



TESIS DOCTORALES

60

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE FERTILIZACIÓN
NITROGENADA RACIONAL EN TRIGO BLANDO
DE INVIERNO BAJO CONDICIONES DE CLIMA
MEDITERRÁNEO HÚMEDO

M.^a Arritokieta Ortuzar Irigorri



EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

NEKAZARITZA, ARRANTZA
ETA ELIKADURA SAILA

DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA,
PESCA Y ALIMENTACIÓN

TESIS DOCTORALES

N.º 60

UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA RACIONAL EN TRIGO BLANDO DE INVIERNO BAJO CONDICIONES DE CLIMA MEDITERRÁNEO HÚMEDO

M.ª Arritokieta Ortuzar Irigorri



Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia
Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco

Vitoria-Gasteiz, 2007

ORTUZAR IRAGORRI, M^a Arritokieta

Desarrollo de un sistema de fertilización nitrogenada racional en trigo blando de invierno bajo condiciones de clima mediterráneo húmedo / M^a Arritokieta Ortuzar Irigorri. - 1^a ed. - Vitoria-Gasteiz : Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia = Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, 2007

p. ; cm. - (Tesis doctorales ; 60)

Tesis-Universidad del País Vasco

ISBN 978-84-457-2622-8

1. Trigo-Fertilizantes-Tesis doctorales. I. Euskadi. Departamento de Agricultura, Pesca y Alimentación. II. Título. III. Serie
633.11-18(043)

Edición: 1.^a julio 2007

Tirada: 25 ejemplares

© Administración de la Comunidad Autónoma del País Vasco
Departamento de Agricultura, Pesca y Alimentación

Internet: www.euskadi.net

Edita: Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia
Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco
Donostia-San Sebastián, 1 - 01010 Vitoria-Gasteiz

Impresión: XXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXX

ISBN: 978-84-457-2622-8

D. L.: XXXXXXXXX

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE FERTILIZACIÓN
NITROGENADA RACIONAL EN TRIGO BLANDO DE
INVIERNO BAJO CONDICIONES DE CLIMA
MEDITERRÁNEO HÚMEDO
TESIS DOCTORAL**



M^a Arritokieta Ortuzar Irigorri

Leioa, junio 2007

**AUTORIZACION DEL/LA DIRECTOR/A DE
TESIS
PARA SU PRESENTACION**

Dra. Ana Aizpurua Insausti y Dr. José María Estavillo Aurre como Directores de la Tesis Doctoral “Desarrollo de un sistema de fertilización nitrogenada racional de trigo blando de invierno bajo condiciones de clima mediterráneo húmedo” realizada en la UPV/EHU- Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea por el Doctorando Don/ña. M^a Arritokieta Ortuzar Irigorri, autorizan la presentación de la citada Tesis Doctoral, dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

En _____ a _____ de _____ de _____

EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS

Fdo.: _____

**CONFORMIDAD DEL
DEPARTAMENTO/INSTITUTO**

El Consejo del Departamento/Instituto de Biología Vegetal y Ecología en reunión celebrada el día ____ de ____ de ____ ha acordado dar la conformidad a la admisión a trámite de presentación de la Tesis Doctoral titulada: Desarrollo de un sistema de fertilización nitrogenada racional de trigo blando de invierno bajo condiciones de clima mediterráneo húmedo dirigida por la Dra. Ana Aizpurua Insausti y el Dr. José María Estavillo Aurre y presentada por Don/ña. M^a Arritokieta Ortuzar_Iragorri ante este Departamento/Instituto.

En Leioa _____ a ____ de _____ de 2007

Vº Bº DIRECTOR/A DEL
DEPARTAMENTO/INSTITUTO

SECRETARIO/A DEL
DEPARTAMENTO./INSTITUTO

Fdo.: _____

Fdo.: _____



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

ACTA DE GRADO DE DOCTOR

ACTA DE DEFENSA DE TESIS

DOCTORAL

DOCTORANDO DON/ÑA: M^a Arritokieta Otuzar Irigorri

TITULO DE LA TESIS: Desarrollo de un sistema de fertilización nitrogenada racional de trigo blando de invierno bajo condiciones de clima mediterráneo húmedo.

El Tribunal designado por la Subcomisión de Doctorado de la UPV/EHU para calificar la Tesis Doctoral arriba indicada y reunido en el día de la fecha, una vez efectuada la defensa por el doctorando y contestadas las objeciones y/o sugerencias que se le han formulado, ha otorgado por _____ la calificación de:
unanimidad ó mayoría



En Leioa a _____ de _____ de _____

EL/LA PRESIDENTE/A,

EL/LA SECRETARIO/A,

Fdo.:

Fdo.:

Dr/a: _____

Dr/a: _____

VOCAL 1º,

VOCAL 2º,

VOCAL 3º,

Fdo.:

Fdo.:

Fdo.:

Dr/a: _____ Dr/a: _____ Dr/a: _____

EL/LA DOCTORANDO/A, M^a Arritokieta Ortuzar Irigorri

Fdo.:

Pilar eta Asierrentzat

Agradecimientos

A los directores, Dra. Ana Aizpurua Insausti y Dr. José M^a Estavillo Aurre por su gran esfuerzo y tesón. No han parado de trabajar.

A los compañeros de proyecto repartidos por el CCMA (Centro de Ciencias Medioambientales de Madrid del CSIC), CITA (Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón), IRTA- Mas Badia, UCLM (Universidad de Castilla La Mancha), ITAP (Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete), ITGA (Instituto Técnico para la Gestión Agrícola de Navarra), UdL (Universitat de Lleida), UPM (Universidad Politécnica de Madrid) y UPNA (Universidad Pública de Navarra) por su ayuda y compañerismo.

También quisiera agradecer al INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) y al Dr. Justes su acogida en el centro de Toulouse.

Agradezco la ayuda técnica facilitada por P. Berenguer, G. Borrás, M. Domingo, C. Herrán, J. Irañeta, Dr. Landeras, Dr. Menéndez, Dra. Merino, Dr. Neurkirchen y Dr. Brentrup. Así como a Yara Internacional el préstamo de los aparatos y a las cooperativas GARLAN y SAGRAL la acogida en sus centros y el suministro de información ocasional.

He disfrutado de una Beca Predoctoral para Formación de Tecnólogos concedida por el Dpto. de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno Vasco (2001-2003), y otras dos Becas Predoctorales de la Fundación Cándido Iturriaga (2003-2005) y una beca predoctoral de la UPV-EHU (2005-2006).

Este trabajo se financió con fondos Feder (2FD97-2425-C06-03) y fondos del Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyecto MCyT AGL2001-2214-CO6-06) y el Gobierno Vasco.

A mis compañeros de Neiker: Ander, Asier, Jon Paul, Sorkun, Olatz, Ainhoa, Oscar, Ainara, Haritz, Goio, Iker, Maria, Zalao, Julema y Lorena...por ayudarme en todo tipo de cuestiones. Y a los de la universidad Arcaya, Carmen, Izaskun, Txema, Josemi, Blanca...En Leioa, a Sergio Menéndez por la gran ayuda prestada sobre todo en el formato de la tesis y dudas respecto a las emisiones de N₂O, a Miren y Teresa por la información, a Azu, Héctor y Antonio por la ayuda con el cromatógrafo.

A mis amigos Catalina, Edurne, Carmelo, Monika, Patris, Esti, Oscar, Itzis, Heleanna, Lorenas, Ruth, Ainara, Dorleta, Marta, Mainer, Arantza, Natalia, Maru, Ohiana, Beas, Amaias, Debo, Bego, Red, Sandra, Tori, Verónica, Elisa y Zuriñe y a Ander, Jon y Jose.

Y finalmente mis agradecimientos a mis padres, hermano y novio: José, Lourdes, Javier y Asier que han trabajado conmigo, han hecho recados y han sufragado parte de los gastos de mi existencia durante largo tiempo. Y también a Arantza, Ignacio, Sofía, Juan José, Marian, Nico, Paula, Telmo, José Luis y Karnele, que ha contribuido con sus conocimientos. Y a Daniel y Balbina y Pilar y Nicolás, mis aitonas.

A todos los que me habéis echado un cable o me habéis amenizado estos años, milesker.

Índice

Glosario	i
Resumen	iii
Laburpena	v
Abstract	vii
1. Introducción	1
1.1. El cultivo del trigo	1
1.2. Nitrógeno y agricultura	4
<i>1.2.1. Ciclo del Nitrógeno</i>	4
<i>1.2.2. Pérdidas por lixiviación y zonas vulnerables</i>	7
<i>1.2.3. Pérdidas gaseosas: nitrificación y desnitrificación</i>	9
<i>1.2.4. Fertilización racional</i>	11
1.3. Herramientas de racionalización de la fertilización nitrogenada	14
<i>1.3.1. Balance de N</i>	14
<i>1.3.2. Análisis foliar</i>	16
<i>1.3.3. Análisis del jugo de la base del tallo</i>	16
<i>1.3.4. Índice de nutrición nitrogenada</i>	17
<i>1.3.5. Medidores de clorofila</i>	17
1.4. Justificación del trabajo y objetivos	18

2. Efecto de la fertilización nitrogenada en el rendimiento y dosis económicamente óptimas.....	23
2.1. Introducción.....	23
2.2. Materiales y métodos.....	26
2.2.1. <i>Establecimiento de ensayos.....</i>	26
2.2.2. <i>Rendimiento y contenido de N en grano.....</i>	28
2.2.3. <i>Ajuste de modelos.....</i>	28
2.3. Resultados y discusión.....	30
2.3.1. <i>Rendimiento.....</i>	30
2.3.2. <i>Contenido de N.....</i>	40
2.3.3. <i>Zonas vulnerables a la contaminación por nitratos (ZVN).....</i>	47
2.4. Conclusiones.....	50
3. Uso del N-Tester®: evaluación del estado nutricional nitrogenado y predicción del rendimiento.....	53
3.1. Introducción.....	53
3.2. <i>Materiales y Métodos.....</i>	55
3.2.1. <i>Ensayos de campo.....</i>	55
3.2.2. <i>Lecturas de N-Tester.....</i>	56
3.2.3. <i>Medidas en planta.....</i>	58
3.2.4. <i>Condiciones climáticas.....</i>	59
3.2.5. <i>Estadística.....</i>	60
3.3. Resultados y Discusión.....	61
3.3.1. <i>N-Tester vs concentración de N en parte aérea de la planta y absorción de N por la parte aérea de la planta.....</i>	61
3.3.2. <i>N-Tester vs rendimiento.....</i>	66

3.4. Conclusiones.....	74
4. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía en el rendimiento y contenido de proteína. Utilidad del N-Tester[®] como herramienta de decisión.....	75
4.1. Introducción.....	75
4.2. Materiales y métodos.....	78
4.2.1. <i>Ensayos de campo.....</i>	78
4.2.2. <i>Rendimiento y contenido de proteína en grano..</i>	79
4.2.3. <i>N-Tester[®].....</i>	81
4.2.4. <i>Estadística.....</i>	82
4.3. Resultados.....	83
4.3.1. <i>Reparto de la dosis de N.....</i>	83
4.3.2. <i>Estrategia de baja fertilización nitrogenada.....</i>	86
4.3.3. <i>Uso del N-Tester[®].....</i>	87
4.4. Discusión.....	88
4.4.1. <i>Reparto de la dosis de N.....</i>	88
4.4.2. <i>Estrategia de baja fertilización.....</i>	93
4.4.3. <i>Uso del N-Tester[®].....</i>	94
4.5. Conclusiones.....	100
5. Pérdidas de N por lixiviación y en forma gaseosa	
Balance de N.....	103
5.1. Introducción.....	103
5.2. Materiales y métodos.....	106
5.2.1. <i>Establecimiento del ensayo.....</i>	106
5.2.2. <i>Nitrógeno mineral.....</i>	108

5.2.3. Nitrato lixiviado.....	109
5.2.4. Pérdidas gaseosas.....	112
5.2.4.1. Emisiones de N_2O	112
5.2.4.2. Producción de N_2O y desnitrificació total en la capa arable.....	115
5.2.5. Extracción de N por la planta.....	116
5.2.6. Balance de nitrógeno.....	117
5.2.7. Eficiencia del uso del nitrógeno.....	118
5.2.8 Estadística.....	119
5.3. Resultados y discusión.....	119
5.3.1. Nitrógeno mineral.....	119
5.3.2. Nitrato lixiviado.....	123
5.3.3. Pérdidas gaseosas.....	132
5.3.4. Balance de nitrógeno.....	138
5.4. Conclusiones.....	142
6. Conclusiones generales.....	145
7. Bibliografía.....	149

Glosario

- ρ_{ssp} : densidad aparente del suelo sin piedras (g cm^{-3})
- $[\text{N-NO}_3^-]$: concentración de nitrógeno nítrico en el lixiviado (mg L^{-1})
- Ben_p : beneficios obtenidos por el agricultor al aplicar N_p (€ ha^{-1})
- Ben_γ : beneficios obtenidos por el agricultor al aplicar N_c (€ ha^{-1})
- D_{20} : drenaje por debajo de 20 cm (mm)
- D_{40} : drenaje por debajo de 40 cm (mm)
- D_{60} : pérdida de agua por percolación profunda (mm)
- ETc: evapotranspiración del cultivo (mm)
- EUf: eficiencia de uso del fertilizante (adimensional)
- ICN. índice de cosecha del N cociente entre el N en grano y el extraído por la parte aérea del cultivo (adimensional)
- F: cantidad de N aplicado como fertilizante (kg N ha^{-1})
- f: precio del N (€ kg^{-1})
- g: prima sobre proteína (€ kg^{-1}).
- H: porcentaje de agua en suelo seco para la capa de 0-30 cm (g agua: 100 g suelo seco)
- Min: N mineralizado en el tratamiento testigo ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)
- N: nitrógeno.
- N_2Oem : emisión de N_2O ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)
- Nab : absorción de N por la parte aérea de la planta (kg N ha^{-1})
- Nabr : absorción de N por las raíces de la planta (kg N ha^{-1})
- Nagr : dosis de N necesaria para el rendimiento máximo (kg N ha^{-1})
- Nconc : concentración de N en la parte aérea de la planta (%)
- Ndesni : N gas ($\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$) producido por desnitrificación ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)

- Nec: dosis de N económicamente óptima respecto al rendimiento (kg N ha^{-1})
- Nlix: N lixiviado forma de nitrato (kg N ha^{-1})
- Nmin: N mineral en suelo (kg N ha^{-1})
- NminDC: N mineral en suelo después de cosecha (kg N ha^{-1})
- NminS: N mineral en suelo antes de cosecha (kg N ha^{-1})
- Npr: dosis de N necesaria para obtener un porcentaje de proteína en grano de 12,5 % (kg N ha^{-1})
- Nprod: producción de N_2O ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)
- P: término binario para proteína; P=0 si el contenido en proteína es inferior al mínimo requerido, P=1 si el contenido en proteína \geq mínimo requerido
- PPLA: porcentaje de poros llenos de agua (%)
- Pr: precipitación (mm)
- R²: coeficiente de determinación
- Rd: rendimiento (kg ha^{-1})
- t: precio del trigo (€ kg^{-1})
- VR₂₀: variación de la reserva de agua en la capa del suelo de 0-20 cm (mm)
- VR₄₀: variación de la reserva de agua en la capa del suelo de 20-40 cm (mm)
- VR₆₀: variación de la reserva de agua en la capa del suelo de 40-60 cm (mm)
- ZVN: zona vulnerable a la contaminación por nitratos de origen agrícola.
- ΔRd : incremento en el rendimiento obtenido (kg ha^{-1})

Resumen

El N es el elemento que más directamente influye en la producción vegetal y en el contenido de proteína de los cultivos de grano. Sin embargo, la sobrefertilización nitrogenada genera problemas medioambientales como la contaminación de las aguas y el calentamiento global, lo que ha derivado en la Declaración de Zonas Vulnerables a la contaminación por nitratos en la Unión Europea y en la adhesión de muchos países al protocolo de Kyoto. En el caso del trigo existe una demanda de producción de grano de calidad que se remunera económicamente. Estas circunstancias, de carácter económico y medioambiental, exigían el desarrollo de un sistema de fertilización nitrogenada racional que posibilitara la optimización de la utilización del N en las condiciones edafoclimáticas específicas de Álava.

Para cumplir este objetivo se estableció una red de ensayos de fertilización nitrogenada mediante la cual se evaluaron una serie de estrategias de fertilización y herramientas de diagnóstico asociadas. Así, se calculó la dosis de N económicamente óptima para Álava, se estudiaron nuevas estrategias de fertilización que comprenden un aporte tardío, se evaluaron herramientas de diagnóstico (N_{min} y medidor de clorofila), y se cuantificaron las pérdidas de N por lixiviación de nitrato y en forma de N₂O emitido a la atmósfera, así como las extracciones de N por parte de la planta según los tratamientos de fertilización nitrogenada aplicados.

Laburpena

Landare-ekoizpenean eragin gehien duen elementua nitrogenoa da, bai ale ekoizpenean eta baita aleen proteina edukian ere. Aldiz, nitrogenoarekin gainongarritzeak ingurumenean arazoak sortarazten ditu, hala nola uraren kutsadura eta berotegi efektua. Honen ondorioz, Europar Batasunean nitrato-kutsadurarekiko gune sentikorrek izendatu dira, eta hainbat herrialdek Kyoto-ko protokoloa sinatu dute. Gariaren kasuan kalitatezko alea produzitzeko eskaria dago, proteina kontzentrazio haundiak gehiago ordaintzen direlarik. Ekonomiaren zein ingurumenaren inguruko baldintza hauetan gariaren arrazoizko ongarritze nitrogenatua garatu beharra dago, honek nitrogenoaren erabilera optimoa Arabako baldintza edafoklimatikotan ahalbideratuko duelarik.

Helburu hau betetzeko ongarritze nitrogenatuaren gaineko entseien sare bat ezarri zen. Honen bidez zenbait ongarritze-estrategia eta haiei lotutako diagnosirako tresnak ere ebaluatu ziren. Horrela, Arabako nitrogeno dosi optimoa kalkulatu zen, aplikazio berantiarra kontsideratzen zuten ongarritze-estrategia berriak aztertu ziren, diagnosirako tresnak ebaluatu ziren (N_{min} eta klorofila neurgailua) eta aplikatutako ongarritze nitrogenatutako tratamendu desberdinen arabera, nitrato-lixibiazioaren bidezko zein atmosferarako N₂O-igorpenaren bidezko nitrogeno-galerak eta landareak erauzitako nitrogeno-kopuruak kuantifikatu ziren.

Abstract

Nitrogen is the element with the greatest influence on plant production and on protein content in the case of grain crops. Nevertheless, nitrogen over-fertilization produces environmental problems such as water pollution and global warming, which has led to the declaration of vulnerable zones to nitrate pollution in the European Union and to the adhesion of many countries to the Kyoto protocol. In the case of wheat there is a demand for producing quality grain, which is primed with a bonus price. Under these both economical and environmental circumstances, arose the need for a rational system of nitrogen fertilization which enabled the optimization of nitrogen use under the specific edaphoclimatic conditions of Alava.

In order to cope with this objective a net of nitrogen fertilization assays was established by means of which a series of fertilization strategies together with some associated diagnosis tools were evaluated. Thus, the economically optimum dose for Alava was calculated, new nitrogen fertilization strategies with a late third N application were studied, diagnosis tools were evaluated (Nmin and chlorophyll meter), and N losses occurring both by nitrate leaching and by N₂O emissions to the atmosphere were quantified, as well as plant N extractions regarding the different nitrogen fertilizer treatments applied.

1. Introducción

1.1. El cultivo del trigo

El trigo pertenece a la familia de las Gramíneas, tribu *Hordeae*. El género *Triticum* comprende alrededor de 30 tipos de trigo que tienen suficientes diferencias genéticas como para ser considerados especies distintas. Entre éstas, el *Triticum aestivum* es la especie más cultivada (López-Bellido, 1991).

El trigo posee una raíz fasciculada con numerosas ramificaciones. El tallo es una caña hueca excepto en los nudos, donde permanece macizo. Las hojas son cintiformes, paralelinervias y terminadas en punta con vaina, lígula y aurículas bien definidas. La inflorescencia es una espiga compuesta por un raquis sobre el cual van dispuestas 20 a 30 espiguillas en forma alterna y laxa o compacta, llevando cada una varias flores rodeadas por glumas y glumillas. Los granos son carióspsides que presentan forma ovalada con sus extremos redondeados. En el ciclo del trigo se distinguen tres periodos: el vegetativo, que comprende desde la siembra hasta el comienzo de encañado, el periodo de reproducción, que ocurre desde el encañado hasta la terminación del espigado y el periodo de maduración, que comprende desde el final del espigado hasta el momento de recolección (Guerrero, 1999).

