Maeztu y M. Quemada. 2006.** *Balances de nitrógeno en cultivo de cereal de invierno en clima mediterráneo húmedo*. En: M. Quemada (ed). *Balances de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz en varias regiones españolas*. p. 13-26. Monografías INIA: Serie Agrícola nº 22. INIA. Madrid.
- Badaruddin, M. y D.W. Meyer. 1994.** *Grain legume effects on soil nitrogen, grain yield and nitrogen nutrition of wheat*. Crop Science. 34:1304-1309.
- Badía, J. 1995.** *Efecte de l'adobat nitrogenat en el desenvolupament i producció de panís en els regadius de l'Urgell*. Treball de Fi de Carrera. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària. Universitat de Lleida.
- Baldock, J.O y R.B. Musgrave. 1980.** *Manure and mineral fertilizer effects in continuous and rotational crop sequences in Central New York*. Agronomy Journal. 72:511-518.
- Baldock, J.O., R.L. Higgs, W.H. Pailson, J.A. Jackobs y W.D. Shader. 1981** *Legume and mineral N effects on crop yields in several crop sequences in the Upper Mississippi Valley*. Agronomy Journal. 73:885-890.

Bibliografía

- Barbieri, P.A., H.R. Sainz-Rozas, F.H. Andrade y H.E. Echeverría. 2000.** *Row spacing effects at different levels of nitrogen availability in maize.* Agronomy Journal. 92:283-388.
- Beaudoin, N., D. Denis, J.C. Muller y M.D. Monbrun. 1992.** *Influence d'une culture de luzerne sur le lessivage du nitrate dans les sols de Champagne crayeuse.* Fourrages. 129:45-57.
- Beaudouin, N., J.K. Saad, C. Laethem, J.M. Machet, J. Maucorps y B. Mary. 2005.** *Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: effect of farming practices, soils and crop rotations.* Agriculture, Ecosystems and Environment. 111:292-310.
- Benson, G.O. 1985.** *Why the reduced yields when corn follows corn and possible management responses.* En : D. Wilkinson (ed). *Proceedings Corn and Sorghum Research Conference.* p. 161-174. American Seed Trade Association. Washington D.C. USA
- Berenguer, P., F. Santiveri, C. Cantero, J. Boixadera y J. Lloveras. 2006.** *Efecto de la fertilización nitrogenada mineral y orgánica en el rendimiento de maíz. Balance de nitrógeno en los sistemas en regadío de la provincia de Lleida (Catalunya).* En: M. Quemada (ed). *Balance de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz en varias regiones españolas.* p. 73-106. Monografías INIA: Serie Agrícola nº 22. INIA. Madrid.
- Berenguer, P., F. Santiveri, C. Cantero, A. Ballesta y J. Lloveras. En revisión.** *Maize growth and soil nitrate in Mediterranean irrigated conditions as affected by tillage systems and N fertilization.* En revisión.
- Berzsenyi, Z y B. Gyorffy. 1997.** *Effect of crop rotation and fertilization on wheat yields and yields stability in long-term experiments.* NoveNytermeles. 46:145-161.
- Binder, D.L., D.H. Sander y D.T. Walters. 2000.** *Maize response to time of nitrogen application as affected by level of nitrogen deficiency.* Agronomy Journal. 92:1228-1236.
- Binford, G.D., A.M. Blackmer y N.M. El-Hout. 1990.** *Tissue test for excess nitrogen during corn production.* Agronomy Journal. 82:124-129.
- Binford, G.D., A.M. Blackmer y M.E. Cerrato. 1992a.** *Relationships between corn yields and soil nitrate in late spring.* Agronomy Journal. 84:53-59.
- Binford, G.D., A.M. Blackmer y B.G. Meese. 1992b.** *Optimal concentrations of nitrate in cornstalks at maturity.* Agronomy Journal. 84:881-887.
- Blackmer, A.M. 1987.** Efficient use of nitrogen in cropping systems. En: Hauck, R.D. (ed). *Nitrogen in crop production.* p. 273-294. ASA, CSSA y SSSA. Madison. WI. USA.
- Blackmer, A.M. 1989.** *Nitrogen needs for corn in a sustainable agriculture.* 44th Annual Corn & Sorghum Research Conference p.1-14.
- Blackmer, A.M. 1996.** Bioavailability of Nitrogen. Iowa State University Extension. Leopold Center. Ames. Iowa.
- Blackmer, A.M. 1997.** What about N credit following soybean? Iowa State University Extension. Leopold Center. Ames. Iowa. IC-478-R7.
- Blackmer, A.M., D. Pottker, M.E. Cerrato y J. Webb. 1989.** *Correlations Between Soil nitrate concentrations in late spring and corn yields in Iowa.* Journal of Production Agriculture. 2:103-109.
- Blackmer, A.M., T.F. Morris, B.G. Meese y A.P. Mallarino. 1993.** *Soil testing to optimize nitrogen management for corn.* Iowa State University Extension. Leopold Center. Ames. Iowa. Pm-1521.
- Blackmer, A.M. y J.S. Schepers. 1994.** *Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn.* Communications in Soil Science and Plant Analysis. 25:1791-1800.
- Blackmer, T.M y J.S. Schepers. 1995.** *Use of Chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn.* Journal Production of Agriculture. 8:56-60.
- Blackmer, A.M. y A.P. Mallarino. 1996.** *Corn testing to evaluate nitrogen management.* Iowa State University Extension. Leopold Center. Ames, IA. Pm-1584.
- Blackmer, T.M y J.S. Schepers. 1996.** *Aerial photography to detect nitrogen stress in corn.* Journal of Crop Physiology. 148:440-444.
- Blackmer, A.M., R.D. Voss y A.P. Mallarino. 1997.** *Nitrogen fertilizer recommendations for corn in Iowa. Integrated Crop Management.* Iowa State University.
- Boixadera, J. y C. Herrero. 1990.** *Mapa de sòls detallat (1:25 000) de Catalunya de l'àrea regable dels Canals d'Urgell. Full 389-1-1 (65-29).* [en línea]. Generalitat de Catalunya.