Los avances de la mejora genética de este cereal han ido en paralelo con la propia trayectoria humana. La agricultura, surgida hace

1. INTRODUCCIÓN

unos 10.000 años en el Neolítico con la domesticación de especies silvestres, tuvo sus hitos iniciales con el cultivo en el Próximo Oriente del trigo duro (*Triticum turgidum*) y la cebada (*Hordeum vulgare*). La mejora del trigo como método científico es relativamente moderna. En este sentido, cabe destacar la selección de variedades de trigo de alto rendimiento destinadas a los países en desarrollo que realizó el CIMMYT de Méjico a partir de 1960. El impacto de este trabajo ha sido conocido como la “revolución verde” y ha elevado los rendimientos a niveles superiores a todos los conseguidos desde que se inició la domesticación de esta planta hace 10000 años (López -Bellido, 1991). Las principales características de estas nuevas variedades fueron la baja altura, los tallos y raíces fuertes que resistían al encamado, mayor número de flores fértiles, elevada respuesta a la fertilización nitrogenada, etc.

El trigo constituye el alimento principal de un tercio de la población humana y se trata de un componente fundamental de la alimentación debido a su alto valor nutritivo. Así, el trigo es el cereal de grano cuyo cultivo está más extendido, cubriendo un 17% del área arable del mundo, casi igualmente dividida entre los países desarrollados y los que están en vías de desarrollo (Laegrid *et al.*, 1999).

La producción mundial de trigo fue de 1002,3 Mt en 2004, y se distribuyó tal y como se muestra en la Fig. 1. Asia produjo el 25%, porcentaje al cual China contribuyó con un 15%, América el 43%, siendo la contribución de Estados Unidos y Canadá del 32% y Europa el 21%, del cual la Unión Europea produjo la mitad (FAOSTAT, 2006).

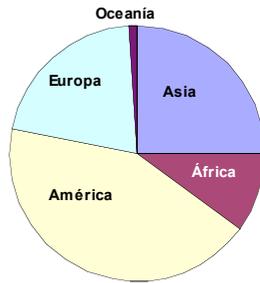


Figura 1. Reparto de la producción mundial de trigo en 2004.

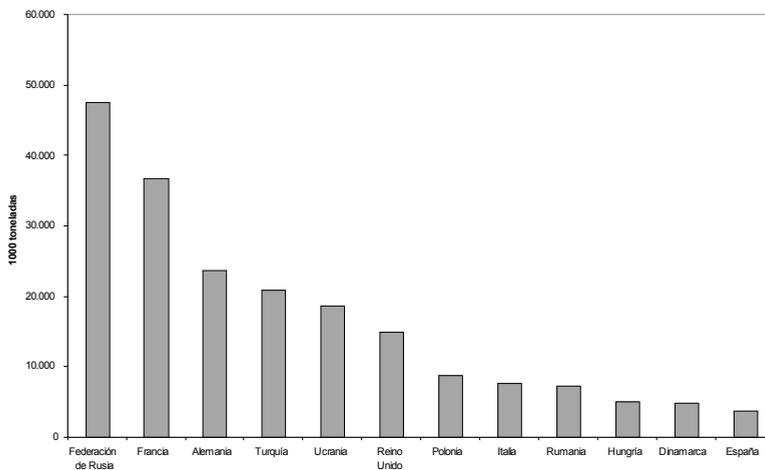


Figura 2. Producción de trigo en los países europeos con la mayor producción en 2005.

Los mayores productores de trigo en Europa en el año 2005 fueron Rusia y Francia, tal y como se muestra en la Fig. 2. España produjo unos 3815 Mt (FAOSTAT, 2006).

En el País Vasco la mayoría del trigo cultivado es trigo blando, se localiza íntegramente en la provincia de Álava (Eustat, 2004) y ocupa una extensión de unas 25.000 ha, lo que supone un 2% de la superficie cultivada con este mismo cereal en España. Se trata tanto de

una de las menores extensiones por comunidad autónoma dedicadas a este cultivo como de una de las más productivas con 5 t/ha sobre las 3 t/ha de media en España producidas en la campaña 2003 (AETC, 2004).

1.2. Nitrógeno y agricultura

1.2.1. Ciclo del Nitrógeno

En el suelo, el N esta presente en tres formas: i) como compuestos orgánicos asociados con el material vegetal, organismos y humus del suelo, ii) como N amoniacal ligado a las arcillas minerales, que es difícilmente extraíble y iii) como N mineral en disolución en forma mayoritaria de amonio y nitrato. El 95% del N del suelo está en forma orgánica y, por tanto, no disponible para las plantas. La mineralización del N orgánico ocurre cuando los microorganismos del suelo descomponen los residuos vegetales o la materia orgánica, liberando el N que no utilizan para su crecimiento en forma de amonio (NH_4^+). El proceso contrario, es decir, la inmovilización del N mineral (tanto en forma de nitrato como de amonio) por los microorganismos ocurre cuando éstos no obtienen el suficiente N para su crecimiento y toman el N inorgánico del suelo. Ambos procesos ocurren simultáneamente y el balance entre ellos, denominado mineralización neta, determina la cantidad de N mineral que el suelo pone a disposición de las plantas.

Las principales entradas de N al sistema suelo-planta son la deposición atmosférica, las excretas animales, la fijación biológica del nitrógeno y la fertilización nitrogenada (Fig. 3).

La deposición de la atmósfera y la lluvia puede suponer hasta 45 kg N ha⁻¹ año⁻¹. La lluvia proporciona una cantidad pequeña, pero significativa, estimada en unos 30 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Otras deposiciones atmosféricas se calculan entre 6 y 15 kg N ha⁻¹ año⁻¹ (González-Murua, 2004).

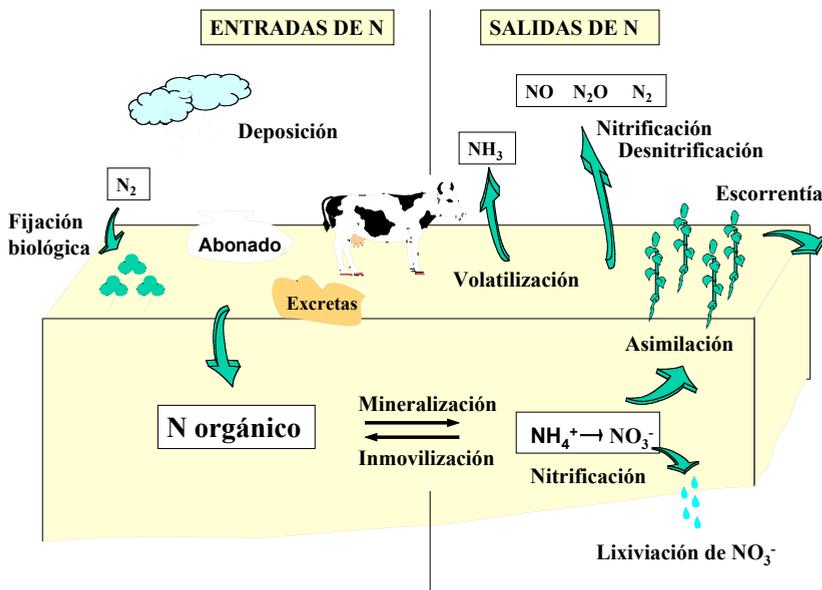


Figura 3. Esquema simplificado del ciclo del N.

Las excretas animales son un recurso valioso que permite completar el ciclo de nutrientes y que hace que gran parte del nitrógeno, fijado por las leguminosas y cosechado en forma de forraje pueda volver al suelo.

1. INTRODUCCIÓN

El porcentaje de nitrógeno de la atmósfera es de un 78%, sin embargo, el N en la atmósfera se encuentra como N_2 y éste es poco reactivo en la mayoría de condiciones naturales, solo pudiendo pasar a formas aprovechables por las plantas (amonio o nitrato) mediante la fijación de N_2 . Este proceso puede producirse mediante la combustión de N_2 con oxígeno a altas temperaturas, como ocurre con los rayos o en el proceso de fabricación de fertilizantes, o mediante ciertos microorganismos que tienen la dotación bioquímica que les permite incorporar el N_2 atmosférico a sus estructuras y convertirlo en N disponible para las plantas. En la fijación biológica del N_2 atmosférico operan dos sistemas: 1) la fijación por microorganismos de vida libre, y 2) la fijación por microorganismos que viven en simbiosis con plantas superiores, como el caso de la simbiosis del sistema Rhizobium-Leguminosa.

Las principales salidas de N del suelo son la extracción por parte de la planta y las pérdidas por volatilización de amoníaco, escorrentía, lixiviación de nitrato y en forma gaseosa por nitrificación y/o desnitrificación. Las plantas pueden tomar por las raíces tanto nitrato como amonio. El nitrato es absorbido por las raíces mediante transportadores de alta y baja afinidad y se almacena en vacuolas para posteriormente ser reducido a amonio en la raíz y/o transportado por el xilema a la parte aérea de las plantas. En las hojas puede ser de nuevo almacenado en vacuolas o reducido a amonio.

El ión NH_4^+ es retenido en el suelo por las cargas negativas de las arcillas. Sin embargo, si el pH del suelo aumenta, el equilibrio existente entre el NH_4^+ y el NH_3 disuelto se desplaza hacia la forma de

NH₃. De este modo, se puede dar una pérdida de amoníaco hacia la atmósfera. Las pérdidas por volatilización de amoníaco aumentan con la temperatura, valores de pH superiores a 6-7 y cuando se han realizado adiciones de residuos orgánicos al suelo (Stevenson, 1982).

El N en el agua de escorrentía puede estar presente en forma orgánica junto con las partículas del suelo erosionado o en forma inorgánica disuelto en el agua. Las pérdidas por lixiviación y nitrificación y/o desnitrificación se comentan a continuación.

1.2.2. Pérdidas por lixiviación y zonas vulnerables

El anión NO₃⁻ se liga solo débilmente a las partículas del suelo y por lo tanto sigue el movimiento del agua. Las plantas absorben los nutrientes disueltos en el agua evacuando así mismo el agua a la atmósfera mediante la transpiración por las hojas. Por otro lado, el agua también se puede evaporar desde el suelo. La lixiviación de NO₃⁻ ocurre por lo tanto con el agua de drenaje cuando el suelo está saturado de agua y la entrada de agua supera la pérdida de la misma por evapotranspiración.

Numerosos estudios indican que la aplicación de cantidades mayores de fertilizante nitrogenado que la dosis óptima hace incrementar notablemente el nitrato lixiviado en las aguas de drenaje ya que se rebasa la capacidad del cultivo de aprovechar el N aplicado (Chaney, 1990; Richards *et al.*, 1996; Kjellerup y Dam Kofoed, 1983; Lord y Mitchell, 1998). De hecho, las altas concentraciones de nitrato en las aguas se asocian al grado de extensión agrícola de la zona (Caraco y Cole, 1999; Arbuckle y Downing, 2001; Chang *et al.*, 2002).

1. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de una alta lixiviación de nitrato, las aguas se contaminan y eutrofizan (Addiscott *et al.*, 1991).

Las áreas de la Unión Europea particularmente vulnerables a la lixiviación de nitrato están sujetas a regulaciones específicas que los países miembros deben cumplir para reducir la contaminación de las aguas por nitratos (EEC, 1980). Las regulaciones consisten en: identificar y clasificar las áreas vulnerables a los nitratos cuando en éstas la concentración de aguas superficiales o profundas sea próxima, igual o superior a $11,3 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ o si las aguas fluviales, costeras o estuarias sufren peligro de eutrofización y se debe establecer un plan de acción con el objetivo de reducir la concentración de nitratos en estas aguas.

En Álava, gran parte de la superficie destinada al cultivo del trigo se encuentra en la zona que el Gobierno Vasco declaró vulnerable a la contaminación de las aguas por los nitratos procedentes de la actividad agraria (Fig. 4). En esta zona el máximo aporte de fertilización nitrogenada permitido a lo largo de la campaña para el trigo es de 140 kg N ha^{-1} (Tabla 1) y se prohíbe aportar fertilizante nitrogenado a una distancia de 3 m de cualquier tipo de curso de agua.

Tabla 1. Fertilización en cobertera de trigo permitida en las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos según precedente y calidad del suelo. Fuente (GV-EJ, 1999).

Cultivo anterior	Calidad del suelo	
	Fértil	Pobre
	(kg N ha ⁻¹)	
Patata	100-125	140
Remolacha	125	140
Cereal	125	140
Leguminosa	100	140

1.2.3. Pérdidas gaseosas: nitrificación y desnitrificación

Los procesos bacteriológicos de nitrificación y desnitrificación son las fuentes principales de N₂O en la mayoría de suelos (Menéndez *et al.*, 2006). La nitrificación es un proceso aeróbico microbiano relativamente constante en los ecosistemas. En él, el amonio se oxida primero a nitrito y posteriormente a nitrato. En este proceso de oxidación de amonio a nitrito se puede producir y liberar N₂O a la atmósfera (Wrage *et al.*, 2001). Por lo tanto, la disponibilidad de amonio (NH₄⁺) y oxígeno son los factores más importantes que controlan la nitrificación del suelo (Firestone y Davidson, 1989).

1. INTRODUCCIÓN

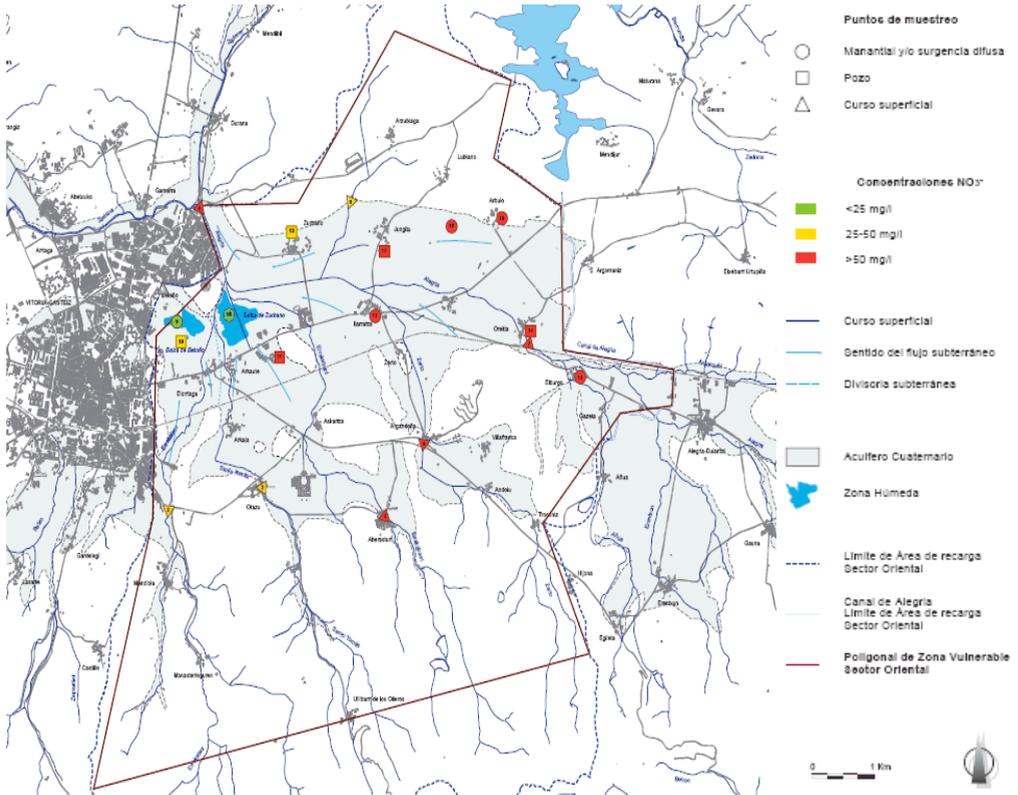


Figura 4. Zona vulnerable situada en el Sector Oriental Acuífero Cuaternario de Vitoria. Fuente: GV-EJ (1999).

La desnitrificación es, por el contrario, un proceso anaeróbico en el que el carbono orgánico se utiliza como fuente de energía y el nitrato como oxidante, reduciéndose a los compuestos gaseosos nitrogenados finales N_2O y N_2 . Así, los principales factores que controlan la desnitrificación biológica son la presencia de oxígeno, la disponibilidad de carbono y la de nitrato y otros óxidos de nitrógeno (Tiedje, 1988).

Desde un punto de vista ambiental se podría pensar que la desnitrificación es un proceso favorable, ya que compite con el proceso

de lixiviación por el nitrato del suelo. Sin embargo, la desnitrificación sólo será favorable dependiendo del gas obtenido como producto final. Si el gas producido es N_2 no hay riesgo desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, si la reducción de nitrato produce como producto final N_2O , la situación cambia ya que el N_2O contribuye al calentamiento global y también participa de forma indirecta en la reducción de la capa de ozono (González-Murua, 2004).

En vista del problema del calentamiento global, en 1988 se creó el Panel Internacional sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC) con el fin de dar asesoramiento científico-técnico y socioeconómico sobre dicho problema. Años más tarde, en 1997, con el Protocolo de Kioto los países industrializados se comprometieron a reducir las emisiones de gases invernadero en un 5,2% para el periodo 2008-2012 con respecto al nivel detectado en 1990. En este sentido se han identificado varias prioridades para la agricultura, que en el caso del N_2O consisten, básicamente, en reducir la utilización de fertilizantes nitrogenados y mejorar el manejo de los cultivos y de los residuos ganaderos. Esto se puede conseguir mediante el aumento de eficiencia en la utilización de los fertilizantes, la modernización de las prácticas agrícolas, la utilización de inhibidores de la nitrificación y de fertilizantes de liberación lenta.

1.2.4. Fertilización racional

El nitrógeno es esencial para el desarrollo de las plantas y causa un crecimiento rápido y visible en las mismas. Este elemento es, después del agua, el factor limitante del crecimiento más importante

1. INTRODUCCIÓN

para las plantas y, por tanto, para la producción agrícola. Consecuentemente, el consumo global de fertilizantes ha incrementado notablemente desde 1940. Antes de la Segunda Guerra Mundial la cantidad de fertilizante nitrogenado utilizado en el mundo era de 3 Mt mientras que en 1988 alcanzó 80 Mt (Ladha *et al.*, 2005) y se prevé que en 2008 alcanzará los 90 Mt para satisfacer la demanda global de alimentos (Prud'homme, 2003). Parte de este incremento se debe a la rápida y extensa adopción de variedades de trigo de menor estatura con altos rendimientos e índices de cosecha y mayor sensibilidad al aporte de nitrógeno asociada a la “revolución verde” (Evenson y Gollin, 2003). Por lo tanto, la cantidad de N que circula por los compartimentos del ciclo del N relacionados con la agricultura ha aumentado substancialmente generando varios problemas medioambientales. Los principales son: i.) mayores cantidades de nitrato en el suelo y en aguas superficiales, ii.) eutrofización y pérdida de biodiversidad, iii) acidificación de los suelos y aguas superficiales por deposición de amoníaco y óxidos nítricos y iv) aumento de óxido nitroso (N₂O) en la atmósfera, un gas que contribuye al efecto invernadero y a la degradación de la capa de ozono. Además, estos problemas están asociados a la menor eficiencia de la fertilización nitrogenada.

Para minimizar los problemas medioambientales y maximizar la eficiencia de la fertilización y por tanto el beneficio económico de los agricultores se sugiere una fertilización más racional que trate de ajustar la dosis a las necesidades de la planta atendiendo a los

momentos de mayor necesidad de ésta y considerando todas las fuentes de nitrógeno disponibles (N mineral del suelo, N en el agua etc.).

Para el trigo, Alley *et al.* (1999) sitúan los momentos de mayor absorción de N en los estadios fenológicos Z25 y de Z30 a Z58 según la escala de Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974). Es decir, en torno al ahijado y desde inicio de encañado hasta antes de antesis. Addiscott (1991) y Gate (1995) estiman que la necesidad de N del trigo en nascencia, normalmente inferior a 10 kg ha⁻¹, puede ser suplida por la propia mineralización del suelo.

En el inicio de ahijado, Z20, la dosis del aporte debe corresponder a la biomasa a obtener en inicio de encañado y no más, de manera que no se favorezca la aparición de hijuelos no productivos y el consumo de lujo (ITCF, 2002).

En la salida de invierno las necesidades de N son elevadas (Gate, 1995; Guerrero, 1999) por lo que se hace necesario un aporte de nitrógeno. En este periodo se debe calcular el N a aportar teniendo en cuenta que en este estadio se deciden componentes de rendimiento importantes así como que el peligro de lixiviación por abundantes lluvias y, por lo tanto, el derroche de N puede ser sustancial.

Gate, (1995) y Destain *et al.* (2002) proponen un tercer aporte nitrogenado en hoja bandera. El aporte en hoja bandera, Z37, enriquece las partes vegetativas del trigo con N que luego se trasladará al grano, aumentando el contenido de proteína en el mismo.

1.3. Herramientas de racionalización de la fertilización nitrogenada

Con el fin de satisfacer las necesidades de nitrógeno de la planta para la obtención de un rendimiento y calidad deseados y, a la vez, evitar las pérdidas de N, surge la necesidad de herramientas de apoyo a la fertilización nitrogenada.

1.3.1. Balance de N

Los balances de N se basan en la aplicación del principio de conservación de masa a los sistemas de cultivo. Así, la variación en la cantidad de N almacenado en un sistema será igual a la diferencia entre las entradas y salidas del sistema (Meisinger y Randall, 1991). El N amónico y nítrico en el suelo (N_{min}) es el que utilizan las plantas para su crecimiento y es muy frecuente realizar el balance de N considerando las entradas y salidas respecto al N_{min} (Quemada *et al.*, 2006).

Sin embargo y a pesar de que el análisis de N_{min} en el suelo permite conocer la cantidad de nitrógeno mineral disponible para el cultivo en el momento en el que se realiza el muestreo, este análisis de N_{min} es como una fotografía en un momento concreto. Ese nitrógeno mineral medido puede perderse si es utilizado rápidamente por el cultivo y la lluvia lo arrastra, o también puede aumentar si la materia orgánica del suelo va aportando más en su proceso de mineralización (Irañeta *et al.*, 2002). Es decir, la cantidad de nitrógeno en el suelo disponible para la planta durante el cultivo no depende únicamente del

nitrógeno mineral en el momento de la medida sino también de otros factores ambientales (Rig *et al.*, 1981) como por ejemplo la disponibilidad de agua y la temperatura (González-Montaner *et al.*, 1991; Loewy, 1993), que determinarán la dinámica del nitrógeno en el suelo, la lixiviación, mineralización, desnitrificación etc. (Echeverría *et al.*, 1994).

Por lo tanto, el potencial de mineralización de un suelo y la cantidad de N mineral disponible son puntos importantes a tener en cuenta en el manejo de la fertilización. Cuando la mineralización excede a la inmovilización, el suelo se convierte en un proveedor neto de N mineral para las plantas y entonces el fertilizante, en exceso, no es utilizado por la plantas y corre el riesgo de perderse. Por el contrario, si la inmovilización excede a la mineralización, los microorganismos del suelo compiten con las plantas por el N mineral y el fertilizante será inmovilizado pudiendo ser insuficiente para un rendimiento vegetal óptimo.

Teniendo en cuenta el balance de nitrógeno citado anteriormente y haciendo hincapié en cuestiones tales como el N aportado al suelo por el cultivo precedente, la lixiviación y el objetivo de rendimiento, el ITCF (2002) propone el cálculo de la dosis total a aplicar en dos o tres aportes nitrogenados. De ellos, el primero en Z20, inicio de ahijado o salida de invierno, se efectuará si el contenido de N_{min} en el suelo es inferior a 60 kg ha⁻¹. El segundo aporte, en Z30 inicio de encañado se realizará teniendo en cuenta el rendimiento deseado. El tercer aporte se aplicará fraccionando el segundo y con el fin de aumentar el contenido de proteína en grano.

1.3.2. *Análisis foliar*

Entre las utilidades del análisis de tejidos, Reuter y Robinson (1986) enumeran el diagnóstico, la predicción de la deficiencia de nutrientes, la monitorización de la efectividad de la estrategia de fertilización, la determinación de las cantidades de los minerales clave retirados por los cultivos con el fin de reemplazarlos, etc. Por lo tanto el análisis foliar constituye una metodología para evaluar la nutrición del cultivo ya que integra todos los factores de suelo, ambiente y manejo. Puede ser considerada tanto para la corrección inmediata de deficiencias como también para evaluar los resultados del manejo de la nutrición.

1.3.3. *Análisis del jugo de la base del tallo*

Por medio del análisis del jugo de la base del tallo se pueden deducir tanto el estado nutricional de la planta como la disponibilidad de nitrato en el suelo (Laurent *et al.*, 1996). El jugo de la base del tallo es un extracto acuoso de varios todos los tejidos constitutivos del mismo. La medida del contenido de nitrato en la base del tallo representa el stock de iones nitrato presentes en la planta y no el flujo instantáneo de absorción. Por lo tanto esta medida es útil para diagnosticar la aparición de una deficiencia de nitrógeno en la planta, aunque no es de gran sensibilidad y no se puede utilizar sino para distinguir a *grosso modo* el déficit de N. En este sentido Laurent *et al.* (1996) indican que el indicador mejor adaptado para medir la carencia de N es el índice de nutrición nitrogenada (INN).

1.3.4. Índice de nutrición nitrogenada

El índice de nutrición nitrogenada (INN) cuantifica el estado nutricional nitrogenado de un cultivo y representa el cociente entre el contenido de N total de la materia seca aérea y el contenido crítico de N para un crecimiento no limitado, éste último definido en la curva de dilución. Valores superiores e inferiores al contenido crítico de N indicarían un consumo de lujo y una carencia nutricional respectivamente.

La curva del índice de nutrición nitrogenada permite la detección de carencias nutricionales del trigo y su corrección mediante aportes de N. Por ejemplo, la relación entre el INN en floración y el número de granos relativo respecto al máximo es tan estrecha (Justes *et al.*, 1997a) que se puede determinar el INN preciso para un rendimiento objetivo y corregirse mediante el aporte de N en floración si se denota que el estado nutricional nitrogenado del trigo es carencial (Laurent *et al.*, 1996).

1.3.5. Medidores de clorofila

El estado nutricional nitrogenado del cultivo se puede estimar mediante un medidor de clorofila, ya que hay una estrecha relación entre el N en la hoja y el contenido de clorofila de la hoja (Peng *et al.*, 1995). De esta medida se puede deducir la necesidad de N del cultivo tal y como se ve en la Fig. 5. Estos aparatos son más sensibles en torno al límite entre la deficiencia y la nutrición nitrogenada adecuada (Ladha

et al., 2005) por lo que mediante su uso se puede decidir si la planta está necesitada de un aporte de N.

A pesar de que los medidores de clorofila permiten una medición rápida y no destructiva, no son indiferentes a factores medioambientales de estrés causados por el exceso o deficiencia de agua, deficiencias de otros nutrientes que no sean N y enfermedades, por lo que se recomienda relativizar las lecturas así obtenidas respecto a una parcela sin limitaciones de N en el mismo entorno (Piekielek *et al.*, 1992; Schepers *et al.*, 1992; Fox *et al.*, 1994).

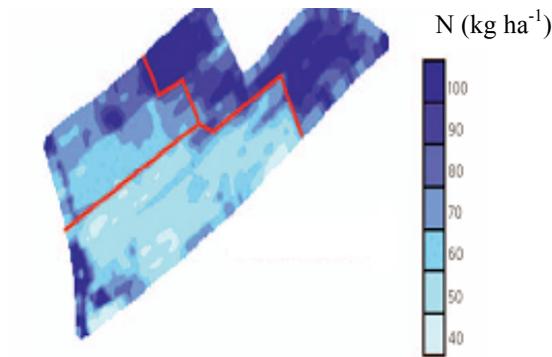


Figura 5. Mapa de necesidades de fertilización de una parcela según el medidor de clorofila N-Sensor® de Yara. Fuente: Yara (2006).

1.4. Justificación del trabajo y objetivos

La dosis necesaria de N para obtener un rendimiento máximo de trigo fue establecida en 140 kg N ha⁻¹ por la Diputación Foral de Álava tras varios años de ensayos realizados desde el año 1986. Sin embargo, en la práctica, las dosis empleadas por los agricultores eran mucho más altas, aunque se vieron disminuidas a partir de mediados de la década

de los 90 debido a una mayor sensibilización ambiental y a la subida del precio de los fertilizantes. La fertilización de N se realizaba habitualmente en dos aportes en diferentes momentos que variaban entre presiembra e inicio de ahijado el primero, y entre inicio de ahijado e inicio de encañado el segundo. Sin embargo esta estrategia de fertilización no estaba basada en un diagnóstico previo. En este sentido, la Diputación Foral de Álava comenzó a evaluar la herramienta de diagnóstico Nmin a partir del año 1995. Además, se conocían otras herramientas de diagnóstico disponibles como los medidores de clorofila que resultaban atractivas por su facilidad y rapidez de utilización.

En 1998, 9500 ha de Álava se declararon vulnerables a la contaminación por nitratos por detectarse signos de contaminación en las aguas de esta zona derivadas de las altas dosis de N empleadas en los cultivos existentes, entre los cuales el trigo es predominante. Por ello la fertilización nitrogenada en esta zona denominada “unidad hidrogeológica de Vitoria-Gasteiz, sector oriental” se limitó en el caso del trigo a 140 kg N ha^{-1} y no se permitió la fertilización a una distancia de 3 m de cualquier curso de agua. Uno de los efectos negativos de la sobrefertilización es también la contaminación atmosférica conducente al calentamiento global debido a la emisión de N_2O a partir de los suelos agrícolas. Sin embargo, estas emisiones no se habían cuantificado hasta el momento en ningún cultivo extensivo en Álava.

En cuanto a la calidad del grano de trigo, cabe destacar que a pesar de que Álava es una zona con altas producciones, éstas no se caracterizan por tener unos altos contenidos de proteína en grano, por

lo que la gran mayoría del trigo producido se destina a alimentación animal. De ahí la demanda de harinas de mayor contenido proteico que llevó a algunas cooperativas del sector a ofrecer primas de $0,06 \text{ € kg}^{-1}$ para el grano de trigo con un contenido de proteína superior al 12,5%. De cara a mejorar la calidad del grano existen estrategias de fertilización que proponen un tercer aporte de N más tardío, las cuáles no se habían ensayado hasta el momento en Álava. Estas circunstancias tanto de carácter económico como medioambiental nos llevaron a plantear como objetivo general el **desarrollo de un sistema de fertilización nitrogenada racional que posibilitara la optimización de la utilización del N en la condiciones edafoclimáticas específicas de Álava.**

Con el fin de sentar las bases para ello, en este trabajo se plantearon los siguientes **objetivos específicos:**

- 1.) Calcular una dosis de fertilizante nitrogenado económicamente óptima para Álava en el marco de la fertilización nitrogenada habitual (en dos aportes) en la que se tengan en cuenta los precios del fertilizante nitrogenado y del grano así como la bonificación que el agricultor recibe cuando los contenidos de proteína son altos.

- 2.) Estudiar el efecto del fraccionamiento de la fertilización nitrogenada en tres aportes en vez de en dos sobre el rendimiento y contenido de proteína del trigo.

3.) Evaluar la viabilidad de utilizar algunas herramientas de diagnóstico nutricional nitrogenado. Para ello se establecieron los siguientes objetivos:

3.1.) Validar el medidor de clorofila N-Tester® como herramienta de diagnóstico del estado nutricional nitrogenado del trigo.

3.2.) Estudiar la idoneidad del N-Tester como herramienta para decidir sobre la conveniencia de una tercera aplicación en una estrategia de fertilización nitrogenada ajustada a mínimos y determinar la dosis más adecuada a aplicar en ese tercer aporte.

3.3.) Evaluar la determinación del N_{min} en suelo como posible modulador de la dosis de N a aplicar.

4.) Estudiar el balance de N en el sistema suelo-planta para una mejor comprensión de la dinámica del N en el suelo y para conocer la cantidad de cada una de las entradas y salidas de N del sistema. En este sentido, se plantearon los siguientes objetivos relativos a las salidas de N del sistema:

4.1.) Cuantificar las pérdidas de N en forma de lixiviación de nitrato en función de diferentes estrategias de fertilización nitrogenada.

4.2.) Cuantificar las pérdidas de N en forma de N₂O emitido a la atmósfera estudiando la influencia de la fertilización nitrogenada, la temperatura, la humedad del suelo y el laboreo en las mismas.

4.3.) Cuantificar las extracciones de N por parte de la planta según los tratamientos de fertilización nitrogenada aplicados y determinar la eficiencia de utilización del fertilizante nitrogenado.

Efecto de la fertilización nitrogenada en el rendimiento y dosis económicamente óptimas

2.1. Introducción

La gestión de la fertilización nitrogenada afecta al rendimiento y la calidad del trigo y, a su vez, los beneficios que percibe el agricultor dependen de ambos factores. Por otro lado, el peligro de la contaminación del agua por nitratos también se ve afectada por la dosis de N aplicada. Tales consideraciones, tanto de índole económica como medioambiental, originan el diseño de estrategias de fertilización nitrogenada sensibles al estado del mercado y de la política medioambiental.

El trigo ocupa aproximadamente unas 25000 ha en Álava, lo que equivale al 52% de la superficie de los cultivos extensivos en el País Vasco (AETC, 2004). De estas 25000 ha, el 38% se encuentran en un área designada como vulnerable a los nitratos donde la fertilización nitrogenada del trigo se limita a dosis iguales o inferiores a 140 kg N ha⁻¹ dependiendo del cultivo precedente y de si la parcela en cuestión se considera fértil o no. La gestión de la fertilización nitrogenada en Álava normalmente comprende dos aportes.

En cuanto al precio del grano de trigo, el precio mínimo al que los agricultores europeos pueden vender el grano de trigo a organismos

de intervención se establece mediante la política agraria común. Por otro lado, el precio de los fertilizantes nitrogenados depende del estado del mercado mundial, con una gran influencia del precio del petróleo y el gas natural. En los últimos 10 años el coste del petróleo ha aumentado notablemente (Tamames, 2004), lo que ha propiciado la subida del precio de los fertilizantes nitrogenados. Así por ejemplo, el precio del N aumentó un 15% el año 2005 respecto al 2004.

En relación al precio al que se paga el trigo, hoy en día también existe una demanda creciente de trigo de mayor calidad en países productores de trigo del mundo tales como como U.S.A. (Lorbeer *et al.*, 2000), Nueva Zelanda (Millner *et al.*, 1994) Francia (Leygue *et al.* 2000) y España (Zarco-Hernández *et al.*, 2005). La proteína es el constituyente que más afecta la calidad del grano de trigo (Moss, 1981), y en el caso de Álava la demanda reciente de trigo de calidad se ha visto confirmada primando económicamente los contenidos de proteína superiores al 12,5%.

Por lo tanto los agricultores económicamente motivados desearán aplicar dosis de N que maximicen los beneficios económicos considerando tanto el rendimiento como la proteína en la situación de mercado en la que se encuentren. Para ello demandaran un método sensible al estado del mercado para establecer la dosis óptima (Makowski *et al.*, 1999). En la composición de tal método se comprenden los modelos de respuesta a la fertilización nitrogenada por lo que la respuesta del rendimiento al N (aplicado o disponible del suelo) se ha estudiado ampliamente mediante su ajuste a diferentes tipos de modelos. Jauregui y Paris (1984) estudiaron los modelos lineal,

cuadrático y cuadrático-meseta en praderas. En el caso del maíz Cerrato y Blackmer (1990) estudiaron los modelos exponencial, raíz cuadrada, cuadrático y cuadrático-meseta, Bullock y Bullock (1994) también estudiaron estos dos últimos modelos y Olness *et al.* (1998) investigaron los modelos cuadrático, Misterlich modificado y tanh. En trigo. Vaughan *et al.* (1990) testaron los modelos lineal, cuadrático, recíproco, logarítmico, Cate-Nelson II y III, y Makowski *et al.* (1999) estudiaron los modelos combinados con la absorción de N como una variable intermedia. A pesar de que se han sugerido muchos modelos, no hay un consenso general respecto a cual es el más adecuado.

En cuanto al contenido de proteína en grano, se han sugerido menos modelos que representen la respuesta al contenido de proteína en grano a la fertilización nitrogenada. Fowler *et al.* (1989) sugirieron la ecuación Gompertz para describir la relación entre la concentración de proteína en grano y el N disponible total y Makowski *et al.* (1999) estudiaron modelos combinados donde la absorción de N era una variable intermedia. Más recientemente, Baker *et al.* (2004) utilizaron los modelos cuadrático y lineal para describir respectivamente la respuesta del rendimiento y la proteína del trigo a la fertilización nitrogenada.

El objetivo de este capítulo fue obtener dosis óptimas de fertilizante nitrogenado en Álava dentro del marco de la gestión de fertilización nitrogenada convencional para distintas situaciones de mercado. Además, se evaluó la medida del Nmin en suelo en salida de invierno como modulador de la dosis a aplicar. Por otro lado, en base a la dosis óptima calculada se pretendía determinar el efecto económico

de la limitación del aporte nitrogenado derivada de la política de protección medioambiental.

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Establecimiento de ensayos

Se realizaron ensayos de fertilización nitrogenada en trigo blando variedad Soissons (*Triticum aestivum* L., cv. Soissons) en Álava (42°51' N, 2°41' W, 513 m altitud, 779 mm año⁻¹ pluviometría media y 11,5 °C temperatura media anual) durante cuatro campañas consecutivas, desde noviembre de 2000 a agosto de 2004. La siembra de los experimentos se realizó entre el 29 de octubre y el 22 de diciembre y la cosecha entre el 16 de julio y el 8 de agosto. Los ensayos se organizaron en bloques al azar con cuatro repeticiones en las que cada parcela elemental abarcaba un área de 50 m² (Fig. 1). Los valores de los parámetros de suelo se presentan en la Tabla 1, y se obtuvieron de la mezcla de 8 muestras de suelo tomadas antes de la siembra de cada ensayo excepto en el caso del N mineral del suelo (N_{min}) (N amoniacal más N nítrico), que se obtuvo de la mezcla de 24 muestras por experimento, ocho muestras de tres bloques por cada experimento, tomadas al final del invierno antes de la primera aplicación de fertilización nitrogenada. La medida de la densidad aparente del suelo necesaria para el cálculo de N_{min} en kg ha⁻¹, se estimó de la textura tal y como indicaron Saxton *et al.* (1986). Se aplicaron 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 90 kg ha⁻¹ de K₂O en forma de 0-14-14 en presiembra. Se aplicaron dosis de 0, 100, 140, 180 y 220 kg N ha⁻¹

en los estados fenológicos Z20 y Z30 (Zadoks *et al.*, 1974) tal y como se muestra en la Tabla 2. En 2001, se aplicó nitrosulfato amónico (26% N) en ahijado y nitrato amónico cálcico (27% N) en encañado. Para las campañas 2002 y 2003 se aplicó nitrato amónico (33,51% N) tanto en ahijado como en encañado. En 2001 se aplicó nitrosulfato amónico con el fin de evitar posibles carencias de S, pero como no se observaron indicios de tales carencias, en las siguientes campañas se reemplazó la fuente de N por nitrato amónico.

En cuanto a los precios estudiados, en los años de los experimentos (2001, 2002, 2003 y 2004) el precio de un kg de N como nitrato amónico se encontraba en torno a 0,55, 0,53, 0,51 y 0,5 € kg⁻¹ respectivamente. Al mismo tiempo, el trigo se pagó a 0,13, 0,15, 0,12 y 0,15 € kg⁻¹.



Figura 1. Disposición de los ensayos.

2.2.2. Rendimiento y contenido de N en grano

La cosecha se efectuó en una franja de 1,5 m x 10 m en cada parcela elemental. A continuación, se midió la humedad y el peso de grano recolectado para posteriormente ajustar el rendimiento a un 12% de humedad. Las muestras obtenidas durante la recolección se molieron con un molino para grano y se pasaron por un tamiz de 0,5 mm. El N total se determinó mediante el procedimiento Kjeldhal (AOAC, 1999) mediante un analizador Kjeltex Auto sampler System 1035 (Tecator). El porcentaje de proteína en grano se obtuvo multiplicando el porcentaje de N total por el coeficiente 5,7 (Teller, 1932). En el ensayo 8 no se analizó el N en grano debido a que las muestras se estropearon.