- DARP. [Consultado el 22-02-2007]. Disponible en:
Internet: <http://www2.iec.cat/mapasols/Mapa/Mapa.asp?Id=75>
- Boixadera, J. 2003.** 1-2 de octubre. *La problemática de la gestión del nitrógeno en Cataluña.* Reunión Proyecto Interreg-Redinter «Red interregional de investigación aplicada en grandes cultivos: cereales, proteaginosas y oleaginosas». Monells. Girona.
- Boixadera, J., J.M. Villar, J. Lloveras, M. Arán, P. Villar, F. Domingo, A.D. Bosch, N. Teixidor y J. Serra. 2005.** *Distribució de l'adobat nitrogenat en el cultiu del panís, nous avenços.* Dossier tècnic nº1. RuralCat. Generalitat de Catalunya, DARP.
- Bonhome, R., M. Derieux., J.B. Duburg y F. Ruget. 1984.** *Variations in ovule number at silking in various corn genotypes.* Maydica, 29:101-107
- Borras, L., G.A. Maddonni y M. Otegui. 2002.** *Leaf senescence in maize hybrids: plant population, row spacing and kernel set effects.* Field Crops Research. 82:13-26
- Boulaine, J. 1992.** *Histoire de l'agronomie en France.* Ed. Tec & Doc Lavoisier. Paris.
- Bremner, J.M. 1965.** *Inorganic forms of nitrogen.* En: Agronomy 9. Par.2 *Methods Soil Analysis.* Ed. C.A. Black. American Society of Agronomy. Madison. USA.
- Broadbent, F.E. y A.B. Carlton. 1978.** *Field trials with isotopically labeled nitrogen fertilizer.* En D.R. Nielsen and J.G. McDonald (eds.) *Nitrogen in the environment.* p.1-41. Academic Press, New York. USA.
- Bruulsema, T.W. y B.R. Christie. 1987.** *Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover.* Agronomy Journal. 79:96-100.
- Bullock, D.G. 1992.** *Crop rotation.* Critical Reviews in Plant Sciences. 11:309-326.
- Bullock, D.G. y D.S. Bullock. 1994.** *Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn - a comparison.* Agronomy Journal. 86:191-195
- Bundy, L.G. y E.S. Malone. 1988.** *Effect of residual profile nitrate on corn response to applied nitrogen.* Soil Science Society of America Journal. 52:1377-1383.
- Bundy, L.G. y T.W. Andraski. 1993.** *Soil and plant nitrogen availability tests for corn following alfalfa.* Journal of Production Agriculture. 6:200-206.
- Bundy, L.G. y T.W. Andraski. 1995.** *Soil yield potential effects on performance of soil nitrate tests.* Journal of Production Agriculture. 8:561-568.
- Burford J.R. y J.M. Bremner. 1975.** *Relationship between the denitrification capacities of soils and total water soluble and readily decomposable soil organic matter.* Soil Biol. Biochemistry. 7:389-394.
- Campbell, C.A. 1978.** *Soil organic carbon, nitrogen and fertility.* En: M. Schnitzer y S.U. Khan (eds.) *Soil organic matter.* p. 173-271. Developments in Soil Science nº8. Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam. The Netherland.
- Cartagena, M.C., A. Vallejo, J.A. Díez, A. Bustos, R. Caballero y R. Roman. 1995.** *Effect of the type of fertilizer and source of irrigation water on use in Maize crop.* Field Crops Research. 44:33-39.
- Causapé, J., D. Isidoro, D. Quílez y R. Aragüés. 2002.** *Water and nitrogen management in the irrigation district nºV of Bardenas (Zaragoza, Spain) and environmental impact on water resources.* p. 69-70. En: Villalobos F.J. and L. Tesi (ed.) *Proceedings VII Congress European Society for Agronomy.* Córdoba. July 2002. Spain.
- Causapé, J.; D. Quílez y R. Aragüés. 2004.** *Assesment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows.* Agricultural Water Management. 70:211-228.
- Cavero, J., A. Beltrán, y R. Aragüés, R. 2003.** *Nitrate exported in drainage waters of two sprinkler-irrigated watersheds.* Journal of Environmental Quality. 32:916-926.
- CEC. 1980.** *Relating to quality of water intended for human consumption.* Council directive of 15 July 1980 (80/778/EEC). Official Journal of the European Communities nº L229/11-29.
- Cerrato, M.E. y A.M. Blackmer. 1990.** *Comparision of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer.* Agronomy Journal. 82:138-143.
- Chaux, C. y C. Foury. 1994.** *Productions légumières. T. I. Généralités.* Ed. Tec & Doc Lavoisier. Paris. France.
- Chou, C.H. 2006.** Introduction to alleloathy. En : Reigosa, M.J., N. Pedrol y L. Gonzalez (eds.). *Allelopathy: a physiological process with ecological implications.* p. 1-9. Springer. Dordrecht. The Netherlands
- Colomb, B. 1982.** *L'analyse de la terre et son interprétation.* B.T.I. 370-372 (L1-Agro125) :495-502

Bibliografía

- Columnela, S.I d.C.** *Res rustica I-IV (La labranza)*. (Ed. 2004). Ed. Gredos. Madrid.
- Cook, R.J. 1993.** *Alternative disease management strategies*. En: *International Crop Science I*. p. 129-134. Crop Science Society of America. Madison. Wisconsin. USA.
- Cots, L. 2005.** *Usos de l'aigua i nous horitzons de gestió i aprofitament al marge esquerra del riu Segre*. En : Aldomà, I. (ed). *Un canal Segarra-Garigues per al segle XXI*. p. 87-118. Pagès Ed. Lleida.
- Cox, W.J., S. Kalonge, D.J.R. Cherney y W.S. Reid. 1993.** *Growth, yield, and quality of forage maize under different nitrogen management practices*. *Agronomy Journal*. 85:341-347.
- Cox, W. J. y D.J.R. Cherney. 2001.** *Row spacing, plant density and nitrogen effects on corn silage*. *Agronomy Journal*. 93:597-602.