2.2.3. Ajuste de modelos

La respuesta del rendimiento del trigo blando de invierno a la fertilización nitrogenada obtenida en cada experimento se ajustó mediante el modelo lineal-meseta, cuadrático, cuadrático-meseta y raíz cuadrada mediante el procedimiento NLIN (SAS Institute, 1998). De manera similar, para modelizar la respuesta del contenido de proteína en grano a la fertilización nitrogenada se probaron los modelos lineal y cuadrático

Tabla 1. Número del experimento (Num.), localidad, cultivo precedente (Prec.), año en el que se realizó la cosecha y características químicas y texturales del suelo*.

Num.	Localidad	Prec.	Año	Profundidad (cm)	K (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	pH	Nmin (kg ha ⁻¹)	Materia orgánica (%)	Arena (g kg ⁻¹)	Arcilla (g kg ⁻¹)	Limo
1	Villanave	Cereal	2001	0-30 30-60	216 139	18,2 7,3	8,1 8,1	26 50	1,2 0,8	400 390	240 230	360 380
2	Sopotilla	Cereal	2001	0-30 30-60	176 180	11,6 2,3	8,4 8,2	13 25	1,0 0,6	410 260	240 260	350 320
3	Lantarón	Cereal	2001	0-30 30-60	187 81	21,7 6,3	8,1 8,4	20 53	1,0 0,6	470 510	280 310	250 180
4	Aranguiz	Cereal	2002	0-30 30-60	120 37	10,8 1,3	8,3 8,4	9 14	1,2 0,4	210 180	220 210	570 610
5	Aranguiz	Alubia	2002	0-30 30-60	129 21	16,3 1,3	8,2 8,5	30 24	1,4 0,4	290 390	270 150	440 460
6	Aranguiz	Cereal	2002	0-30 30-60	143 134	18,2 7,0	8,3 8,2	9 14	1,2 1,1	160 120	280 350	560 530
7	Betolaza	Cereal	2002	0-30 30-60	96 37	12,2 1,3	7,6 8,1	13 20	2,4 0,6	180 210	320 540	500 250
8	Gauna	Cereal	2003	0-30 30-60	157 122	55,5 37,8	7,7 8,0	11 9	2,2 1,8	420 450	320 290	260 260
9	Tuesta	Barbecho	2003	0-30 30-60	110 83	15,5 2,5	7,8 8,0	15 21	1,0 0,8	210 200	240 280	550 520
10	Aranguiz	Cereal	2003	0-30 30-60	131 59	22,9 9,6	8,4 8,4	10 9	1,5 0,9	160 170	260 230	580 600
11	Aranguiz	Cereal	2003	0-30 30-60	129 83	19,4 7,6	8,2 8,3	8 7	1,4 1,0	170 160	280 270	550 570
12	Gauna	Patata	2004	0-30 30-60	98 60	32,2 16,8	8,1 8,2	10 12	2,0 1,1	470 430	280 240	250 330
13	Aranguiz	Remolacha	2004	0-30 30-60	93 98	13,1 2,4	8,3 7,9	15 9	1,3 1,2	210 180	220 310	570 510
14	Tuesta	Patata	2004	0-30 30-60	137 70	46,8 18,6	7,6 7,5	19 24	1,9 0,9	460 320	290 260	250 420

* K (NH₄AcO), P (Olsen, 1965), pH (1:2.5 suelo:agua), materia orgánica (Walkey, 1935), Nmin a la salida de invierno (KCl 1 M), arena, arcilla y limo (Gee y Bauder, 1986).

Tabla 2. Dosis y momentos de aplicación de los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

Dosis (kg ha ⁻¹)	Tratamiento	Momentos de aplicación	
		Inicio de ahijado (Z20)*	Inicio de encañado (Z30)
		(kg ha ⁻¹)	
0	0	0	0
100	40+60	40	60
140	40+100	40	100
180	60+120	60	120
220	80+140	80	140

* Z20 y Z30 corresponden a la escala Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974)

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. Rendimiento

Los valores medios de rendimiento para todos los experimentos variaron de 3083 kg ha⁻¹ en el tratamiento testigo (tratamiento en el que no se aplicó fertilizante) a 6221 kg ha⁻¹ para el tratamiento 60+120 (Tabla 3). Los rendimientos medios por experimento variaron entre 1834 kg ha⁻¹ en el experimento 10 para el tratamiento testigo a 9724 kg ha⁻¹ obtenidos para el tratamiento 60+120 en el experimento 5 (Tabla 3). Este último rendimiento difiere notablemente de los rendimientos obtenidos para el mismo tratamiento en los demás experimentos, lo que se debe a que el cultivo precedente fuese alubia, una leguminosa.

Los modelos probados para modelizar la respuesta del rendimiento a la fertilización nitrogenada fueron el lineal-meseta, el cuadrático meseta, el

cuadrático y el raíz cuadrada. El modelo lineal-meseta se descartó por la imposibilidad de convergencia de las dos funciones implicadas en el modelo. En general, la diferencia entre los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en los tres modelos (i.e. cuadrático-meseta, cuadrático y raíz cuadrada) era escasa (Tabla 4). De hecho, los tres modelos explicaron una gran proporción de la variabilidad según lo indicado por el coeficiente de determinación (R^2) que era mayor de 0,70 en todos los casos excepto en el experimento 5, donde el cultivo precedente fue alubia. Sin embargo, la variación en el cálculo de la dosis para la fertilización máxima difirió mucho según el modelo, ratificando que para la selección de un modelo de respuesta del rendimiento a la fertilización nitrogenada, el coeficiente de determinación es un criterio pobre tal y como Cerrato y Blackmer (1990) y Bélanger *et al.* (2000) indicaron.

Mientras que el modelo cuadrático calculó dosis de N para la producción máxima (Nagr) mayores de 300 kg ha⁻¹ en un experimento y el modelo cuadrático-meseta en dos, el modelo raíz cuadrada lo hizo en seis ocasiones (Tabla 4). En los experimentos 5 y 11, la dosis de N obtenida a través del modelo de la raíz cuadrada correspondió a la producción mínima en vez de a la máxima por la ecuación específica del modelo en este experimento. Mediante el método de balance, Laurent (2000) estableció que la dosis de N necesaria era de entre 200 y 220 kg ha⁻¹ cuando el objetivo de rendimiento de trigo Soissons era de entre 7000 a 8600 kg ha⁻¹ para parcelas localizadas en Francia. Bodson *et al.* (2004) establecieron 185 kg N ha⁻¹ como la dosis de referencia para la fertilización del trigo de invierno en Bélgica cuando se aplicaba en dos aportes. En la vecina comunidad autónoma de Navarra, en un área similar a Álava respecto al rendimiento, se

recomendaron dosis de N de 160 a 230 kg ha⁻¹ tras 15 años de experimentación en aproximadamente 2000 experimentos (ITGA, 2005). Este rango de dosis de N aproximadamente concuerda con las dosis aplicadas históricamente en Álava y se comprende entre las dosis estudiadas en este trabajo.

Varios autores indican que los modelos raíz cuadrada y cuadrático sobrestiman las dosis de fertilización nitrogenada (Anderson y Nelson, 1975; Jauregui y París, 1984; Cerrato y Blackmer, 1990; Bullock y Bullock 1994). De hecho, los modelos raíz cuadrada y cuadrático siempre recomendaron dosis de N similares o mayores que las recomendadas por el modelo cuadrático meseta (Tabla 4). Por lo tanto, tal como hicieron Cerrato y Blackmer (1990) para el maíz, se eligió el modelo cuadrático meseta para la modelización de la respuesta del rendimiento del trigo a la fertilización nitrogenada. Así, la Eq. 1 expresa la respuesta general del rendimiento a la fertilización de la que, por causas que se explican más adelante, se excluyó el experimento 5.

$$\begin{aligned}
 Rd &= -0,096 N^2 + 34,95 N + 2711 && \text{si } N \leq 182 \\
 Rd &= 5892 && \text{si } N \geq 182 && [1] \\
 R^2 &= 0,64***
 \end{aligned}$$

Donde, Rd: Rendimiento (kg ha⁻¹), N: Dosis de N (kg ha⁻¹) y R²: coeficiente de determinación. El coeficiente de determinación muestra el grado de ajuste, ***significativo al 0,1%.

Según la Eq. 1 el rendimiento máximo (5892 kg ha⁻¹) se obtiene con una dosis de N de 182 kg ha⁻¹. En la Fig. 2 se muestra la respuesta del

rendimiento a la fertilización nitrogenada y la correspondiente ecuación cuadrático-meseta (Eq. 1).

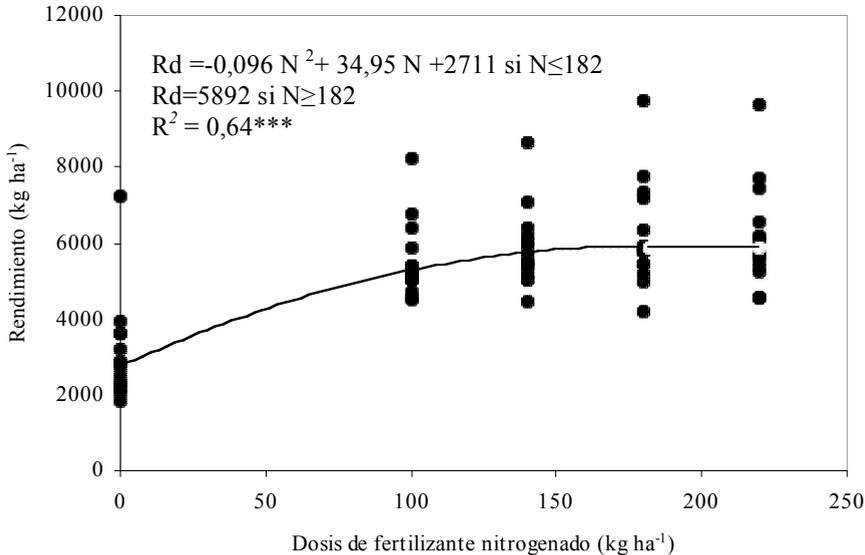


Figura 2. Respuesta del rendimiento a la fertilización nitrogenada en todos los experimentos con la correspondiente ecuación cuadrático meseta y coeficiente de determinación de la misma (exceptuando el experimento 5).

En el caso del experimento 5, tal y como expresa un menor coeficiente de determinación, su rendimiento no se amoldó al modelo cuadrático-meseta tanto como el resto de los experimentos (Tabla 4). Esto se debió a que el precedente alubia atenuó la respuesta del rendimiento a la aplicación de N. Por lo tanto, este experimento no fue incluido en la ecuación global Eq. 1. Esta exclusión se justifica por la diferente respuesta del rendimiento a la fertilización nitrogenada cuando el cultivo precedente es una leguminosa tal y como observaron López-Bellido *et al.* (1996) y López-Bellido y López-Bellido (2001). Además, las limitaciones de la zona vulnerable también se refieren a este hecho y son más restrictivas en cuanto

2. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

a la dosis de fertilización nitrogenada cuando el precedente es una leguminosa. No se encontró ninguna relación clara entre estos factores y N_{agr} obtenido según el modelo cuadrático-meseta. En el caso del N_{min} esto fue presumiblemente debido a que el rango de valores de N mineral en los ensayos en los primeros 60 cm, de 15 a 76 kg ha⁻¹, no resultaba lo suficientemente amplio para la identificación de rangos de dosis óptimas según el N_{min} (Fig. 3). Por otro lado, el valor de N_{min} de 60 kg N ha⁻¹ en la capa de 0-60 cm del suelo solo se superó en dos de catorce experimentos, por lo que, según el ITCF (2002) en doce de catorce experimentos el N_{min} en salida de invierno no era suficiente para reducir la dosis de N a aportar en función de éste.

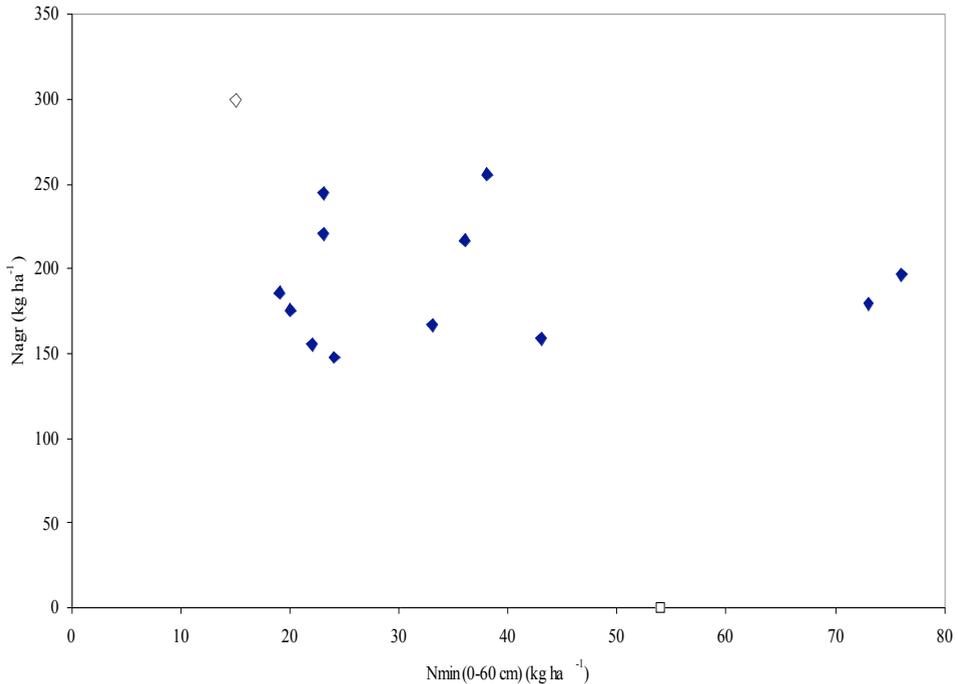


Figura 3. Dosis de fertilizante nitrogenado necesaria para la obtención del máximo rendimiento (N_{agr}) según el modelo cuadrático en relación al N_{min} observado en los primeros 60 cm de la capa del suelo de cada ensayo. Los puntos redondo y cuadrado blancos se refieren a los ensayos 11 y 5 respectivamente donde N_{agr} es mayor que 300 y menor que 0 kg N ha^{-1} correspondientemente.

Los beneficios obtenidos por el agricultor basándose en el coste del fertilizante nitrogenado y en los beneficios obtenidos del rendimiento del trigo y de la proteína, en caso que se pague, se calcularon mediante la Eq. 2. Esta ecuación comprende la práctica más reciente utilizada para remunerar la proteína en la zona, que consiste en pagar una cantidad extra por la cantidad de trigo que cuente con un contenido en proteína igual o superior al mínimo requerido. La Eq. 2 no contempla otros costes tales como el precio de la semilla, tratamientos herbicidas, maquinaria, etc.

$$\text{Ben}_Y = t \text{ Rd} - f \text{ N} + P \text{ g Rd} \quad [2]$$

Donde, Ben_Y : beneficio del agricultor obtenido del rendimiento del trigo (€ ha^{-1}), t : precio del trigo (€ kg^{-1}), f : Precio del fertilizante (€ kg^{-1}), P : término binario para proteína; $P=0$ si el contenido en proteína es inferior al mínimo requerido, $P=1$ si el contenido en proteína \geq mínimo requerido, g : prima sobre proteína (€ kg^{-1}).

Sustituyendo el término Rd por la Eq. 1 en la Eq. 2 y se obtiene la Eq. 3:

$$\text{Ben}_Y = t (-0,096 \text{ N}^2 + 34,95 \text{ N} + 2711) - f \text{ N} + P \text{ g} (-0,096 \text{ N}^2 + 34,95 \text{ N} + 2711) \quad \text{si } \text{N} \leq 182$$

$$\text{Ben}_Y = t 5892 - f \text{ N} + P \text{ g} 5892 \quad \text{si } \text{N} \geq 182 \quad [3]$$

Cuando la proteína no se prima y $P=0$, la Eq. 3 se deriva e iguala a cero para obtener dosis de N iguales o inferiores a 182 kg ha^{-1} con las que se obtendrán los máximos beneficios dependiendo de los precios del trigo y del fertilizante nitrogenado del momento (Eq. 4). Según el modelo cuadrático meseta, las dosis de N mayores que 182 kg ha^{-1} no generan rendimientos mayores y por lo tanto no se estudian.

$$\text{N} = (t 34.95 - f)/(0.19 t) \quad \text{si } \text{N} \leq 182 \quad [4]$$

Tabla 3. Rendimiento medio (kg ha^{-1}) por tratamiento y experimento (Exp.) y rendimiento medio total (kg ha^{-1}) para todos los experimentos en conjunto La correspondiente desviación estándar se indica entre paréntesis.

Exp.	Tratamiento				
	0	40+60	40+100 (kg ha^{-1})	60+120	80+140
1	3222 (359)	5417 (216)	6012 (267)	5922 (423)	6161 (472)
2	2531 (152)	4722 (202)	5524 (424)	5758 (596)	6084 (324)
3	2311 (869)	5168 (735)	5519 (723)	5453 (437)	5640 (296)
4	2059 (472)	5022 (308)	5389 (904)	5787 (667)	6114 (553)
5	7234 (875)	8202 (903)	8643 (1129)	9724 (454)	9635 (137)
6	2849 (845)	6387 (389)	6372 (251)	7740 (685)	7695 (714)
7	2184 (210)	4487 (584)	4472 (521)	4218 (386)	4562 (564)
8	2161 (473)	5177 (343)	5403 (143)	5806 (190)	5500 (220)
9	3941 (145)	5037 (497)	5056 (578)	5191 (100)	5364 (360)
10	1834 (157)	4546 (253)	5189 (371)	5424 (188)	5220 (337)
11	3592 (397)	5401 (555)	6166 (531)	7340 (757)	7426 (1172)
12	2886 (537)	6782 (410)	7059 (305)	7174 (788)	6528 (692)
13	2284 (1056)	5032 (888)	5036 (396)	4959 (345)	4580 (671)
14	3595 (285)	5854 (519)	5921 (819)	6340 (645)	5686 (740)
Total	3083 (1430)	5526 (1094)	5854 (1134)	6221 (1437)	6171 (1415)

2. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

Tabla 4. Dosis de N necesaria para la obtención del rendimiento máximo (Nagr), R² y la significación del modelo para cada experimento (Exp.).

Exp.	Cuadrático meseta		Cuadrático		Raíz cuadrada	
	Nagr	R ²	Nagr	R ²	Nagr	R ²
	(kg ha ⁻¹)		(kg ha ⁻¹)		(kg ha ⁻¹)	
1	182	0.92***	197	0.92***	‡	0.91***
2	256	0.94***	256	0.94***	‡	0.93***
3	152	0.83**	180	0.83***	240	0.83***
4	221	0.88***	221	0.88***	‡	0.88***
5	‡	0.61**	†	0.61**	§	0.62**
6	245	0.89***	245	0.89***	‡	0.89***
7	97	0.82***	167	0.78***	157	0.81***
8	162	0.96***	176	0.96***	230	0.96***
9	214	0.70**	217	0.70**	‡	0.71**
10	184	0.97***	186	0.97***	‡	0.96***
11	‡	0.82***	‡	0.82***	§	0.81***
12	123	0.90***	156	0.91***	136	0.91***
13	92	0.72***	148	0.73***	113	0.74***
14	130	0.72***	159	0.74***	148	0.73***

*** y ** : significativo al nivel 0.1% y 1% de probabilidad respectivamente.
† dosis < 0 kg ha⁻¹, ‡ dosis ≥ 300 kg ha⁻¹, § mínimo

Los valores de N calculados mediante la Eq. 4 para diferentes precios de trigo y fertilizante nitrogenado que respectivamente varían entre 0,45 y 0,65 € kg⁻¹ y entre 0,1 y 0,15 € kg⁻¹ se muestran en la Tabla 5. Las dosis de N variaron entre 150 kg ha⁻¹ en el extremo en los que los precios del trigo y el N fueran respectivamente el mínimo (0,1 € kg⁻¹) y el máximo (0,65 € kg⁻¹) de entre los estudiados hasta 168 kg ha⁻¹ en la situación contraria, es decir, cuando el precio del trigo fuera de 0,15 € kg⁻¹ y el del N 0,45 € kg⁻¹. Estas dos situaciones opuestas distan, por tanto, 18 kg ha⁻¹ entre sí y en ambas se obtienen dosis económicamente óptimas inferiores a la dosis para la obtención del rendimiento máximo diagnosticada por el modelo cuadrático-meseta que era de 182 kg ha⁻¹. En la misma tabla se observa que un incremento de 0,05 € kg⁻¹ en el coste del fertilizante genera una reducción de 2-3 kg ha⁻¹ en la dosis de N económicamente óptima en cuanto al rendimiento (Nec).

Los beneficios obtenidos cuando se aplicaron las Nec indicadas en la Tabla 5 variaban de 482 € ha⁻¹ a 805 € ha⁻¹ respectivamente en las situaciones en las que el precio del trigo era mínimo y el del N máximo y al contrario (Tabla 5). Por ejemplo, el año 2004, cuando el precio del trigo y el N eran de 0,15 € kg⁻¹ y 0,55 € kg⁻¹ respectivamente, la Nec hubiese sido 165 kg ha⁻¹ según la Eq. 4. Teniendo en cuenta que en este cálculo no se consideraba el pago de la proteína, los beneficios obtenidos hubiesen sumado 789 € ha⁻¹. La aplicación de 220 kg ha⁻¹, una dosis habitual en la zona, hubiese generado 763 € ha⁻¹ en el año 2004, 26 € ha⁻¹ menos que los obtenidos con la Nec en esas circunstancias.

2. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

Tabla 5. Beneficios máximos (Ben_Y) (€ ha^{-1}) y dosis de N (kg ha^{-1}) para la obtención de beneficios máximos dependiendo del precio del trigo (t) y del N (€ kg^{-1}).

t (€ kg^{-1})	Precio del fertilizante (€ kg^{-1})									
	0,45		0,5		0,55		0,6		0,65	
	Dosis kg ha^{-1}	Ben_Y € ha^{-1}	Dosis kg ha^{-1}	Ben_Y € ha^{-1}	Dosis kg ha^{-1}	Ben_Y € ha^{-1}	Dosis kg ha^{-1}	Ben_Y € ha^{-1}	Dosis kg ha^{-1}	Ben_Y € ha^{-1}
0,10	160	513	158	505	155	497	152	489	150	482
0,11	162	571	160	563	158	555	155	547	153	540
0,12	164	629	162	621	160	613	158	606	155	598
0,13	166	688	164	680	162	672	160	664	158	656
0,14	167	747	165	738	163	730	161	722	160	714
0,15	168	805	166	797	165	789	163	781	161	773

2.3.2. Contenido de N

Los valores medios de proteína por tratamiento para todos los experimentos en conjunto variaron entre 9,7% para el tratamiento testigo hasta 13,6% para el tratamiento 80+140 (Tabla 6). Los valores medios de proteína por tratamiento de fertilización nitrogenada y experimento variaron entre 7,56% en el experimento 12 para el tratamiento testigo y 16,53% obtenida para 80+140 en el experimento 9 (Tabla 6).

Al estudiar los modelos cuadrático y lineal para modelizar la respuesta del contenido de proteína en grano a la fertilización nitrogenada se observó que la R^2 era mayor en los experimentos 2, 4, 5, 7, 10, 12 y 13 para el modelo cuadrático y similar para el resto de los tratamientos (Tabla 7). En los años 2002, 2003 y 2004 se pagaron primas en Álava por contenidos de proteína en grano $\geq 12,5\%$. En algunos experimentos la dosis de N necesaria para obtener tal porcentaje de proteína (N_{pr}) difería mucho según el modelo

que se seleccionase, tal y como se observa en los experimentos 2, 4 y 5 (Tabla 7) Fowler *et al.* (1994) describían una fase inicial plana en la curva de respuesta de la concentración de la proteína en grano a las dosis de N total disponible que concuerda mejor con el modelo cuadrático que con el lineal en el rango de dosis de N estudiadas. Fowler *et al.* (1994) ajustaban el valor inicial de la curva al contenido proteínico mínimo para cada especie que en el caso del trigo era $9.8 \pm 0,14$ (media \pm error estándar), y que se ajusta a la Eq. 5 obtenida según el modelo cuadrático cuando $N=0$ para los experimentos realizados en Álava.

Por lo tanto se adoptó el modelo cuadrático para la modelización de la respuesta de la proteína en grano respecto a la fertilización nitrogenada (Fig. 2) y la ecuación resultante de la agrupación de los resultados obtenidos en todos los experimentos fue la Eq. 5 (Fig. 4):

$$\text{Pr} = 4,0 \cdot 10^{-5} N^2 + 0,0095 N + 9,77 \quad [5]$$

$$R^2 = 0,44***$$

Donde Pr es el contenido de proteína en grano (%) y R^2 indica el grado de ajuste, ***significativo a 0,1%.

2. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

Tabla 6. Contenido de proteína medio (%) por tratamiento y experimento (Exp.) y contenido de proteína medio total (%) por tratamiento para todos los experimentos en conjunto. La correspondiente desviación estándar se indica entre paréntesis.

Exp	Tratamiento				
	0	40+60	40+100 (%)	60+120	80+140
1	10,5 (0,61)	11,0 (1,26)	11,6 (0,66)	12,2 (1,27)	12,1 (1,87)
2	10,2 (0,85)	10,2 (0,3)	11,5 (0,52)	10,9 (0,88)	11,8 (0,12)
3	8,8 (0,66)	10,9 (1,15)	11,3 (0,40)	13,1 (1,05)	13,0 (1,54)
4	9,3 (0,03)	9,8 (0,67)	9,7 (0,14)	9,6 (0,05)	11,2 (0,11)
5	11,3 (0,46)	12,8 (0,44)	13,3 (0,34)	13,1 (0,34)	12,9 (0,17)
6	9,4 (0,34)	10,4 (0,19)	12,2 (0,76)	13,1 (0,71)	13,4 (0,68)
7	7,9 (0,63)	10,2 (0,77)	11,1 (0,45)	11,1 (0,80)	14,6 (1,40)
9	12,0 (0,33)	14,2 (0,47)	14,0 (0,46)	15,8 (0,25)	16,5 (0,28)
10	10,4 (0,13)	11,6 (0,66)	13,5 (0,25)	13,9 (0,91)	15,0 (0,19)
11	10,4 (0,25)	11,6 (0,58)	13,2 (0,78)	13,9 (1,05)	13,9 (0,22)
12	7,6 (0,08)	8,2 (0,28)	9,6 (1,20)	12,2 (1,70)	14,6 (1,49)
13	9,6 (0,41)	9,8 (0,34)	11,4 (0,40)	12,5 (0,23)	13,8 (0,91)
14	9,2 (0,44)	11,2 (1,92)	11,8 (0,81)	14,2 (1,51)	14,1 (0,79)
Total	9,7 (1,25)	10,9 (1,49)	11,8 (1,35)	12,7 (1,6)	13,6 (1,45)

Tabla 7. Dosis de N diagnosticadas por los modelos cuadrático y lineal para la obtención de contenidos de proteína en trigo del 12,5% (Npr), R² y la significación del modelo en cada experimento.

Exp.	Cuadrático		Lineal	
	Npr (kg ha ⁻¹)	R ²	Npr (kg ha ⁻¹)	R ²
1	245	0,27 ns	253	0,27*
2	280	0,45*	348	0,43**
3	181	0,74***	182	0,74***
4	298	0,56*	534	0,43*
5	67	0,83***	108	0,60***
6	172	0,85***	169	0,85***
7	186	0,79***	185	0,75***
9	30	0,91***	30	0,91***
10	120	0,90***	110	0,89***
11	121	0,80***	121	0,80***
12	190	0,88***	194	0,72***
13	185	0,92***	183	0,79***
14	149	0,73***	145	0,73***
Todos	171	0,45***	166	0,44***

***, ** y * significativo al nivel 0,1%, 1% y 5% respectivamente.
ns=no significativo.

Según la Eq. 5, se necesitan 176 kg ha⁻¹ para obtener contenidos de N en grano $\geq 12,5\%$. Por lo tanto, la dosis necesaria para la obtención de contenidos de proteína iguales o mayores que 12,5% es menor que la dosis necesaria para la obtención del rendimiento máximo, (182 kg ha⁻¹ según la Eq. 1), pero mayor que la dosis económicamente óptima, 150-168 kg ha⁻¹, en el rango de precios estudiado para los casos en los que no se consideraba el pago de la proteína (Tabla 5). De todas formas y según la Eq. 5 la fertilización nitrogenada sólo explicaba el 45% de la variabilidad del contenido de proteína en grano.

2. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

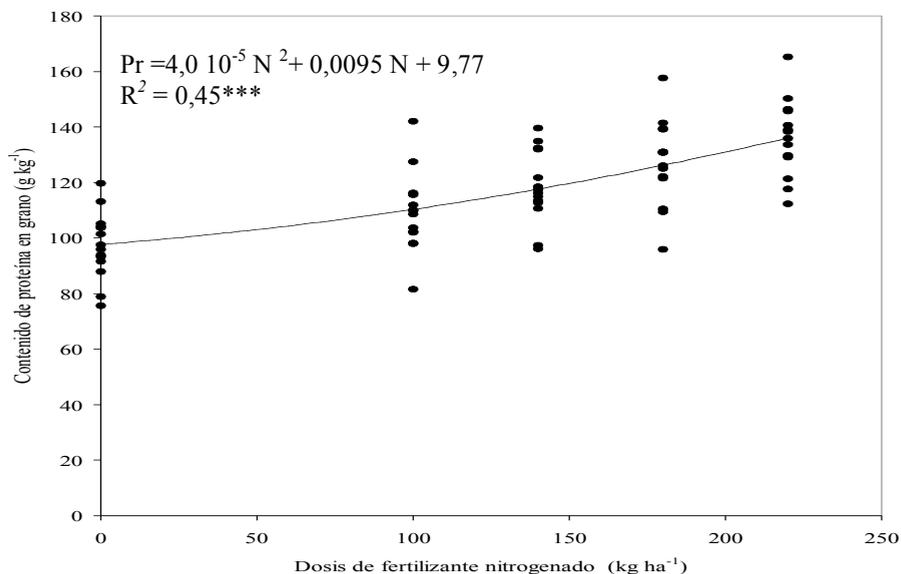


Figura 4. Respuesta de la proteína a la fertilización nitrogenada en todos los experimentos y, la correspondiente ecuación cuadrática y coeficiente de determinación de la misma.

Mientras que, entre los tratamientos 60+120 y 80+140, se consiguieron contenidos de proteína superiores a 12,5% en casi todos los experimentos desarrollados durante los años 2003 y 2004 (los experimentos del 9 al 14), en los experimentos desarrollados durante los años 2001 y 2002 (experimentos del 1 al 7) y en los mismos tratamientos, sólo se obtuvieron tales contenidos de proteína en 4 de 7 casos. En Álava la antesis del trigo acaece a mediados de mayo. La temperatura en junio y julio tanto de 2001 como de 2002 fue de 23°C mientras que en los años 2003 y 2004 ésta fue de 26 y 27°C respectivamente. Probablemente las temperaturas más altas en post-anthesis causaron una disminución del almidón del grano y consecuentemente una disminución del rendimiento así como un aumento

en el porcentaje de proteína en el grano tal y como describieron Gate (1995) y Triboi y Triboi-Blondel (2002). De hecho, para el tratamiento 80+140, en los experimentos en los que se obtuvo mayores porcentajes de proteína (experimentos 7, 9 y 10) (Tabla 6) también se obtuvieron varios de los menores rendimientos (Tabla 3). Por lo tanto dentro de la gestión de la fertilización nitrogenada convencional, es decir, repartida en dos aportes, el aspirar a contenidos en proteína en grano que sean susceptibles de ser pagados ($\geq 12,5\%$ en los últimos años) implica cantidades superiores de fertilizante nitrogenado en comparación con Nec (176 kg ha^{-1} vs $150-168 \text{ kg ha}^{-1}$) así como ciertas condiciones edafoclimáticas entre las que probablemente se encuentre un periodo de post-anthesis caluroso. La rentabilidad de incrementar la dosis de N en una cantidad necesaria para obtener valores de proteína susceptibles de ser pagados (ΔN), se calculó mediante la comparación de los beneficios así obtenidos (Ben_p) respecto a los beneficios obtenidos de aplicar Nec, (Ben_y), que producía granos con contenidos de proteína inferiores al solicitado por los compradores (Eqs. 6-8):

$$\text{Ben}_y = t \text{ Rd} - f \text{ N} \quad [6]$$

$$\text{Ben}_p = t (\text{Rd} + \Delta \text{Rd}) - f (\text{N} + \Delta \text{N}) + g (\text{Rd} + \Delta \text{Rd}) \quad [7]$$

Donde ΔRd es el incremento en el rendimiento obtenido cuando se incrementa la fertilización nitrogenada en una cantidad ΔN (kg ha^{-1}). De acuerdo con el modelo cuadrático meseta del rendimiento, si $\text{N} + \Delta \text{N} \geq 182$, $\Delta \text{Rd} = 5892 - \text{Rd}$.

Para la obtención de beneficios máximos en base al rendimiento, se calculó una dosis de fertilización económicamente óptima en función del

precio del nitrógeno y del grano y basada en el rendimiento tal y como se refleja en la Eq. 4. A continuación, se estudió la rentabilidad del incremento de la dosis a N_{pr} según la Eq. 8:

$$\begin{aligned} Ben_p - Ben_Y &= t \Delta R_d - f \Delta N + g (R_d + \Delta R_d) & \text{si } N + \Delta N \leq 182 \\ Ben_p - Ben_Y &= t (5892 - R_d) - f \Delta N + g 5892 & \text{si } N + \Delta N \geq 182 \end{aligned} \quad [8]$$

Los incrementos de aplicación de N requeridos para la obtención de contenidos de proteína de 12,5% sobre las dosis indicadas en la Tabla 5 variaban de 8 a 26 kg N ha⁻¹ (Tabla 8). Aplicándolos, se obtenían los beneficios extra mostrados en la Tabla 8 sobre los beneficios que se mostraban en la Tabla 5 para los casos en los que los contenidos de proteína en grano mayores que 12,5% se primasen con 0,006 y 0,012 € kg⁻¹ respectivamente. Los beneficios extra variaron de 28 a 34 € kg⁻¹ extra cuando la proteína se primaba con 0,006 € kg⁻¹ y de 63 a 69 € kg⁻¹ cuando la prima era de 0,012 € kg⁻¹ (Tabla 8).

El año 2004, por ejemplo, cuando el precio del trigo y del N en forma de nitrato amónico eran 0,15 € kg⁻¹ y 0,55 € kg⁻¹ respectivamente, la N_{ec} era de 165 kg ha⁻¹ según la Eq. 4. Los beneficios correspondientes en base al rendimiento sumaban 789 € ha⁻¹ (Eq. 2). La obtención de contenidos de proteína en grano del 12,5% requeriría la aplicación de una dosis de 176 kg ha⁻¹ según la Eq. 5, 11 kg ha⁻¹ más que la dosis anteriormente citada. Dado que el año 2004 el grano con contenidos de proteína $\geq 12,5\%$ se primaban con 0,006 € kg⁻¹ extra, una dosis de 176 kg ha⁻¹ supondría 822 kg ha⁻¹ en beneficios, 33 € ha⁻¹ extra sobre los obtenidos mediante la aplicación de la N_{ec} (Tabla 8). Es decir, en las condiciones

actuales ($g = 0,006 \text{ € kg}^{-1}$ y la aplicación del fertilizante nitrogenado en dos aportes) la consecución de grano con contenidos de proteína primables exige la aplicación de dosis de N superiores a Nec.

2.3.3. Zonas vulnerables a la contaminación por nitratos (ZVN)

En el País Vasco la zona vulnerable a la contaminación por nitratos abarca unas 9500 ha, estando el 71% de esta área ocupado por cultivos extensivos. Los agricultores que cultiven trigo en las ZVN no pueden, entre otras limitaciones, aplicar más de 140 kg ha^{-1} en suelos pobres ni más de 125 kg ha^{-1} en suelos considerados fértiles cuyos cultivos precedentes sean diferentes a una leguminosa. Las dosis de N permitidas en la ZVN son inferiores a Nec (Tabla 5) según el modelo cuadrático-meseta, lo que causaría una reducción de los beneficios respecto a los que se obtendrían con la aplicación de Nec.

2. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

Tabla 8. Incremento de la dosis de N sobre las dosis estipuladas en la Tabla 5 para la obtención de contenidos de proteína $\geq 12,5\%$ susceptibles de ser pagados. Beneficios extra sobre los citados en la Tabla 4 cuando el contenido de proteína $\geq 12,5\%$ se paga a 0,006 € kg^{-1} (Ben1) y 0,012 € kg^{-1} (Ben2) respectivamente.

t (€ kg^{-1})	Precio del fertilizante (€ kg^{-1})														
	0,45			0,5			0,55			0,6			0,65		
	Dosis kg	Ben1 € ha ⁻¹	Ben2 € ha ⁻¹	Dosis kg	Ben1 € ha ⁻¹	Ben2 € ha ⁻¹	Dosis kg	Ben1 € ha ⁻¹	Ben2 € ha ⁻¹	Dosis kg	Ben1 € ha ⁻¹	Ben2 € ha ⁻¹	Dosis kg	Ben1 € ha ⁻¹	Ben2 € ha ⁻¹
0,10	16	32	68	18	32	67	21	30	66	24	29	65	26	28	63
0,11	14	33	68	16	32	67	18	31	66	21	30	65	23	29	64
0,12	12	33	69	14	33	68	16	32	67	18	31	66	21	30	65
0,13	10	34	69	12	33	68	14	32	68	16	31	67	18	30	66
0,14	9	34	69	11	33	69	13	33	68	15	32	67	16	31	66
0,15	8	34	69	10	34	69	11	33	68	13	32	68	15	31	67

Además se estudió la disminución de los beneficios derivada de la aplicación de las dosis permitidas en las ZVN respecto a los beneficios obtenidos si se hubiese aplicado la dosis Npr y por lo tanto éstos hubiesen comprendido el pago de la proteína. Cuando no se consideraba el pago de la proteína y se aplicaban 125 kg ha^{-1} en vez de Nec, las pérdidas de beneficios variaron de 5 a 25 € ha^{-1} , descendiendo a un rango de 1 a 10 € ha^{-1} cuando la dosis de N aplicada era de 140 kg ha^{-1} (Tabla 9).

Tabla 9. Pérdidas en beneficios basados en el rendimiento (€ ha^{-1}) derivadas de la aplicación de las dosis de fertilización nitrogenada máxima y mínima permitidas en ZVN, 125 y 140 kg ha^{-1} respectivamente, en vez de las dosis estipuladas en la Tabla 5.

Dosis de N (kg ha^{-1})	Precio del trigo (€ kg^{-1})	Precio de N (€ kg^{-1})				
		0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
		Pérdida (€ ha^{-1})				
125	0,1	11	9	8	6	5
	0,11	13	12	10	9	7
	0,12	16	14	13	11	10
	0,13	19	17	15	14	12
	0,14	22	20	18	16	14
	0,15	25	23	21	19	17
140	0,1	3	2	2	1	1
	0,11	5	4	3	2	1
	0,12	6	5	4	3	2
	0,13	7	6	5	4	3
	0,14	9	7	6	5	4
	0,15	10	9	8	6	5

2.4. Conclusiones

- 1.) La dosis de fertilizante nitrogenado determinada por el modelo cuadrático-meseta para obtener el rendimiento máximo en Álava, 5892 kg ha⁻¹, fue de 182 kg ha⁻¹.
- 2.) No se encontró ninguna relación clara entre el cultivo precedente y el N_{min} en salida de invierno y la dosis de fertilizante necesaria para el máximo rendimiento obtenida según el modelo cuadrático-meseta. Por otro lado, los valores de N_{min} fueron, en general menores que 60 kg N ha⁻¹, por lo que se concluyó que en Álava no es necesario corregir la dosis a aportar según la cantidad de N_{min} en suelo en salida de invierno.
- 3.) Cuando la proteína no se remuneraba, las dosis económicamente óptimas de N variaron entre 168 kg ha⁻¹ cuando el precio del trigo era 0,15 € kg⁻¹ y del fertilizante 0,45 € kg⁻¹ a 150 € kg⁻¹ cuando el precio del trigo y del fertilizante eran de 0,1 y 0,65 € kg⁻¹ respectivamente. Los beneficios obtenidos cuando se aplicaron las dosis mencionadas fueron de entre 482 € ha⁻¹ y 805 € ha⁻¹.
- 4.) Un incremento en el precio del fertilizante de 0,05 € kg⁻¹ supuso una disminución de la dosis económicamente óptima de fertilización de 2 a 3 kg N ha⁻¹ y una reducción de 7 a 9 € ha⁻¹ de los beneficios.
- 5.) La dosis de N diagnosticada por el modelo cuadrático para obtener un contenido de proteína en grano del 12,5% era de 176 kg ha⁻¹.