- CASC. 2000.** *Alfalfa: the crop for the soil*. Certified Alfalfa Seed Council Inc. Davis, CA, USA.
- Dauden, A. y D. Quilez. 2004.** *Pig slurry versus mineral fertilization on corn yield and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated environment*. *European Journal of Agronomy* 21:7-19.
- De León, A. 1989.** *Caracterización agroclimática de la Provincia de Lérida*. Ed. MAPA. Madrid. España.
- Delin, S., B. Linden y K. Berglund. 2005.** *Yield and protein response to fertilizer nitrogen in different parts of a cereal field: potential of site-specific fertilization*. *European Journal of Agronomy*. 22:325-336
- Desvignes, P. 1992.** *Maize: nitrogenous fertilizer and a simplified balance sheet*. *Perspectives agricoles*. 170:66-70.
- Dion, R. 1981.** *Essai sur la formation du paysage rural français*. Ed. Flammarion. Paris.
- Duby, G. 1991.** *Economía rural y vida campesina en el occidente medieval*. 3ª ed. Ed. Península. Barcelona.
- Einhelling, F.A. 1996.** *Interactions involving allelopathy in cropping systems*. *Agronomy Journal*. 88:886-893.
- El-Hout, N.M. y A.M. Blackmer. 1990.** *Nitrogen status of corn after alfalfa in 29 Iowa yields*. *Journal of Soil and Water Conservation*. 45:115-117.
- Fageria, N.K., V.C. Balegar y C.A. Jones. 1997.** *Growth and mineral nutrition of field crops*. Marcel Dekker. Inc. New York. USA.
- Farmer, V. 1913.** *Roman Farm Management. The treatises of Cato and Varro*. The MacMillan Company. New York.
- Feigin, A., I. Ravina y J. Shalhevet. 1991.** *Irrigation with treated sewage effluent*. Springer-Verlag. Berlin. Germany.
- Ferrer, F., J.M. Villar, P. Villar, P. y M. Arán. 1997.** *Impacto del nitrógeno presente en el agua de riego en la zona regable del Canal d'Urgell*. p. 241-248. En: DARP, Generalitat de Catalunya (ed.) *Proceedings XV Congreso nacional de Riegos*. Lleida. junio 1997.
- Ferrer, F., J.M. Villar, C.O. Stockle, P. Villar y M. Arán. 2003.** *Use of a pre-sidedress test (PSNT) to determine nitrogen fertilizer requirements for irrigated corn*. *Agronomie*. 23:561-570
- Foth, H.D. y B. G. Ellis. 1988.** *Soil fertility*. John Wiley & Sons. New York. USA.
- Fox, R.H. y W.P. Piekielek. 1988.** *Fertilizer N equivalence of alfalfa, birdsfoot trefoil, and red clover for succeeding corn crops*. *Journal of Production Agriculture*. 1:313-317.
- Fox, R.H., G.W. Rhot, K.V. Iversen y W.P. Piekielek. 1989.** *Soil and tissue nitrate tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn*. *Agronomy Journal*. 81:971-974.
- Francis, C.A. 2005.** *Crop rotations*. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*. (4th vol, 1-4). [en línea]. [consultado en marzo 2007]. Ed. Elsevier Ltd. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780123485304>
- Francis, C.A. y M.D. Clegg. 1990.** *Crop rotations in sustainable production systems*. En: C.A. Edwards, R. Lal, P. Madden, R.H. Miller y G. House (eds). *Sustainable Agricultural Systems* p.107-122. Soil & Water Conservation Society. Ankeney. Iowa.USA.
- Francis, D.D. y J.S. Schepers. 1994.** *Nitrogen uptake efficiency in maize production using irrigation water high in nitrate*. *Fertilizer research*. 39:239-244.
- Franssen, H.J., I. Vijn, W.C. Wang y T. Bisseling. 1992.** *Developmental aspects of the Rhizobium-legume symbiosis*. *Plant Molecular Biology*. 19:89-107.

- Friedrich, J.W., L.E. Schrader y E.V. Nordheim. 1979.** *N deprivation in maize during grain-filling I. Accumulation of dry matter nitrate-N and sulphate-S.* Agronomy Journal. 71:461-465
- Gabinet tècnic. 2003.** *La proposta de revisió de la PAC a mig termini.* Catalunya rural i agrària. 98:20-24.
- Gardner, B.R., R.B. Pearce y R.L. Mitchel. 1985.** *Physiology of crop plants.* Iowa State University Press. USA.
- Gault, R.R., M.B. Peoples, G.L. Turner, D.M. Lilley, J. Brockwell y F.J. Bergense. 1995.** *Nitrogen fixation by irrigated lucerne during the first three years.* Australian Journal for Agriculture Research. 46:1401-1425.
- Gil, J.L. y W.H. Fisk. 2001.** *Soil nitrogen mineralization in mixtures of eastern gamagrass with alfalfa and red clove.* Agronomy Journal. 93:902-910.
- Giller, K.E. 2001.** *Nitrogen fixation in tropical cropping systems.* 2º ed. CABI publishing. Wallingford. UK.
- Gorchs, G. 2006.** *Efecte de les tècniques de conreu en la producció del cànem (Cannabis sativa L.) i efecte del cànem com a cultiu precedent del blat (Triticum aestivum L.).* Tesis doctoral. Universitat de Lleida.
- Grant, R.F., B.S. Jacksol, J.R. Kiniry y G.F. Arkin. 1989.** *Water deficit timing effects on yield components in maize.* Agronomy Journal. 81:61-65.
- Gras, P.W., R.S. Anderssen, M. Keentok, F. Békés y R. Appels. 2001.** *Gluten protein functionality in wheat flour processing: a review.* Australian Journal of Agricultural Research. 52:1311-1323.
- Guillard, K., G.F. Griffin, D.W. Allison, M.M. Rafey, W.R. Yamartino y S.W. Pietrzyk. 1995.** *Nitrogen utilization of selected cropping systems in the U.S. Northeast: I. Dry matter yield, N uptake, apparent N recovery, and N use efficiency.* Agronomy Journal. 87:193-199.