6.) Se sugirió que, para de trigo blando de invierno cuyo precedente no fuese leguminosa, se calculase inicialmente la dosis de N económicamente óptima en relación al rendimiento y a continuación se estudiase la rentabilidad de incrementar esta dosis de N a 176 kg ha^{-1} , dosis necesaria para la obtención de un contenido de 12,5% de proteína en grano por el que en los últimos años se ha ofrecido una prima de $0,006 \text{ € kg}^{-1}$. En estas condiciones, los máximos beneficios extra que el agricultor podrá haber obtenido suman 34 € ha^{-1} .

7.) En las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos (ZVN), la pérdida de beneficios debido a la aplicación de dosis de N permitidas en estas zonas variaban entre 5 y 25 € ha^{-1} para suelos clasificados como ricos y entre 1 y 10 € ha^{-1} para suelos clasificados como pobres en comparación con los beneficios obtenidos por los productores de trigo fuera de las ZVN cuando aplicasen la dosis de N económicamente óptima en relación al rendimiento. Por otro lado, las pérdidas en beneficios en comparación a aquellas obtenidas cuando se aplicaran dosis con el objetivo de obtener contenido en proteína en el grano $\geq 12,5\%$, variaban entre 29 y 59 € ha^{-1} .

Uso del N-Tester[®]: evaluación del estado nutricional nitrogenado y predicción del rendimiento.

3.1. Introducción

La concordancia entre las necesidades de nitrógeno (N) del trigo blando de invierno y la fertilización nitrogenada es esencial para alcanzar altos rendimientos del cultivo y reducir las pérdidas de N al medio ambiente. Por ello, surge la necesidad de una herramienta que se pueda emplear para el diagnóstico del estado nutricional del trigo. El análisis de tejido deshidratado normalmente empleado para el diagnóstico requiere tiempo y es destructivo, por lo que los medidores de clorofila, que son instantáneos y no destruyen la muestra, son una alternativa que está ganando en aceptación. N-Tester[®] está basado en el medidor de clorofila SPAD 502, diseñado y producido por Minolta Corp. (Japan). Yara Internacional adaptó este aparato a usos agronómicos y desarrolló recomendaciones de fertilización basándose en las lecturas del aparato Neukirchen y Lammel, 2002). El aparato mide la transmitancia de luz de la hoja en el rojo (650 nm, alrededor de la absorción máxima de la clorofila) y el rojo cercano (NIR, 960 nm). Mediante la medición simultánea de ambas longitudes de onda se puede corregir la lectura respecto a las diferencias del grosor de la hoja. Así el N-Tester calcula un valor numérico y adimensional que es proporcional a la cantidad de clorofila presente en la hoja (Neukirchen y Lammel, 2002).

Se ha probado que las lecturas de los medidores de clorofila se correlacionan bien con la concentración de clorofila en hoja y/o la concentración de N en muchos cereales tales como cebada (*Hordeum vulgare L.*) (Wienhold y Krupinsky, 1999), maíz (*Zea mays L.*) (Schepers *et al.*, 1992), arroz (*Oryza sativa L.*) (Peng *et al.*, 1993) y trigo (*Triticum aestivum L.*) (Follett y Follett, 1992; Peltonen *et al.*, 1995). La correlación entre los valores del medidor de clorofila y el contenido de N en la parte aérea de la planta se ha estudiado menos, pero según varios autores también existe y es positiva (Vaughan *et al.*, 1990; Fox *et al.*, 1994; López-Bellido *et al.*, 2004). La elección de la concentración de N de la parte aérea de la planta facilita el muestreo y evita los problemas descritos por varios autores (Duru, 2002; Hoel, 1998) relativos a la selección de la parte de la planta que representa mejor el estado nutricional nitrogenado de la misma.

La utilidad básica del N-Tester es el proporcionar información sobre el estado nutricional nitrogenado de la planta para su aplicación en la fertilización nitrogenada. Sin embargo, y dado que el estado nutricional nitrogenado del trigo a lo largo de su desarrollo tiene un efecto claro sobre la producción, muchos autores (Follett y Follett, 1992; Fox *et al.*, 1994; López-Bellido *et al.*, 2004) han estudiado la relación entre las lecturas de los medidores de clorofila en diferentes estadios y el rendimiento. Follett y Follett (1992) describieron que la relación entre las lecturas del medidor de clorofila y bien la concentración de N en hoja o la del rendimiento en diferentes localizaciones era escasa, lo que condujo a la conclusión que era necesario investigar los efectos de localidad, humedad del suelo, prácticas de cultivo y diferencias entre cultivos. De ahí la importancia de realizar el estudio en zonas edafoclimáticas diversas. También propusieron la

normalización de los datos usando una parcela cuya fertilización nitrogenada sobrepasase la dosis necesaria, tal y como antes se había indicado para el maíz (Piekielek *et al.*, 1992; Schepers *et al.*, 1992; Fox *et al.*, 1994).

Los objetivos de este estudio consistieron en la validación del N-Tester como una herramienta de diagnóstico para determinar el estado de nutrición nitrogenada del trigo y evaluar su capacidad para predecir el rendimiento del trigo.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Ensayos de campo

Se realizaron diez ensayos durante tres años consecutivos (2001, 2002 y 2003) cerca de la ciudad de Vitoria, (42°51' N, 2°41' W, 513 m por encima del nivel del mar), en la provincia de Álava en trigo blando de invierno, (*Triticum aestivum* L., cv. Soissons). Cada experimento tenía un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones, siendo el tamaño de cada parcela elemental de 50 m². Los ensayos se sembraron entre el 2 de noviembre y el 2 de enero. Se cosechó entre el 13 de julio y el 8 de agosto.

En la Tabla 1 se muestran las características químicas y texturales de los suelos. La muestra de tierra se obtuvo de la mezcla de ocho muestras de suelo tomadas antes de la siembra. La excepción fue el N mineral, (N amoniacal más N nítrico), que se determinó de una mezcla de 24 muestras por experimento (i.e. ocho muestras en tres bloques por experimento) tomadas al final de invierno antes de la primera aplicación nitrogenada. En

3. USO DEL N-TESTER®

los suelos se analizó el K extraíble (NH_4AcO), P (bicarbonato sódico 0,5M) (Olsen, 1965) y pH (1:2,5 suelo:agua). El potasio se determinó mediante espectrofotometría de absorción atómica y P y por colorimetría.

Se aplicaron 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 y $90 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$ en cada experimento como 0-14-14. Los tratamientos de fertilización nitrogenada se muestran en la Tabla 2, su dosis varió de 0 a 220 kg ha^{-1} . En 2001, se aplicó amonio nitrosulfato (26% N) en ahijado y nitrato amónico cálcico (27% N g/g) en encañado. Para las campañas 2002 y 2003 se aplicó nitrato amónico (33,51% N g/g) tanto en ahijado como en encañado. En 2001 se aplicó amonio nitrosulfato con el fin de resarcir posibles carencias de S, pero como no se observaron indicios de tales carencias, en las siguientes campañas se reemplazó la fuente de N por nitrato amónico.

3.2.2. *Lecturas de N-Tester*

Las lecturas del medidor de clorofila de N-Tester se tomaron a media altura de la penúltima hoja completamente desplegada de 30 plantas elegidas al azar en los estadíos fenológicos Z32 y Z37 (Zadoks *et al.*, 1974) que corresponden respectivamente a los momentos en los que el segundo nudo y la hoja bandera son visibles. Estos momentos de medida son recomendados por Yara Internacional y permiten aplicaciones posteriores. Las medidas se tomaron entre las diez de la mañana y las cuatro de la tarde en días en los que no llovió.

Tabla 1. Experimento, localidad, cultivo precedente (Prec), año y características químicas del suelo* según profundidad (Prof).

Exp	Localidad	Prec	Año	Prof. (cm)	K	P	pH	M. O. (%)	Nmin (kg ha ⁻¹)
					___	(mg kg ⁻¹)			
1	Villanañe	Cereal	2001	0-30	216	18,19	8,1	1,2	27
				30-60	139	7,32	8,1	0,8	26
2	Soportilla	Cereal	2001	0-30	176	11,57	8,4	1,0	14
				30-60	180	2,26	8,2	0,6	16
3	Lantarón	Cereal	2001	0-30	167	10,7	8,5	1,0	13
				30-60	97	3,4	8,6	0,6	12
4	Aranguiz	Cereal	2002	0-30	120	10,8	8,3	1,2	9
				30-60	37	1,3	8,4	0,4	14
5	Aranguiz	Alubia	2002	0-30	129	16,3	8,2	1,4	30
				30-60	21	1,3	8,5	0,4	24
6	Aranguiz	Cereal	2002	0-30	143	18,2	8,3	1,2	9
				30-60	134	7,0	8,2	1,1	14
7	Betolaza	Cereal	2002	0-30	96	12,2	7,6	2,4	13
				30-60	37	1,3	8,1	0,6	20
8	Gauna	Cereal	2003	0-30	157	55,5	7,7	2,2	11
				30-60	122	37,8	8,0	1,8	9
9	Aranguiz	Cereal	2003	0-30	131	22,9	8,4	1,0	10
				30-60	59	9,6	8,4	0,8	9
10	Aranguiz	Cereal	2003	0-30	129	19,4	8,2	1,5	8
				30-60	83	7,6	8,3	0,9	7

*K (NH₄AcO), P (Olsen, 1965), pH (1:2.5 suelo:agua), Materia orgánica (Walkey, 1935), Nmin (KCl 1 M)

Tabla 2. Dosis total y reparto de los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

Dosis	Inicio de ahijado	Inicio de encañado
	(Z20)*	(Z30)
kg N ha ⁻¹		
0	0	0
100	40	60
140	40	100
180	60	120
220	80	140

*Z20 y Z30 corresponden a la escala Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974)

Las lecturas de N-Tester se normalizaron para evitar el ruido provocado por otras variables diferentes a la fertilización nitrogenada tales como las condiciones edafoclimáticas. Los valores normalizados se calcularon como un porcentaje asignándosele el 100% a la parcela del mismo bloque a la que se le habían aplicado 220 kg N ha⁻¹.

3.2.3. Medidas en planta

Se midieron la biomasa y la concentración de N en cada parcela elemental de un bloque por ensayo en Z32 y Z37 en los años 2001 y 2002. Estas medidas se tomaron en los mismos estadios fenológicos que las lecturas de N-Tester, en Z32 y Z37, con el objetivo de estudiar la relación entre el medidor de clorofila y la concentración de N en la parte aérea de la planta (Nconc) y la absorción de N por la parte aérea de la planta (Nab). Se eligió al azar un área de unos 0,25 m² de cada parcela elemental y las

plantas en este rectángulo se cortaron a ras del suelo. Se secaron las plantas en un horno a unos 70°C durante al menos 48 h para medir la biomasa y a continuación se molieron y se pasaron por un tamiz de 1 mm para posteriormente analizar su Nconc. El N total se determinó mediante el procedimiento Kjeldahl (AOAC, 1999) con un Kjeltex Auto sampler System 1035 (Tecator). Nab se determinó como el producto de la concentración de N de parte aérea de la planta y su biomasa. Los valores de Nconc y Nab normalizados se calcularon asignando el 100% a los valores de concentración y absorción de N observados en la parte aérea de las plantas que se habían fertilizado con 220 kg N ha⁻¹.

El rendimiento del trigo se determinó mediante la cosecha del pasillo central de 1,5 m de cada parcela. Los resultados se ajustaron a un porcentaje de humedad de 120 g kg⁻¹. El grano se molió y se pasó por un tamiz de 0,5 mm y su contenido de N total se estableció como se ha descrito anteriormente.

3.2.4. Condiciones climáticas

Los años 2001 y 2002 fueron similares en cuanto a su temperatura pero el año 2003 fue notablemente más frío que éstos durante los meses de enero y febrero y más caluroso desde junio a septiembre. La pluviometría fue mayor en el invierno de 2003 que en 2001 y 2002. En cualquier caso, durante los tres años llovió lo suficiente a finales de primavera como para que la campaña se desarrollase normalmente.

3.2.5. Estadística

Se calcularon coeficientes de determinación (R^2) para la relación lineal, exponencial, logarítmica, cuadrática y potencial entre las lecturas de N-Tester y las variables estudiadas. Debido a que el coeficiente de determinación y la significación eran similares se optó por el modelo lineal por su simplicidad. Por lo tanto en este trabajo solo se muestran coeficientes de determinación correspondientes a la relación lineal entre el N-Tester, absoluto o normalizado, y otras variables.

El coeficiente de determinación (R^2) entre las variables de estudio se calculó mediante el procedimiento PROC CORR (SAS Inst, 1998). En el caso de N-Tester vs Nconc y vs Nab, se correlacionaron valores individuales, mientras que en el caso del N-Tester vs rendimiento, los valores que se muestran son medias obtenidas de tres o cuatro repeticiones tal y como sugirieron Gomez y Gomez (1983) en los casos en los que existe más de una repetición.

Las diferencias estadísticas entre rendimientos correspondientes a diferentes tratamientos se evaluaron mediante análisis de varianza según el procedimiento PROC GLM del sistema SAS, Version 8.0 para Windows.

3.3. Resultados y Discusión

3.3.1. N-Tester vs concentración y absorción de N en la parte aérea de la planta

Los valores de N-Tester para trigo “Soissons” en Álava variaron entre 271 y 723 unidades. Los valores medios obtenidos en los 10 experimentos para los tratamientos en los que se aplicó 0, 140 y 220 kg N ha⁻¹ fueron de 382, 560 y 608 respectivamente en Z32 y 408, 600 y 649 en Z37.

En general, los valores de N-Tester medidos en Álava fueron parecidos a los de comunidad autónoma vecina de Navarra (Arregui *et al.*, 2006). Sin embargo, las lecturas fueron algo menores que las obtenidas por el centro de investigación Hanninghof para Yara Internacional bajo condiciones edafoclimáticas alemanas para la misma variedad de trigo (Brentrup, comunicación personal 2004). En las condiciones edafoclimáticas de Álava el N-Tester leyó 649 unidades de media para trigo blando de invierno “Soissons” en Z37 y bajo el tratamiento que se consideró no limitante respecto al N (220 kg N ha⁻¹). Para la misma variedad de trigo en Alemania, se recomendaba la adición de 20 o 30 kg N ha⁻¹ cuando el N-Tester leía 660 unidades en el mismo estado fenológico y era a partir de 680 unidades cuando no se recomendaba ningún otro aporte de N. López-Bellido *et al.* (2004) recomendaban precaución en cuanto a la universalización de las lecturas de los medidores de clorofila en diferentes localizaciones geográficas ya que las diferentes condiciones de crecimiento según las zonas pueden afectar la relación con Nconc. Así, se manifiesta de

nuevo la importancia del estudio de las medidas del medidor de clorofila en zonas con diferentes condiciones edáficas y climáticas.

Los valores de R^2 correspondientes a la relación entre las medidas de N-Tester y Nconc y entre los valores de N-Tester y Nab se muestran en la Tabla 3. Se observa que en Z32 se obtuvieron mejores valores de R^2 entre las lecturas de N-Tester y Nconc que entre los valores de N-Tester y Nab. De hecho, las R^2 referentes a la relación entre N-Tester y Nconc fueron lo suficientemente robustas como para considerar factible el diagnóstico de Nconc en cada experimento mediante los valores absolutos de N-Tester en Z32.

Como describieron Leigh y Johnston (1985) y Justes *et al.* (1997b), en la Tabla 3 se observa que la concentración de N en la parte aérea decreció según las plantas crecieron. Este hecho se debe a la dilución del N en planta con una alta cantidad de celulosa estructural, efecto que cobra especial importancia desde el inicio de encañado hasta la aparición de la hoja bandera, de Z31 a Z37 (Barraclough, 1997). Mientras que los valores de N-Tester medían el verdor de la penúltima hoja completamente extendida y se mantenían relativamente constantes de un estado fenológico al siguiente, la concentración Nconc representaba el porcentaje de N en toda la parte aérea de la planta y decreció con el crecimiento de la misma (Tabla 3). Por lo tanto según crecían los tallos, la diferencia entre Nconc y la concentración de N de las hojas aumentó. Con el fin de considerar el fenómeno de la dilución de N con celulosa estructural, las medidas de N-Tester también se relacionaron con Nab (Tabla 3). Nab se relacionaba algo mejor que Nconc sólo en Z37, cuando la concentración de N en hoja más

difería de la de la planta. De hecho, las correlaciones entre las lecturas de N-Tester y Nconc en Z37 no fueron significativas en ningún experimento, mientras que las correlaciones entre las lecturas de N-Tester y Nab en Z37 lo fueron en tres de siete experimentos (Tabla 3). De todos modos, estas tres correlaciones significativas no validan las lecturas de N-Tester en Z37 como indicador de Nab. En Z32, donde el efecto dilución es menor, la correlación entre las lecturas de N-Tester y Nab era peor que la correlación entre las lecturas de N-Tester y Nconc. En cambio, Fox *et al.* (1994) y López-Bellido *et al.* (2004) encontraron que el medidor de clorofila Minolta SPAD 502 se relacionaba claramente con Nconc en Z30 e incluso en el avanzado estado fenológico de antesis, Z60, lo que llevó a los autores a considerar este medidor de clorofila como un buen indicador de Nconc.

Cuando se reunieron los datos de todos los ensayos datos obtenidos en Z32, el coeficiente de determinación entre las lecturas de N-Tester y Nconc disminuyó a 0,44 en comparación con los coeficientes obtenidos para cada experimento (Tabla 3). Esto indica la existencia de otros factores además de la fertilización nitrogenada, presumiblemente las condiciones edafoclimáticas de cada zona y año en que los experimentos se llevaron a cabo. En Z37, las R^2 (0,43) obtenidas para todos los valores correspondientes a las lecturas de N-Tester y Nab fueron mayores que las R^2 (0,27) obtenidas para los valores correspondientes a la relación entre las lecturas de N-Tester y Nconc porque la medida Nab comprendía el efecto dilución, del mismo modo se observó para las correlaciones individuales. El modelo lineal no pudo explicar más del 44% de la varianza de las variables estudiadas en ningún caso, como se deduce de los coeficientes de determinación inferiores a 0,44. Por lo tanto no se recomendó la

comparación de las lecturas de N-Tester respecto a Nconc o Nab sin referencia a la localización o año del experimento.

Para evitar este problema, las variables se normalizaron tal y como sugirieron Follett y Follett (1992). Se le asignó un valor del 100% a la parcela del mismo bloque que recibió 220 kg N ha⁻¹ (Tabla 3). La normalización mejoró el diagnóstico tanto de Nconc como Nab, especialmente en Z32 en el caso de los valores normalizados de Nconc y tanto en Z32 como en Z37 en el caso de Nconc normalizadas. En estos casos las correlaciones fueron lo bastante robustas ($R^2 > 0,6$) como para considerar los datos normalizados lo suficientemente libres de otras influencias que el estado de la nutrición nitrogenada de la planta (Tabla 3). De todas formas, respecto a la metodología de los medidores de clorofila, Baret y Fourty (1997) determinaron que la elección de una longitud de onda cercana a la absorción máxima de la clorofila, 680 nm, no es óptima para altas concentraciones de clorofila por la pequeña sensibilidad de la transmitancia en tales condiciones. Sugirieron que la elección de dos o tres longitudes de onda entre 680 y 780 nm permitiría que el método fuera más sensible en un abanico más amplio de situaciones. De hecho, cuando se excluyeron los valores de N-Tester correspondientes a los tratamientos control (0 kg N ha⁻¹), los valores R^2 obtenidos a partir de la relación entre las lecturas normalizadas de N-Tester y los valores de Nconc en Z32 disminuyeron de 0,64 a 0,57. R^2 entre los valores normalizados de N-Tester y los valores normalizados de Nab en Z32 y Z37 disminuyó de 0,61 a 0,46 y 0,48 respectivamente.

Tabla 3. Rango y media de los valores de N-Tester, Nconc y Nab y los coeficientes de determinación (R^2) correspondientes a la relación entre los valores de N-Tester y Nconc y Nab en Z32 y Z37 en 2001 y 2002.