- Hagin, J. y B. Tucker. 1982.** *Fertilization of dryland and irrigated soil.* Advances Series in Agricultural Sciences 12. Springer-Verlag.
- Halvorson, A.D., F.C. Schweissing, M.E. Bartolo y C.A. Reule. 2005.** *Corn response to nitrogen fertilization in a soil with high residual nitrogen.* Agronomy Journal. 97:1222-1229.
- Hammel, J.E. 1995.** *Long-term tillage and crop rotation effect on winter wheat production in north Idaho.* Agronomy Journal. 87:16-22.
- Harris, G.H. y O.B. Hesterman. 1990.** *Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15.* Agronomy Journal. 8:129-134.
- Herrero, C., J. Boixadera, R. Danès y J.M. Villar. 1993.** *Mapa de sòls 1:25.000 de Catalunya. Full 360-1-2 (65-28).* Generalitat de Catalunya. DARP.
- Hesterman, O.B., M.P. Russelle, C.C. Sheaffer y G.H. Heichel. 1987.** *Nitrogen utilization from fertilizer and legume residues in legume-corn rotations.* Agronomy Journal. 79:726-731.
- Hesterman, O.B. 1988.** *Exploiting forage legumes for nitrogen contribution in cropping systems.* En: *Cropping strategies for efficient Use of water and nitrogen.* p.155-166. ASA-CSSA-SSSA Special publication 51. Madison Wisconsin, USA.
- Hoagland, R.E., S.J. Cutler. 2000.** *Plant microbial compounds as herbicides.* En: Narwal, S.S., Hoagland, R.E., Dilday, R.H., Reigosa, M.J. (eds.). *Allelopathy in Ecological Agriculture and Forestry. Proceedings of the III International Congress on Allelopathy in Ecological Agriculture and Forestry.* Dharwad. India. Agosto 1998. p. 73-99. Kluwer Academic Publications. London. UK
- Holford, I.C.R. y G.J. Crocker. 1997.** *A comparison of chick-pea and pastures legumes for sustaining yields and nitrogen status of subsequent wheat.* Australian Journal of Agricultural Research. 48:305-315.
- Huggins, D.R. y W.L. Pan. 1993.** *Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity.* Agronomy Journal. 85:898-905.
- IAS. 1996.** *International Allelopathy Society bylaws and constitution.* [en línea]. [Consultado en abril 2007]. Disponible en internet: <http://www-ias.uca.es/bylaws.htm#CONSTI>
- INM. 2004.** *Valores climatológicos normales: Estación de Lleida (Obs-2).* Instituto Nacional de Meteorología [en línea]. [Consultado el: 27-10-2004]. Disponible en internet:

- <http://www.inm.es/web/sup/tiempo/climat/valnor/9771C.html>
- ITAGI. 2001.** *Butlletí d'informació* núm.2. Institut tècnic d'assessorament i gestió integrat. Consell Comarcal del Pa d'Urgell. Mollerussa. Lleida.
- Jandel Scientific, 1994.** *Table Curve 2D Release notes*. Versió 2-03. Jandel Scientific. San Rafael. CA. USA.
- Jansson, S.L. y J. Persson, 1982.** *Mineralization and immobilization of soils nitrogen.*, En: Stevenson F.J. (ed.) *Nitrogen in agricultural soils*. p.229-252. American Society of Agronomy. Soils Science Society of America. Madison. WI. USA.
- Jarvis, S.C. 1996.** *Future trends in nitrogen research*. Plant and Soil. 181:47-56.
- Jarvis, S., D. Barraclough, R.J. Unwin y S.M. Royle. 1989.** *Nitrate leaching from grazed grassland and after straw incorporation in arable soils*. En: J.C. Germon (ed.) *Management System to Reduce impact of nitrates*. p.110-125. Elsevier. London.
- Jarvis, S.C., E.A. Stockdale, M.A. Shepers y D.S. Powlson. 1996.** *Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurements*. Advances in Agronomy. 57:188-235.
- Jokela, W.E. y G.W. Randall. 1989.** *Corn yield and residual soil nitrate as affected by time and rate of nitrogen application*. Agronomy Journal. 81:720-726.
- Johnson, C., G. Albecht, Q. Ketterings, J. Beckman i K. Stocklin. 2005.** *Nitrogen basics. The nitrogen cycle*. Agronomy [en línea]. [Consultado en abril 2007]. Fact Sheet series nº2. Cornell University Cooperative Extension. Disponible en internet : <http://www.dairyn.cornell.edu/pages/20cropsoil/23cycle.shtml>
- Juergens-Gschwind, S. 1989.** *Ground water nitrates in the older development countries (Europe). Relationships to land use patterns*. En: Follet, R.F. *Nitrogen management and ground water protection*. p.75-138. Elsevier. Amsterdam. Netherland.
- Justes, E., J.M. Meynard, B. Mary y D. Plénet. 1997.** *Management of N nutrition: diagnosis using stem base extract: JUBIL method*. En: Lemaire, G. *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. p163-187. Springer-Verlag. Berlin. Germany.
- Justes, E., P. Thiebaut, G. Cattin, D. Larbre y B. Nicolardot. 2001.** *Liberation d'azote après retournement de luzerne. Un effet sur deux campagnes*. Perspectives Agricoles 264:23-28.
- Karlen, D.L. y A.N. Sharpley. 1994.** *Management strategies for sustainable soil fertility*. En: J.L. Hatfield y D.L. Karlen (eds.) *Sustainable agriculture systems*. p. 47-108. Lewis Publishers. Florida. USA.
- Karlen, D.L., Varvel, G.E., Bullock, D.G., Cruse, R.M. 1994.** *Crop rotations for the 21st century*. Advances in Agronomy 53:1-45.
- Katsvairo, T.W. y W.J. Cox. 2000.** *Economics of cropping systems featuring different rotations, tillage and management*. Agronomy Journal. 92:485-493.
- Kelling, K.A., L.G. Bundy y R.P. Wolkowski. 1993.** *Why are legume nitrogen credits changing?* En. Proceedings 23th National Alfalfa Symposium. Appleton. Wisconsin. USA.
- Kitchen, N-R. y K.W.T. Goulding. 2001.** *On-farm technologies and practices to improve nitrogen use efficiency*. En: Follett, R.F. y Hatfield, J.L. (ed.) *Nitrogen in environment: sources, problems and management*. p. 335-369. Elsevier Science. Amsterdam. The Netherland.
- Kumar, K. y K.M. Goh. 2002.** *Management practices of antecedents leguminous and non-leguminous crop residues in relation to winter wheat yields, nitrogen uptake, soil nitrogen mineralization and simple nitrogen balance*. European Journal of Agronomy, 16:295-308.
- Kurtz, L.T., L.V. Boone, T.R. Peck y R.G. Hoeft. 1984.** *Crop rotations for efficient nitrogen use. Nitrogen in Crop Production*. En: R.D. Hauck (ed). *Nitrogen in crop production*. ASA-CSSA-SSSA. Madison Wis, p. 295-306.
- LAF. 1999a.** *Avaluació i aprofitament dels residus orgànics d'origen ramader en agricultura*. Quadern de divulgació nº5. Laboratori d'anàlisi i fertilitat de sòls-Diputació de Lleida. Lleida.
- LAF. 1999b.** *Gestió de la fertilitat dels sols en Panís*. Quadern de Divulgació num. 9. Laboratori d'anàlisi i fertilitat de sòls-Diputació de Lleida. Lleida.
- Lamb, J.F.S, D.K. Barnes, M.P. Russelle, C.P. Vance, G.H. Heichel, K.I. Henjum. 1995.** *Ineffectively and effectively nodulated alfalfas demonstrate biological nitrogen-fixation continues with high-nitrogen fertilization*. Crop Science. 35:153-157.

- Lauer, J. 2002.** *What do we know about crop rotations?*[en línea]. [consultado en marzo 2007]. Wisconsin Crop Manager. 9:84-85. Disponible en internet: <http://corn.agronomy.wisc.edu/WCM/2002/W110.htm>
- Liang, B.C. y A.F. McKenzie. 1994.** *Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization.* Canadian Journal of Soil Science. 74:235-240.
- Liebman, M. y R.R. Janke. 1994.** *Sustainable weed management practices.* En: J.L. Hatfield y D.L. Karlen (eds.) Sustainable agriculture systems. p. 111-143. Lewis Publishers.Florida. USA.
- Liu, X., X. Ju, F. Zhang, J. Pan y P. Christie. 2003.** *Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain.* Fields Crops Research. 83:111-124.
- Lloveras, J., A. López, J.A. Betbesé, M. Bagà y A. López. 1998.** *Evaluación de variedades de alfalfa en los regadíos del valle del Ebro. Análisis de las diferencias intervarietales.* Pastos. 28:37-56.
- Lloveras, J., A. López, X. Ferran, S. Espachs y J. Solsona. 2001a.** *Bread-making wheat and soil nitrate as affected by nitrogen fertilization in irrigated Mediterranean conditions.* Agronomy Journal. 93:1183-1190.
- Lloveras, J., J. Ferran, J. Boixadera y J. Bonet. 2001b.** *Potassium Fertilization Effects on Alfalfa in a Mediterranean Climate.* Agronomy Journal 93:139-143.
- Lopez-Bellido, L., M. Fuentes, J.E. Castillo y F.J. López-Garrido. 1998.** *Effects of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on wheat-grain quality grown under rainfed Mediterranean conditions.* Field Crops. Research. 57:265-276.
- Lory, J.A., M.P. Russelle y T.A. Peterson. 1995a.** *A comparison of two nitrogen credit methods: Traditional vs. Difference.* Agronomy Journal. 87:648-851.
- Lory, J.A., G.W. Randall y M.P. Russelle. 1995b .** *Crop sequence effects on response of corn and soil inorganic nitrogen to fertilizer and manure nitrogen.* Agronomy Journal. 87:876-883.
- Lory, J.A., M.P. Russelle y G.W. Randall. 1995c.** *A classification-system for factors affecting crop response to nitrogen-fertilization.* Agronomy Journal. 87:869-876.
- Luna, J.M. y G.J. House. 1990.** *Pest management in sustainable agricultural systems.* En: C. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. Miller, y G. House (eds.) *Sustainable agricultural systems.* p. 157-173. Soil and Water Conservation Society. Iowa, USA.
- Ma, B.L., L.M. Dwyer y E.G. Gregorich. 1999a.** *Soil nitrogen amendment effects on nitrogen uptake and grain yield of maize.* Agronomy Journal. 91:650-656.
- Ma, B.L., L.M. Dwyer y E.G. Gregorich. 1999b.** *Soil nitrogen amendment effects on seasonal nitrogen mineralization and nitrogen cycling in maize production.* Agronomy Journal. 91:1003-1009.
- Magdoff, F. 1991.** *Understanding the Magdoff Pre-Sidedress Nitrate Test for corn.* Journal of Production Agriculture. 4:297-305.
- Magdoff, F.R., D. Ross y J. Amadon. 1984.** *A soil test for nitrogen availability to corn.* Soil Science Society of America Journal. 48:1301-1304.
- Magdoff, F., W.E. Jokela, F.H. Fox y G.F. Griffin. 1990.** *A soil test for nitrogen availability in the Northeastern U.S.* Commun. in Soil Science and Plant Analysis. 21:1103-1115.
- Makowski, D., D. Wallach y J.M. Meynard. 1999.** *Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat.* Agronomy Journal. 91:377-385.
- MAPA. 1994-2004.** *Anuario de estadística agroalimentaria.* Ed. MAPA. Madrid.
- Meisinguer, J.J. y P.J. Randall. 1991.** *Estimating nitrogen budgets for soil-crop systems.* En: Follet, R.F. et al. *Managing nitrogen for groundwater quality and profitability.* p.85-124. Soil Science Society of America. Madison (Wi), USA.