Exp.	N-Tester		Nconc		R^2	Nab		R^2
	Rango	Media	Rango %N	Media		Rango (kg ha ⁻¹)	Media	
<u>Z32</u>								
1	321-624	534	1,7-3,0	2,4	0,88*	18-132	84	0,88*
2	271-616	507	1,4-1,9	1,8	0,99***	20-52	35	0,49 ns
3	310-616	509	1,8-3,0	2,4	0,43 ns	19-109	57	0,79*
4	327-675	547	3,2-4,9	4,2	0,89*	53-75	62	0,38 ns
5	372-633	560	2,5-4,2	3,6	0,83*	59-152	122	0,75 ns
6	397-691	576	2,4-4,0	3,5	0,83*	26-65	49	0,90*
7	387-649	562	2,4-4,0	3,5	0,87*	14-56	38	0,71 ns
Todos	271-691	542	1,7-4,9	3,1	0,44***	14-152	64	0,17*
Todos	43,9-110,3	88,3	57,9-120,2	90,8	0,64***	14-125	76	0,61***
normal.								
<u>Z37</u>								
1	279-652	517	1,1-1,8	2,3	0,61 ns	30-202	100	0,64 ns
2	310-661	552	1,6-3,1	1,9	0,52 ns	15-100	56	0,77*
3	319-633	537	1,5-2,3	1,9	0,46 ns	15-150	74	0,77*
4	312-714	580	1,1-2,4	1,6	0,33 ns	27-135	92	0,61 ns
5	435-681	597	1,5-2,3	2,2	0,66 ns	104-237	191	0,61 ns
6	442-723	590	1,2-2,7	2,1	0,40 ns	52-174	119	0,54 ns
7	367-679	592	1,4-2,8	2,1	0,66 ns	25-93	72	0,93 **
Todos	279-723	566	1,1-3,1	2,0	0,27**	15-237	100	0,43***
Todos	43,7-106,9	86,7	46,0-155,4	84,8	0,37***	10-174	74	0,61***
normal.								

***, ** y * significativo al nivel 0,1%, 1% y 5% respectivamente. ns=no significativo.

Por lo tanto, la comparación de los valores normalizados de N-Tester en diferentes zonas y años referentes a valores normalizados de Nconc y Nab no se recomendó cuando se aplicaron dosis de N de entre 100 a 220 kg N ha⁻¹.

3.3.2. N-Tester vs Rendimiento

Además de la utilidad del medidor de clorofila como herramienta de diagnóstico de estado nutricional nitrogenado, muchos autores (Follett y Follett, 1992; Fox *et al.*, 1994; López-Bellido *et al.*, 2004) han estudiado su capacidad de predicción del rendimiento.

En las Figuras 1 y 2, los valores de N-Tester en Z32 y Z37 respectivamente se representan respecto a los valores de rendimiento. En cada experimento el modelo lineal se aplicó tanto incluyendo como excluyendo los tratamientos control (0 kg N ha⁻¹). El rendimiento varió de 1,5 Mg ha⁻¹ en el tratamiento control en el experimento 3 a 10 Mg ha⁻¹ en el experimento 5 para el tratamiento 60+120, cuyo precedente de cultivo fue la alubia. Cuando se estudiaron todos los tratamientos (incluidos el control) en cada experimento, los coeficientes de determinación correspondientes a la relación entre las lecturas de N-Tester y el rendimiento fueron en general altos tanto en Z32 como en Z37 (Figs. 1 y 2), concluyéndose así que el N-Tester fue un indicador efectivo del rendimiento. Los R² se mantuvieron en general constantes de un estadio al otro, por lo que se podría deducir que las medidas de N-Tester se correlacionaban de la misma manera con las lecturas de N-Tester independientemente de que estas lecturas se tomaran en Z32 o Z37 (Figs. 1 y 2). López-Bellido *et al.* (2004) determinó que las

lecturas del medidor de clorofila Minolta SPAD se correlacionaban altamente con el rendimiento en estados fenológicos más avanzados, de Z39 a Z41.

Sin embargo, estas correlaciones que se han comentado hasta el momento deben ser recusadas ya que derivan de curvas donde claramente se observan dos grupos de datos: los datos provenientes de parcelas no fertilizadas y los datos generados en el resto de las parcelas (Figs. 1 y 2). Cuando se excluyeron los tratamientos control sólo se obtuvieron correlaciones significativas para cada experimento en Z32 en los experimentos 2, 4, 6 y 10 y en Z37 en el experimento 2. La respuesta del rendimiento a la dosis de N se analizó mediante ANOVA con el fin de detectar la existencia de diferencias en el rendimiento producido no solo por dosis entre 0 y 220 kg N ha⁻¹, sino también entre aquellos tratamientos a los que se les aplicaron dosis era de entre 100 y 220 kg N ha⁻¹ y que el N-Tester no pudo distinguir. El modelo mostró que la dosis de N afectaba al rendimiento en todos los experimentos en lo que se incluía el tratamiento control y en los experimentos 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9 y 10 cuando se excluía este tratamiento. Así, el N-Tester no fue capaz de discernir las variaciones del rendimiento provocadas por los diferentes tratamientos fertilizantes nitrogenados entre 100 y 220 kg N ha⁻¹ ni en Z32 ni en Z37. La postergación de las lecturas de N-Tester sería una medida a considerar ya que puede que el estado nutricional nitrogenado del trigo en un estadio más tardío se correlacionase con el rendimiento en mayor grado.

3. USO DEL N-TESTER®

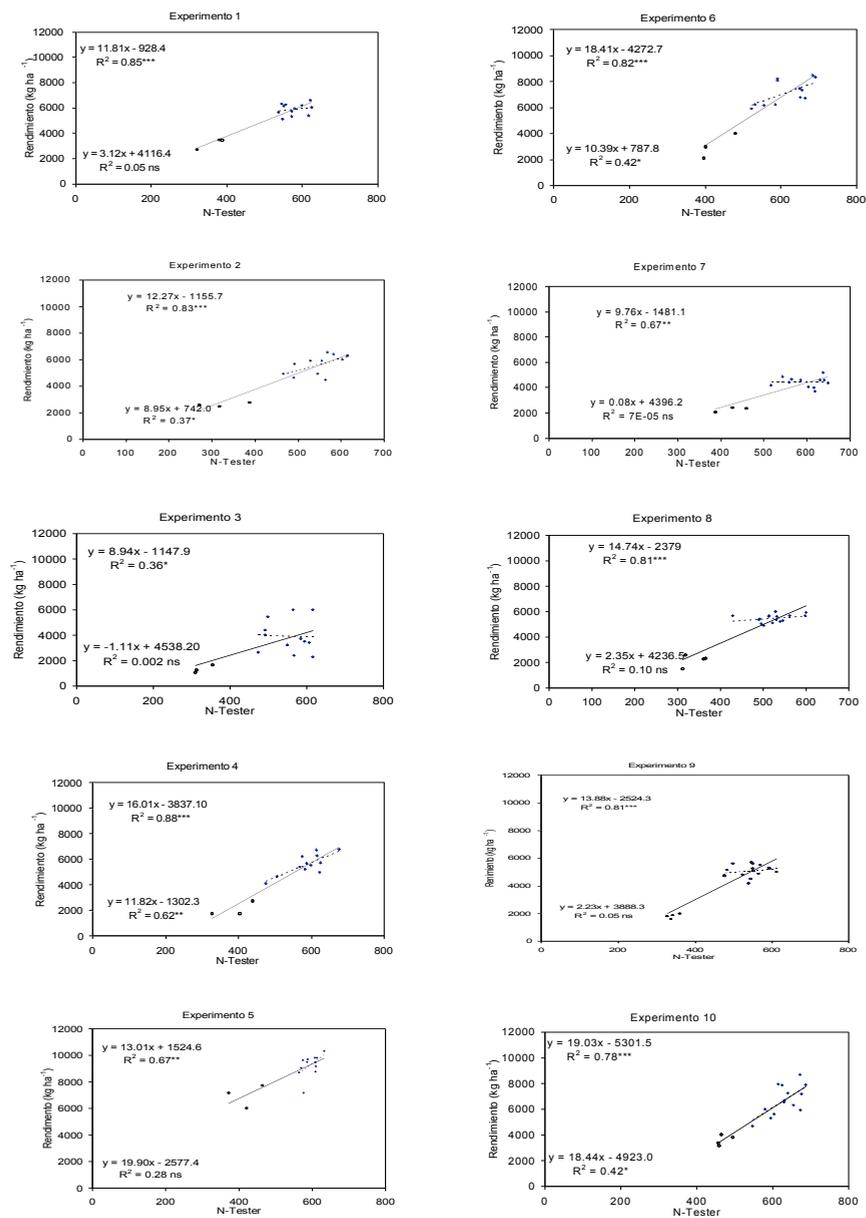


Figura 1. Valores de N-Tester en Z32 vs rendimiento. Las líneas continuas y discontinuas representan la relación lineal entre las variables cuando el tratamiento control (0 kg N ha⁻¹ aplicados) se incluye (ecuación y R² en la esquina superior izquierda) y excluye (ecuación y R² en la esquina inferior izquierda) respectivamente.

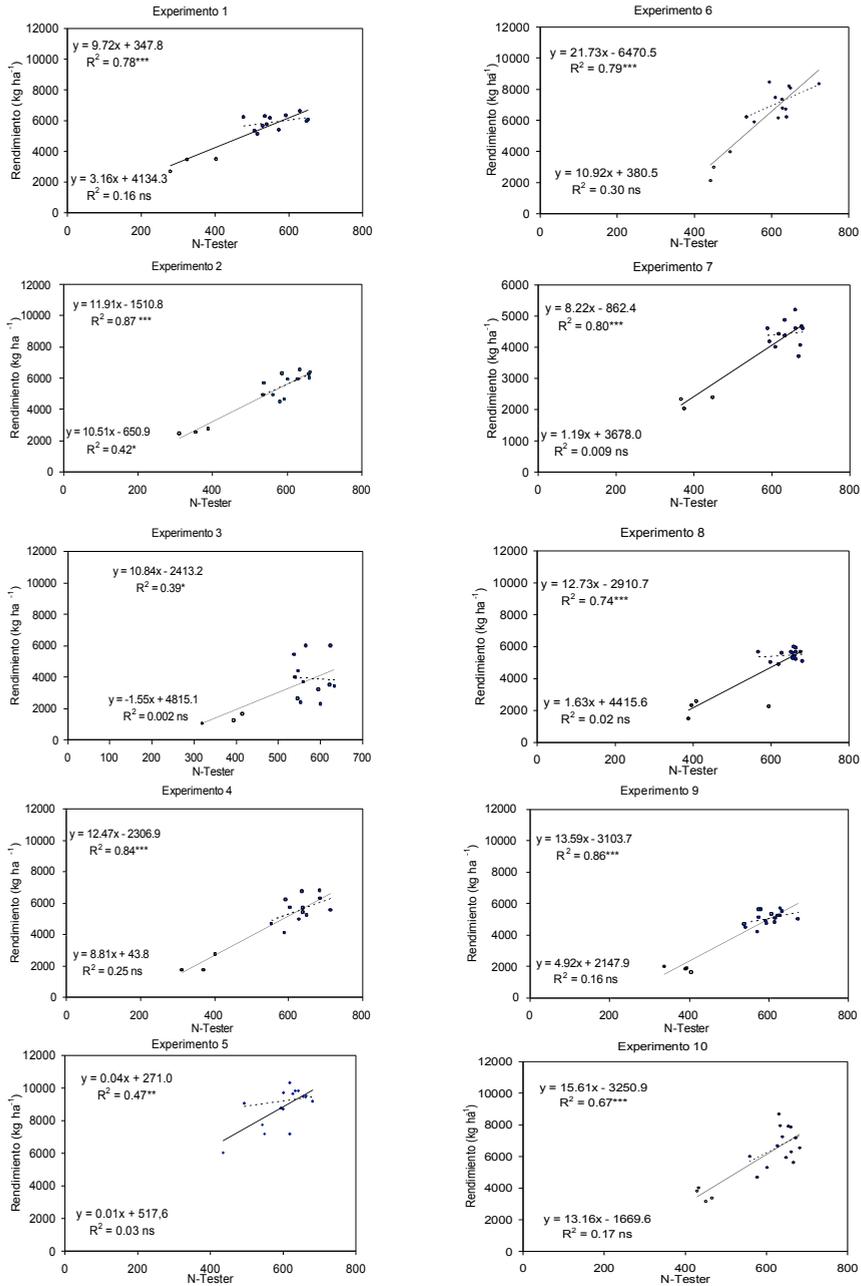


Figura 2. Valores de N-Tester en Z37 vs rendimiento. Las líneas continuas y discontinuas representan la relación lineal entre las variables cuando el tratamiento control (0 kg N ha⁻¹ aplicados) se incluye (ecuación y R² en la esquina superior derecha) y excluye (ecuación y R² en la esquina inferior derecha) respectivamente.

De tal forma, se reducirían las posibilidades de acontecimientos inesperados como enfermedades, cambios climáticos etc. que afectasen al rendimiento. En cualquier caso, en el manejo tradicional del cultivo en Álava, donde no se riega ni se aplica N foliar, las lecturas tardías del estado nutricional nitrogenado de la planta son poco prácticas, ya que resultan tardías para emprender acciones correctivas que mejorasen el rendimiento.

Para establecer las relaciones entra las lecturas de N-Tester y el rendimiento en todos los ensayos, los valores de rendimiento se normalizaron asignando el valor del 100% al rendimiento obtenido en la parcela del mismo bloque que recibió 220 kg N ha⁻¹ para la comparación entre sitios y años. Los coeficientes de determinación entre los valores de N-Tester normalizados y los valores de rendimiento normalizados obtenidos en todos los experimentos se muestran en la Tabla 4. Los valores de N-Tester normalizados variaron de 43,9% a 111,1%, siendo la media de 88,4% en Z32 y 87,9% en Z37. Cuando se excluyó el tratamiento control, los coeficientes de determinación disminuyeron drásticamente de 0,75 a 0,20 en Z32 y de 0,64 de 0,09 en Z37 (Tabla 4). Debido a las débiles correlaciones los valores normalizados de N-Tester no se pudieron considerar una herramienta de predicción del rendimiento relativo cuando se aplicaron valores mayores que 100 kg N ha⁻¹. También Fox *et al.* (1994) describieron bajas correlaciones entre la concentración de N en los tejidos y el rendimiento, pero concluyeron que el medidor de clorofila era una herramienta útil pues era más precisa que la concentración de N en tejido en la determinación de necesidades de fertilización nitrogenada.

Tabla 4. Valores de N-Tester normalizados, valores de rendimiento normalizados y los coeficientes de determinación (R^2) de la relación entre ambos en Z32 y Z37 en los 10 experimentos. Cuando se especifica, el tratamiento control se excluye de la R^2 .

Estado fenológico	N-Tester		Rendimiento normalizado		R^2	R^2 sin control
	normalizado		Rango (%)	Media		
	Rango	Media				
Z32	43,9-111,1	88,4	20,9-139,1	84,3	0,75*	0,20*
Z37	43,7-106,9	87,9			0,64*	0,09*

*Significativo al 5% de probabilidad

Cuando se representaron los datos de la Tabla 4 en una gráfica (Fig. 3) se pudo observar que los valores normalizados de N-Tester discernían entre los valores de rendimiento de las parcelas no fertilizadas y de las fertilizadas, pero no diferenciaban rendimientos estadísticamente diferentes provenientes de parcelas fertilizadas con diferentes dosis de fertilización nitrogenada. Los valores normalizados de N-Tester inferiores al 76% predijeron rendimientos relativos propios de parcelas no fertilizadas (rendimiento <63%), con un error del 9%, calculado tal y como describieron Cate y Nelson (1971) (Fig. 3). Los valores de N-Tester normalizados mayores que 76% predijeron rendimientos propios de parcelas fertilizadas, con un error del 2% sobre los casos estudiados. El uso de los valores absolutos de N-Tester con el mismo propósito también es posible.

3. USO DEL N-TESTER®

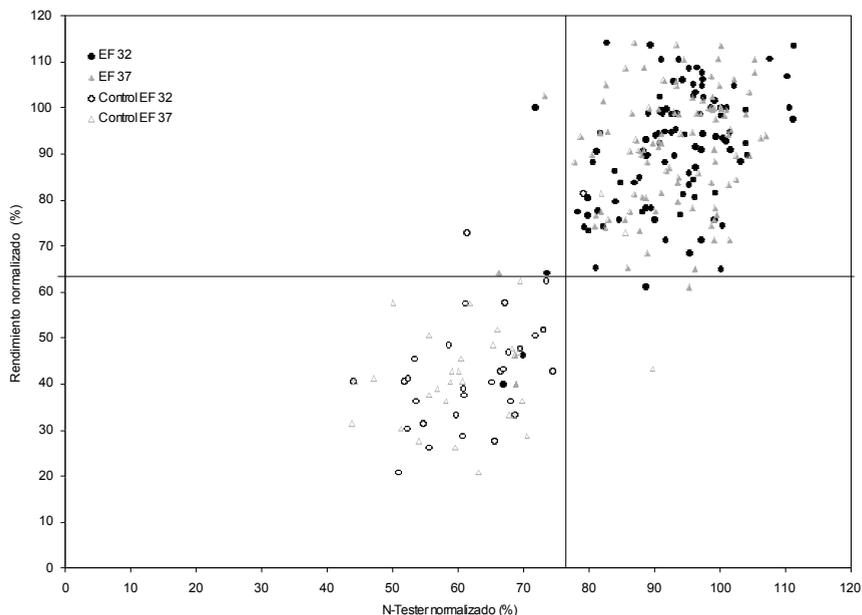


Figura 3. Valores de N-Tester normalizados vs valores de rendimiento normalizados en los estados fenológicos Z32 y Z37. Los valores obtenidos en los tratamientos control se muestran como símbolos abiertos.

Los valores de N-Tester inferiores a 461 unidades predijeron un valor de rendimiento relativo correspondiente a una parcela no fertilizada (<63% rendimiento) con un error del 7%, y los valores mayores que 461 predijeron un rendimiento normalizado mayor que el 63%, fallando en el 2% de los casos estudiados (Fig. 4). También Fox *et al.* (1994) apreciaron que el medidor de clorofila Minolta SPAD diferenciaba el rendimiento de una parcela a la que no se le había aplicado fertilización nitrogenada en contraste al obtenido en una a la que si que se le había aplicado. En las condiciones edafoclimáticas de Álava los tratamientos control se distinguen claramente por su aspecto, además no es frecuente hallar parcelas de trigo sin fertilización nitrogenada. Por lo tanto el N-Tester no es de gran

practicidad en la predicción del rendimiento bajo estas condiciones edafoclimáticas. Sin embargo, el N-Tester podría ser de utilidad en la detección de la fertilización nitrogenada de los denominados filtros verdes, que no está permitida. Una gran porción del área donde se cultiva trigo en Álava se encuentra en una zona declarada como vulnerable a la polución de las aguas causada por nitratos de origen agrícola por la directiva europea 91/676/CEE. En esta área no se permite la fertilización nitrogenada en torno a 3 m de cualquier tipo de curso de agua de cualquier tipo. Sin embargo para utilizar los valores de N-Tester normalizados se necesitaría una zona donde la fertilización nitrogenada del trigo fuera ilimitada (i.e. $\geq 220 \text{ kg N ha}^{-1}$).