- Meisinger, J.J., F.R. Magdoff y J.S. Schepers. 1992.** *Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions, Underlying principles.* En: Bock, B.R., Kelley, K.R. *Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions.* TVA National Fertilizer and Environmental Research Center. Muscle Shoals. USA.
- Miller, D.A. 1996.** *Allelopathy in forage crop systems.* Agronomy Journal. 88:854-859.
- Miller, R.L. y R.L. Donahue. 1990.** *Soils. An introduction to soils and plant growth.* 6th ed. Prentice-Hall international Ed. USA.
- Moll, R.H., E.J. Kamprath y W.A. Jackson. 1982.** *Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen-utilization.* Agronomy Journal. 74:562-564.

Bibliografía

- Montori, M. 1995.** *Efecto del abonado nitrogenado en el contenido de N en el maíz y en su disponibilidad en el suelo en los regadíos de l'Urgell*. Trabajo de Fin de Carrera. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària. Universitat de Lleida.
- Morot-Gaudry, J.F. 1997.** *Assimilation de l'azote chez les plantes. Aspects physiologiques, biochimique et moléculaire*. INRA Ed. Paris. France.
- Morris, T.F., A.M. Blackmer y N.M. El-Hout. 1993.** *Optimal rates of nitrogen fertilization for first-year corn after alfalfa*. Journal of Production Agriculture. 6:244-350.
- Moser, S.B., B. Feil, S. Jampatong y P. Stamp. 2006.** *Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize*. Agricultural Water Management. 81:41-58.
- Muchow, R.C. y R. Davies. 1988.** *Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. I. Radiation interception and biomass accumulation*. Field Crops Research. 18:17-30.
- Munson, R.D. 1978.** *The influence of alfalfa on subsequent crops*. En: *Eighth Annual Alfalfa Symposium*. p.30-33. Bloomington. Minnesota. USA.
- Novoa, R. y R.S. Loomis. 1981.** *Nitrogen and plant production*. Plant and Soil, 58:177-204.
- Olson, R.A. y L.T. Kurtz. 1982.** *Crop nitrogen requirements, utilization and fertilization*. En: *Nitrogen in agricultural soils*. p.567-589. Agronomy Monograph nº22. Madison. USA.
- Onken, A.B., R.L. Mathson y D.M. Nesmid. 1985.** *Fertilizer nitrogen and residual nitrate-nitrogen effects on corn irrigated corn yield*. Soil Science Society of America Journal. 49:134-139.
- Otegui, M.E., F.H. Andrade y E.E. Suero. 1995.** *Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking*. Field Crops Research. 40:87-94.
- Paré, T., F.P. Chalifour, J. Bourassa y H. Antoun. 1992.** *Forage corn dry-matter yields and N-uptake as affected by previous legumes and N-fertilizer*. Canadian Journal of Plant Science. 72:699-712.
- Parry, G. 2001.** *Systematic crop rotation transforms agriculture*. [en línea]. [consultado en abril 2007]. En: J. Lauer y N. Schlager (eds.) *Science and its times: Understanding the Social Significance of Scientific Discovery*. Vol. 3: Gale Virtual Reference Library. Thomson Gale. Disponible en internet: <http://find.galegroup.com/gvrl/infomark.do?&contentSet=EBKS&type=retrieve&tabID=T001&prodId=GVRL&docId=CX3408501498&source=gale&userGroupName=lleida&version=1.0>.
- Pedigo, L.P. 1991.** *Entomology and pest management*. Macmillan Publishing Co., New York, New York, USA.
- Peterson, T.A. y M.P. Russelle. 1991.** *Alfalfa and the nitrogen cycle in the Corn Belt*. Journal of Soil and Water Conservation. 46:229-235.
- Piekielek, W.P. y R.H. Fox. 1992.** *Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize*. Agronomy Journal. 84:59-65.
- Piekielek, W.P., R.H. Fox, J.D. Toth y K.E. McNeal. 1995.** *Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency*. Agronomy Journal. 87:403-408.
- Pierce, F.J. y C.W. Rice. 1988.** *Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use*. En: W.L. Hargrove (ed.) *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. p. 21-42. ASA Special Publication Nº 51. ASA. CSSA SSSA. Madison Wisconsin. USA.
- Pioneer Hi-Bred S.L. 2006**-Octubre. Consulta realizada a G. Bullich del servicio técnico en Cataluña-España
- Plénet, D., E. Lubet, P. Desvignes y F. Sombrun. 1991.** *Fertilisation azotée et composants du rendement du maïs: effets des niveaux et de la modalité d'apport*. En: Picard D. (coord.). *Physiologie et production de maïs*. p. 367-382. INRA.AGPM. Paris. France.
- Plénet D. y P. Desvignes. 2000.** *Maïs: dynamique de prélèvement de l'azote et de croissance de la plante*. Perspectives agricoles. 261:69-74.
- Pons, J.M. 1997.** *Efecto del abonado nitrogenado en la producción de maíz y en el contenido de nitrógeno en el suelo en los regadíos del Urgell*. Proyecto Final de Carrera. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària. Universitat de Lleida.
- Power, J.F. 1994.** *Understanding the nutrient cycling process*. Journal of Soil and Water Conservation. 49:16-23
- Power, J.F. y R.F. Follett. 1987.** *Monoculture*. Scientific American. 256:79-86

- Power, J.F. 1990.** *Legumes and crop rotations*. En: C.A. Francis, C. Butler and L.D. King. (eds). *Sustainable agriculture in temperate zones*. p.178-204. John Wiley & Sons. New York. USA.
- Powlson, D.S. y T.M. Addiscott. 2005.** *Nitrogen in soils. Nitrates*. En : *Encyclopedia of Soils in the Environment*. (4th vol, 1-4). [en línea]. [consultado en marzo 2007]. Ed. Elsevier Ltd. Disponible en internet:
<http://www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780123485304>
- Quemada, M. 2006.** *Introducción*. En: M. Quemada (ed). *Balance de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz en varias regiones españolas*. p. 6-12. Monografías INIA: Serie Agrícola nº 22. INIA. Madrid.
- Quéméner, J. 1985.** *L'interprétation des analyses*. Cultivar (dossier analyses). 184:107-117.
- Raiesi, F. 2006.** *Carbon and N mineralization as affected by soil cultivation and crop residue in a calcareous wetland ecosystem in Central Iran*. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 112: 13-20.
- Rasse D.P. y Smucker A.J.M. 1999.** *Tillage effects on soil nitrogen and plant biomass in a corn-alfalfa rotation*. *Journal of Environmental Quality*. 28:873-880.
- Rasse, D.P., A.J.M. Smucker y O. Schabenberger. 1999.** *Modifications of soils nitrogen pools in response to alfalfa root systems and shoot mulch*. *Agronomy Journal*. 91:472-477.
- Rauschkolb, R. y A.G. Hornsby. 1994.** *Nitrogen management in irrigated agriculture*. Oxford University press. NY. USA
- Reigner, E.E. y R.R. Janke. 1990.** *Evolving Strategies for managing weeds*. En: C. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. Miller, y G. House (eds.) *Sustainable agricultural systems*. p. 174-202. Soil and Water Conservation Society.Iowa.USA.
- Reigosa, M.J., N. Pedrol y L. Gonzalez. 2006.** *Allelopathy: a physiological process with ecological implications*. Springer. Dordrecht. The Netherlands.
- Rémy, J.C. y A. Marinlaf. 1974.** *L'analyse de la terre: réalisation d'un programme d'interprétation automatique*. *Annales Agronomie*. 25:607-632.
- Richie, S.W., J.J. Hanway y G.O. Benson. 1997.** *How a corn plant develops*. Special Report nº48. Iowa State University.Extension Service. Ames USA.
- Rice, E. L. 1984.** *Allelopathy*. 2nd Ed. Academic Press. NY. USA.
- Robinson, C.A., R.M. Cruse y K.A. Kohler. 1994.** *Soil management*. En: J.L. Hatfield y D.L. Karlen (eds.) *Sustainable agriculture systems*. p. 109-134. Lewis Publishers. Florida, USA
- Sander, D.H., D.T. Walters y K.D. Frank. 1999.** *Nitrogen testing for optimum management*. *Journal of Soil and Water Conservation*. 49:46-52.
- Saña, J., J.C. Moré y A. Cohí. 1996.** *La gestión de la fertilidad de los suelos*. Ed. MAPA. Madrid.
- SAS Institute. 1989.** *SAS user's guide: Statistics*. Version 6.03.SAS Inst., Cary, NC.
- Scharf, P. C. 2001.** *Soil and plant tests to predict optimum nitrogen rates for corn*. *Journal of Plant Nutrition*. 24:805-826
- Scharf, P.C., W.J. Wiebold y J.A. Lory. 2002.** *Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level*. *Agronomy Journal*. 94:435-441.
- Scharf, P.C., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, J.G. Davis, V.C. Hubbard y J.A. Lory. 2005.** *Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn*. *Agronomy Journal*. 97:452-461.
- Schepers J.S. y A.R. Moasier. 1991.** *Accounting for nitrogen Nonequilibrium Soil-Crop System*. En: Follett y col (ed.) *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*. Soil Science Society of America.USA.
- Schepers, J.S., D.D. Francis, M. Vigil, y F.E. Below. 1992.** *Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 23:2173-2187.
- Schmidt, E.L. 1982.** *Nitrification in soils*. En: Stevenson F.J. (ed.) *Nitrogen in agricultural soils*. p.253-288. American Society of Agronomy. Soils Science Society of America. Madison. WI. USA.
- Schmidt, J.P., A.J. Dejoia, R.B. Ferguson, R.K. Taylor, R.K. Young y J.L. Havlin. 2002.** *Corn yield response to nitrogen at multiple in-field locations*. *Agronomy Journal*. 94:798-806

- Schröder, J.J. y J. Withagen. 1994.** *Nitrogen response models for silage maize and their effects on economical and environmental optimum inputs.* E.G.F. 15th General Meeting. Wageningen. The Netherland.
- Schröder J.J., L. Ten Holte y G. Brouwer. 1997.** *Response of silage Maize to placement of cattle slurry.* Netherland Journal of Agricultural Science. 45:249-261.
- Schröder, J.J., J.J. Neeteson, O. Oenema y P.C. Stuik. 2000.** *Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize productions? Reviewing the state of the art.* Field Crops Research. 66:151-164.
- Serra, J. 2007.** *Noves varietats de panís a Catalunya.* Dossier Tècnic num. 19. Ruralcat. Generalitat de Catalunya. DARP.
- Sexton, B.T., J.F. Moncrief, C.J. Rosen, S.C. Gupta y H.H. Cheng. 1996.** *Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil.* Journal of Environmental Quality. 25:982-992.
- Sisquella, M., J. Lloveras, F. Santverí y C. Cantero. 2004.** *Técnicas de cultivo para la producción de maíz, trigo y alfalfa en los regadíos del valle del Ebro. Proyecto Trama-Life.* Ed. Fundació Catalan de Cooperació. Lleida.
- Smith, S.J. y A.N. Sharpley. 1990.** *Soil nitrogen mineralization in the presence of surface and incorporated crop residues.* Agronomy Journal. 82:112-116.
- Sogbedji, J.M., H.M. van Es, C.L. Yang, L.D. Geohring y F.R. Magdoff. 2000.** *Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type.* Journal of Environmental Quality. 29:1813-1320.
- Soil Survey Staff. 1975.** *Soil taxonomy: A basic system for making and interpreting soil survey.* Agric. Handbook n.536. U.S.Gov. Print Office. Washinton. USA.
- Soil Survey Staff. 1990.** *Keys to soil taxonomy. SMSS. Tech. Mon. 6.* 422 p. Blacksburg. Virginia. USA.
- Soltner, D. 1990.** *Les bases de la production végétale (I): Le sol.* 18ème ed. Ed. Collection Sciences et Techniques Agricoles.
- Spieritz, J.H. y L. Sibma. 1986.** *Dry matter production and nitrogen utilization in cropping systems with grass, lucerne and maize. 2: Nitrogen yield and utilization.* Netherlands Journal of Agricultural Science. 34:37-47.
- Studdert, G.A. 2005.** *Rotaciones de cultivos en el sudeste de la provincia de buenos aires (Argentina): una herramienta para el manejo de la dinámica del nitrógeno y del carbono en el suelo.* Tesis doctoral. Universitat de Lleida.
- Sturz A.V. y B.R. Christie. 2003.** *Beneficial microbial allelopathies in the root zone: the management of soil quality and plant disease with rhizobacteria.* Soil and Tillage Research. 72:107-123.
- Sutherland, W.N, W.D. Shrader y J.T. Pesek. 1961.** *Efficiency of legume residue nitrogen and inorganic nitrogen in corn production.* Agronomy Journal. 53:339-342.
- Timoneda, R. 1998.** *Efecte de l'adobat nitrogenat en la producció de panís i en el contingut de nitrògen en el sòl dels regs de l'Urgell.* Proyecto Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida.
- Timsina, J., U. Singh, M. Badaruddin, C. Meisner y M.R. Ami. 2001.** *Cultivar, nitrogen, and water effects on productivity, and nitrogen-use efficiency and balance for rice-wheat sequences of Bangladesh.* Field Crops Research. 72:143-161.
- Thompson, L.M. 1986.** *Climatic change, weather variability and corn production.* Agronomy Journal. 78:649-653.
- Toth, J.D. y R.H. Fox. 1998.** *Nitrate losses from a corn-alfalfa rotation: lysimeter measurement of nitrate leaching.* Journal of Environmental Quality. 27:1027-1033.
- Triboi, E. 1990.** *Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre (Triticum aestivum L.).* Agronomie. 10:191-200.
- Triboi, E., G. Blanlard y J. Landry. 1990.** *Environmental and husbandry effects on the content and composition of proteins in wheat.* Aspects of applied biology 25, Cereal quality II: 149-158.
- Triboi, E., A. Abad, A. Michelena, J.Lloveras, J.L. Ollier y C. Daniel. 2000.** *Environmental effects on the quality of two wheat genotypes: 1. quantitative and qualitative variation of storage proteins.* European Journal of Agronomy. 13:47-64.

- Triboi, E. y A.M. Triboi-Blondel. 2004.** *Grain yield and nitrogen concentration of wheat in a cropping system using lucerne a nitrogen source.* En: S.E. Jacobsen, C.R. Jensen and J.R. Porter (eds). *Proceedings VIII ESA Congress.* p. 685-686. KVL Copenhagen, 11-15 July.
- Trinchant, J.C., J.J. Devron y J. Rigaud. 1997.** *Assimilation symbiotique de l'azote.* En: Morot-Gaudry, J.F. (ed.) *Assimilation de l'azote chez les plantes.* p. 134-147. INRA Ed. Paris. France.
- Uhart, S. y F.H. Andrade. 1995a.** *Nitrogen deficiency in corn I: Effects on crop growth, development, and kernel set.* *Crop Science.* 35:1376-1383.
- Uhart, S.A. y F.H. Andrade. 1995b.** *Nitrogen deficiency in maize II: Carbon-nitrogen interaction on kernel number and grain yield.* *Crop Science.* 35:1384-1389.
- Urbano, P. 1995.** *Tratado de fitotecnia general.* Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Urbano, P. y Moro, R. 1992.** *Sistemas agrícolas con rotaciones y alternativas de cultivos.* Ed. Mundi-Prensa. Madrid. España.
- Vanotti, M.B. y L.G. Bundy. 1995.** *Soybean effects on soil nitrogen availability in crop rotations.* *Agronomy Journal.* 87:676-680.
- Varron, M.T. S. I a. C. Rerum Rusticarum de Agricultura.** En: *Cato & Varro de Re Rustica.* Traducción al inglés de W.D. Hooper. (1934). Harvard University Press. London. UK.
- Varvel, G.E., J.S. Schepers y D.D. Francis. 1997a.** *Chlorophyll meter and stalk nitrate techniques as complementary indices for residual nitrogen.* *Journal of Production Agriculture.* 10:147-151.
- Varvel, G.E., J.S. Schepers y D.D. Francis. 1997b.** *Ability of inseason correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters.* *Soil Science Society of America Journal.* 66:1233-1239.
- Varvel, G.E. y W.W. Wilhelm. 2003.** *Soybean nitrogen contribution to corn and sorghum in Western Corn Belt rotations.* *Agronomy Journal.* 95:1220-1225
- Villar, P., J.M. Villar, F. Ferrer y M. Arán, M. 2000.** *Optimización de la fertilización nitrogenada en maíz en suelos calcáreos del área regada por los Canales de Urgell (Lleida).* *Investigación Agraria: Producción y protección de los vegetales.* 15:1-123.
- Villar, J.M., P. Villar, C.O. Stockle, F. Ferrer y M. Arán. 2002.** *On-farm monitoring of soil nitrate-nitrogen in irrigated cornfields in the Ebro Valley (northeast Spain).* *Agronomy Journal.* 93:373-380.
- Virgilio. 26 a. C. aprox.** *Geòrgiques, I.* Traducción al catalán de M. Dolç. (1963). Ed. Fundació Bernat Metge Barcelona.
- Whiting, K.R. y R.K. Crookston. 1993.** *Host-specific pathogens do not account for the corn-soybean rotation effect.* *Crop Science.* 33:539-543.
- XAC. 2004.** *Dades mensuals: Estació de Juneda.* [en línea]. Xarxa Agrometeorològica de Catalunya. [Consultado el: 27-10-2004]. Disponible en internet: <http://xarxes.meteocat.com/xac/>
- Yu, J.Q. 1999.** *Allelopathic control of soil-borne diseases in vegetable crops.* En: Narval S.S. (ed). *Allelopathy update: basic and applied aspects.* p. 335-344. Science Publisher. Inc. NY. USA.