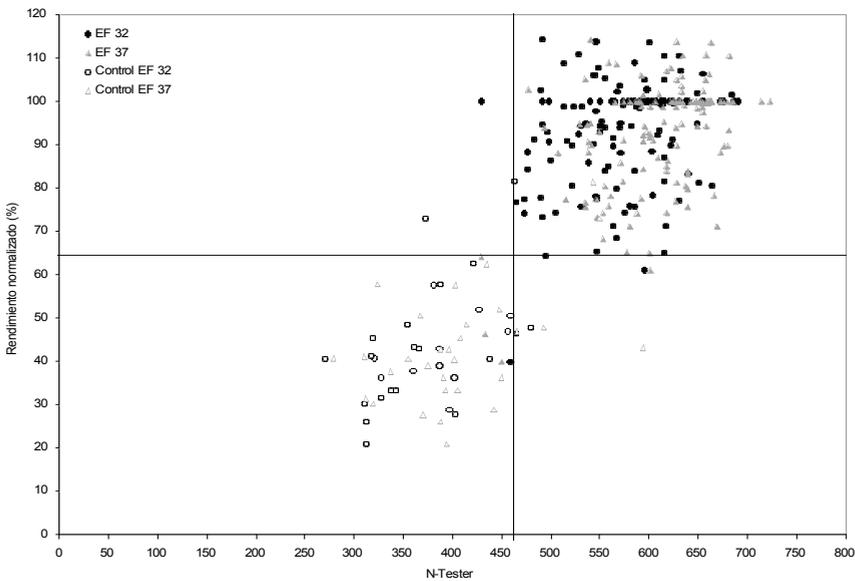


Figura 4. Valores absolutos de N-Tester vs los valores normalizados de rendimiento en los estados fenológicos Z32 y Z37. Los valores obtenidos en los tratamientos control se muestran como símbolos abiertos

3.4. Conclusiones

1.) La normalización de los valores de N-Tester respecto a una parcela a la que se le había aplicado N por encima de las necesidades de la planta (i.e. $\geq 220 \text{ kg N ha}^{-1}$) permitió la predicción del estado nutricional del trigo de la variedad “Soissons” como la concentración de N en la parte aérea de la planta en Z32 ($R^2=0,64$) en base a la absorción de N en planta tanto en Z32 como en Z37 ($R^2>0,6$), en contraste con los valores absolutos ($R^2<0,4$). Sin embargo, cuando se excluyeron los valores de N-Tester correspondientes a los tratamientos control, las robustas correlaciones para los valores normalizados de concentración de N y absorción de N en la parte aérea disminuyeron imposibilitando la comparación de valores normalizados de N-Tester entre diferentes localizaciones y/o años.

2.) De manera similar, mediante los valores normalizados de N-Tester se pudo diferenciar el rendimiento correspondiente a parcelas no fertilizadas frente al de parcelas fertilizadas con un límite de rendimiento normalizado de aproximadamente 63%. Sin embargo, los valores normalizados de N-Tester no pudieron diferenciar el rendimiento correspondiente a tratamientos de fertilización nitrogenada cuya dosis era de 100 a 220 kg N ha⁻¹.

Efecto de la fertilización nitrogenada tardía en el rendimiento y contenido de proteína. Utilidad del N-Tester® como herramienta de decisión.

4.1. Introducción

En España, al igual que en muchos otros países productores de trigo como U.S.A. (Lorbeer *et al.*, 2000), Nueva Zelanda (Millner *et al.*, 1994) y Francia (Leygue, 2000), aumenta la demanda de trigo de mayor calidad panadera por el que frecuentemente se pagan primas (Zarco-Hernández *et al.*, 1999). El contenido de proteína en grano del trigo es representativo de su calidad (Gooding y Davies, 1997) y las primas se pagan según su valor. El contenido de proteína está gobernado por las condiciones climáticas propias de cada zona productiva y por las diferencias genéticas de las variedades cultivadas. Sin embargo, los resultados de la investigación y la experiencia han demostrado que la gestión de la fertilización nitrogenada puede mejorar significativamente la calidad del trigo (Kemmler, 1983). En este sentido, Gate (1995) expuso que el aporte tardío de nitrógeno (N) entre inicio de encañado, que según Zadoks *et al.* (1974) corresponde al estado fenológico Z30, y aparición de última hoja (Z37) aumentaba el contenido de proteína en grano, aunque no el rendimiento. Denuit *et al.* (2002)

describieron que en las condiciones climáticas húmedas de Bélgica, la fertilización nitrogenada del trigo de invierno normalmente se aplica en tres aportes, en Z25, Z30 y Z37-Z39. Según Destain *et al.* (2002), de estas tres aplicaciones la última es la más eficiente para el rendimiento y el contenido de proteína en grano. Otros muchos autores retardan la tercera aplicación a estados fenológicos posteriores a Z37 con el fin de favorecer el contenido en proteína del grano, pero aplicando en este caso fertilización foliar (Howard *et al.*, 2002; López-Bellido *et al.*, 2004; Ma *et al.* 2006).

Según los resultados del Capítulo II, en las condiciones mediterráneas húmedas de Álava se recomiendan unos 180 kg ha⁻¹ para la obtención del rendimiento máximo del trigo cuando la fertilización nitrogenada se aplica en dos aportes aplicados a principio de ahijado (Z20) y a inicios de encañado (Z30). De hecho la dosis aplicada habitualmente por los productores de trigo de la región es de unos 180 -220 kg ha⁻¹, excepto en las áreas catalogadas como vulnerables a los nitratos de origen agrícola, donde la dosis máxima permitida es de 140 kg N ha⁻¹. En estas condiciones mediterráneas húmedas es probable que llueva lo suficiente en los estados de desarrollo alrededor de Z37-Z39 como para capacitar la absorción del N de una tercera aplicación tardía de N. En este contexto, con el fin de maximizar la eficiencia de utilización del N, se podría diseñar una estrategia alternativa de baja fertilización en la que la aplicación de N se repartiera en tres aportes en vez de en dos y de tal forma que se pueda completar o no completar la dosis total con una tercera aplicación dependiendo de las necesidades nitrogenadas del cultivo. Mediante esta estrategia se podría reducir la lixiviación de N como resultado de maximizar la eficiencia del

uso de N, lo que resultaría particularmente interesante en las zonas vulnerables a nitratos de origen agrícola mientras que los gastos económicos podrían reducirse debido al posible ahorro de la tercera aplicación. Por otro lado, una estrategia de fertilización en tres aportes donde el tercero se realizara en torno a Z37 podría también mejorar el contenido de proteína en grano. Para decidir sobre la conveniencia y dosis de un tercer aporte en esta estrategia, se genera la necesidad de una herramienta de diagnóstico del estado nutricional de la planta. Algunas técnicas convencionalmente utilizadas para conocer el estado nutricional de la planta tales como la medida de la concentración de nitratos en la savia de la base del tallo de la planta (Justes, 1997c) o el análisis del tejido suponen la recogida de plantas y su posterior análisis. Así, los medidores de clorofila ganan importancia como alternativa a los análisis mencionados instantáneos ya que ofrecen una medida instantánea y no destructiva. Los medidores de clorofila calculan un valor numérico y adimensional que es proporcional al contenido de la clorofila en la hoja (Neurkirchen y Lammel, 2002) y que se puede utilizar para hacer recomendaciones de fertilización.

Los objetivos de este capítulo fueron en primer lugar, conocer el efecto de repartir la dosis de fertilización nitrogenada en tres aportes en vez de en dos siendo el último de ellos tardío sobre el contenido de proteína en grano y el rendimiento. En segundo lugar, evaluar la estrategia de baja fertilización nitrogenada comentada y, dentro de esta estrategia, el probar la capacidad del medidor de clorofila Yara N-Tester® como herramienta para decidir sobre la conveniencia y dosis de una tercera aplicación tardía según las necesidades nutricionales del trigo.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Ensayos de campo

Se realizaron diez ensayos de fertilización nitrogenada para trigo de invierno de la variedad Soissons durante tres años consecutivos (2002, 2003 y 2004) cerca de Vitoria (42°51' N, 2°41' W, 513 m por encima del nivel del mar) en la provincia de Álava. El trigo se sembró de octubre a diciembre con una dosis de siembra de 200 kg ha⁻¹ a una distancia de aproximadamente 15 cm entre filas. Los experimentos están próximos a la zona vulnerable a la contaminación por nitratos y las condiciones edafoclimáticas son similares.

En la Tabla 1 se recogen las características químicas y texturales de los suelos. Los parámetros del suelo mostrados en esta tabla se obtuvieron de una mezcla de ocho muestras por experimento y profundidad antes de la siembra. El N mineral (N nítrico y amoniacal), se determinó al final de invierno, antes de la primera aplicación de N. Los datos referentes a la precipitación se obtuvieron de estaciones meteorológicas próximas a cada ensayo (Euskalmet, 2006).

Los experimentos se realizaron en bloques al azar con cuatro repeticiones, siendo cada parcela de 50 m².

Antes de la siembra se aplicaron 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 90 kg ha⁻¹ de K₂O en cada experimento en forma de 0-14-14. Los tratamientos de fertilización nitrogenada aplicados se muestran en la Tabla 2. Las dosis de 140 y 180 kg ha⁻¹ se repartieron en dos (tratamientos 40+100 y 60+120

respectivamente) o tres aportes (40+60+40 y 40+60+80) respectivamente para estudiar el efecto del reparto con un aporte tardío en Z37. El tratamiento 40+60 se incluyó para poder evaluar el diseño de la estrategia de baja fertilización frente al tratamiento 40+100. Por otro lado, los tratamientos 40+60+40, 40+60+60 y 40+60+80 se emplearon para testar la estrategia de baja fertilización con un tercer aporte tardío y la utilidad del N-Tester en la aplicación de la misma.

4.2.2. Rendimiento y contenido de proteína en grano

El rendimiento se determinó cosechando un pasillo central de 1,5 m de ancho en cada parcela. El grano se desecó en el horno a 70 °C por al menos 48 horas y a continuación se molió y se pasó por un tamiz de 0,5 mm antes de analizarse la concentración total de N por el procedimiento Kjeldhal (AOAC, 1999) con un Kjeltec Auto sampler System 1035 (Tecator). El contenido de proteína en grano se determinó como el producto de la concentración tal N por 5,7 (Teller, 1932).

Tabla 1. Experimento (Exp.), localidad, cultivo precedente (Prec.), año de cosecha (Año), profundidad de muestreo (Prof.), propiedades químicas y texturales de los suelos y pluviometría en la quincena previa y posterior a la aplicación del tercer aporte fertilizante.

Exp.	Localidad	Prec.	Año	Prof. (cm)	K	P (mg kg ⁻¹)	pH	Materia orgánica (%)	Nmin (kg ha ⁻¹)	Arena (g kg ⁻¹)	Arcilla (g kg ⁻¹)	Limo	Lluvia (mm)
1	Aranguiz	Cereal	2002	0-30	120	10,8	8,3	1,2	9	210	220	570	79
				30-60	37	1,3	8,4	0,4	14	180	210	610	
2	Aranguiz	Alubia	2002	0-30	12	16,3	8,2	1,4	30	290	270	440	63
				30-60	21	1,3	8,5	0,4	24	390	150	460	
3	Aranguiz	Cereal	2002	0-30	143	18,2	8,3	1,2	9	160	280	560	63
				30-60	134	7,0	8,2	1,1	14	120	350	530	
4	Betolaza	Cereal	2002	0-30	96	12,2	7,6	2,4	13	180	320	500	79
				30-60	37	1,3	8,1	0,6	20	210	540	250	
5	Tuesta	Barbecho	2003	0-30	110	15,5	7,8	1,0	15	210	240	550	53
				30-60	83	2,5	8,0	0,8	21	200	280	520	
6	Aranguiz	Cereal	2003	0-30	131	22,9	8,4	1,5	10	160	260	580	71
				30-60	59	9,6	8,4	0,9	9	170	230	600	
7	Aranguiz	Cereal	2003	0-30	129	19,4	8,2	1,4	8	170	280	550	71
				30-60	83	7,6	8,3	1,0	7	160	270	570	
8	Gauna	Patata	2004	0-30	98	32,2	8,1	2,0	10	470	280	250	30
				30-60	60	16,8	8,2	1,1	12	430	240	330	
9	Aranguiz	Remolacha	2004	0-30	93	13,1	8,3	1,3	15	210	220	570	9
				30-60	98	2,4	7,9	1,2	9	180	310	510	
10	Tuesta	Patata	2004	0-30	137	46,8	7,6	1,9	19	460	290	250	18
				30-60	70	18,6	7,5	0,9	24	320	260	420	

*K (NH₄AcO), P (Olsen, 1965), pH (1:2,5 suelo:agua), materia orgánica (Walkley, 1935), Nmin (KCl 1 M), arena, limo y arcilla (Gee y Bauder, 1986).

Tabla 2. Dosis total y reparto de los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

Dosis (kg N ha ⁻¹)	Tratamiento	Reparto (kg N ha ⁻¹)*		
		Inicio de ahijado (Z20)	Inicio de encañado (Z30)	Hoja bandera (Z37)
0	0	0	0	0
100	40+60	40	60	0
140	40+100	40	100	0
140	40+60+40	40	60	40
160	40+60+60	40	60	60
180	60+120	60	120	0
180	40+60+80	40	60	40
220	80+140	80	140	0

*Z20, Z30 y Z37 corresponden a la escala Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974)

4.2.3. N-Tester®

Las lecturas del medidor de clorofila se tomaron a media altura de la penúltima hoja completamente extendida usando el medidor de clorofila Yara® N-Tester en 30 plantas elegidas al azar. Las lecturas se tomaron en Z32 y Z37 que respectivamente corresponden a la aparición del segundo nudo y a la de la hoja bandera (Zadoks *et al.*, 1974). La Figura 1 ilustra la cronología de la fertilización nitrogenada y de las lecturas de N-Tester. Las lecturas de N-Tester en Z37 se realizaron dos o tres días antes de la fertilización nitrogenada. No se realizaron medidas en Z32 en el experimento 5.

4. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA TARDÍA

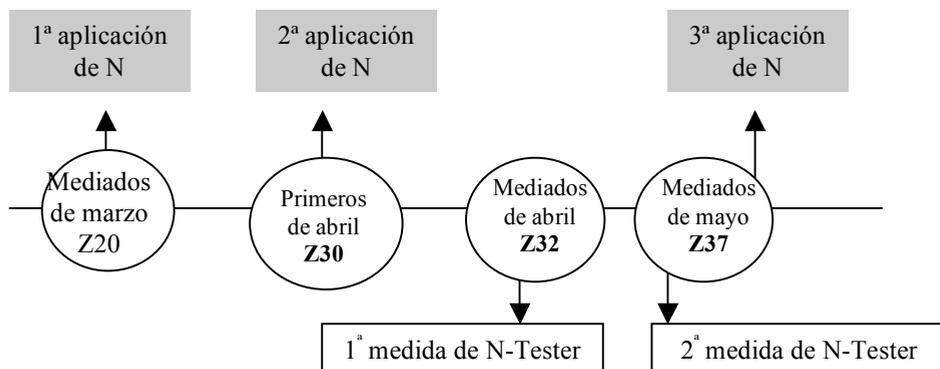


Figura 1. Cronología de la fertilización nitrogenada y medidas de N-Tester.

Las lecturas de N-Tester se normalizaron para evitar el ruido provocado por otras variables diferentes la fertilización nitrogenada de forma que fuera posible la comparación entre experimentos tal y como recomiendan Fox *et al.* (1992) y Ortuzar-Iragorri *et al.* (2005). Las medidas normalizadas de N-Tester en Z32 y Z37 (NTR32 y NTR37) se calcularon como un porcentaje asignando el 100% en cada experimento a la parcela en el bloque correspondiente que recibía una dosis superior a la necesaria para la obtención del rendimiento máximo, i.e. 220 kg N ha⁻¹ (Ortuzar-Iragorri *et al.*, 2005).

4.2.4. Estadística

El análisis de varianza se realizó mediante el procedimiento PROC GLM (SAS, 1998).

Se utilizó el procedimiento CONTRAST para comparar las medias resultantes de los diferentes tratamientos cuando el análisis de varianza

indicaba que los tratamientos tenían un efecto sobre la variable a estudio.

4.3. Resultados

4.3.1. Reparto de la dosis de N

Los rendimientos medios obtenidos considerando todos los experimentos en conjunto fueron de 5873 y 6278 kg ha⁻¹ para los tratamientos cuya dosis de N era de 140 y 180 kg ha⁻¹ respectivamente. La mayoría de experimentos no mostraron diferencias significativas en el rendimiento cuando las dosis de 140 y 180 kg N ha⁻¹ se repartieron en dos aportes en vez de en tres (Tabla 3). Sin embargo, el rendimiento disminuyó en un 10% en los experimentos 1, 3, 6 y 7 como consecuencia de aumentar el número de aplicaciones en el reparto.

Los valores medios de proteína en grano para todos los experimentos en conjunto fueron de 127,2 y 1313,3 g kg⁻¹ para los tratamientos con dosis de N de 140 y 180 kg ha⁻¹ respectivamente. El contenido de proteína obtenido con los tratamientos de la misma dosis (i.e 140 ó 180 kg N ha⁻¹) pero diferente reparto fue o bien similar aumentó cuando el reparto amentaba de dos a tres aplicaciones (Tabla 4). Las excepciones a esta afirmación se dieron en el experimento 9 cuando se aumentaban los momentos de reparto de 180 kg N ha⁻¹ y en el experimento 10 cuando se aumentaban los momentos de reparto tanto de la dosis de 140 como de la de 180 kg N ha⁻¹. En estos casos, el contenido de proteína disminuyó en aproximadamente un 10%.

Tabla 3. Rendimiento (kg ha⁻¹) en los distintos experimentos (Exp.) con tratamientos de la misma dosis y diferente reparto, y grado de significación de la comparación entre ambos rendimientos. La correspondiente desviación estándar se muestra entre paréntesis.

Exp	40+100	40+60+4	40+100 vs	60+12	40+60+8	60+120 vs
		0	40+60+40	0	0	40+60+80
(kg ha ⁻¹)						
1	5389	4820	**	5787	5459	ns
2	8643	8195	ns	9724	9893	ns
3	6372	6627	ns	7740	6848	***
4	4472	4307	ns	4218	4969	ns
5	5683	5440	ns	5559	5702	ns
6	5189	4750	***	5424	4891	***
7	6166	5292	**	6353	6197	ns
8	7059	7021	ns	7174	7454	ns
9	5036	4577	ns	4959	4654	ns
10	5921	6499	ns	6340	6208	ns

*** y ** significativo al nivel 0,1% y 1% respectivamente. ns=no significativo.

Tabla 4. Contenido en proteína (g kg⁻¹) en los distintos experimentos (Exp.) con tratamientos de la misma dosis y diferente reparto, y grado de significación de la comparación entre ambos rendimientos. La correspondiente desviación estándar se muestra entre paréntesis.

Exp	40+100 vs 40+60+40		60+120 vs 40+60+80		60+120 vs 40+60+80	
	40+100	40+60+40	60+120	40+60+80	60+120 vs 40+60+80	60+120 vs 40+60+80
1	97,3 (1,42)	153,8	96,0	123,3 (7,68)	***	***
2	132,5 (3,39)	129,3	130,7	131,3 (3,80)	ns	ns
3	121,7 (7,64)	127,8	131,1	139,9 (7,49)	ns	*
4	110,7 (4,07)	127,5	110,5	122,5 (6,98)	*	*
5	139,6 (4,62)	144,8	157,6	155,2 (9,09)	ns	ns
6	134,8 (2,51)	133,6	139,2	142,5 (7,32)	ns	ns
7	132,1 (7,84)	134,8	139,4	138,8 (4,03)	ns	ns
8	102,2 (7,02)	112,4	124,4	113,6 (0,25)	ns	ns
9	124,9 (4,36)	132,4	137,6	127,8 (3,08)	*	**
10	133,2 (8,02)	119,6	141,5	123,4 (6,85)	*	*

***, ** y * significativo al nivel 0,1%, 1% y 5% respectivamente. ns=no significativo.

4.3.2. Estrategia de baja fertilización nitrogenada

En la estrategia de baja fertilización se aplicaron sólo 40 y 60 kg N ha⁻¹ respectivamente en Z20 y Z30 con la posibilidad de añadir un tercer aporte en Z37. Se compararon los tratamientos 40+60 y 40+100 para determinar el efecto de la reducción de la segunda aplicación en Z30 de 100 a 60 kg N ha⁻¹ tras una primera aplicación de 40 kg N ha⁻¹ en Z20. En general, se observó que la disminución de dosis en la segunda aplicación no causó una disminución del rendimiento (Tabla 5), excepto en los experimentos 6 y 7. Por otro lado, se observó una mejora significativa en el contenido de proteína en grano cuando la segunda aplicación era de a 100 kg N ha⁻¹ en vez de 60 kg N ha⁻¹ los experimentos 3, 6, 7, 9 y 10 (Tabla 6).

El efecto de una tercera aplicación extra sobre el tratamiento 40+60 se estudió comparando este tratamiento con los tratamientos 40+60+40, 40+60+60 y 40+60+80. Se observó que entre las dosis estudiadas al menos se necesitaba un tercer aporte de 60 kg N ha⁻¹ para aumentar significativamente el rendimiento en tres de los diez experimentos (Tabla 5). Un tercer aporte de 80 kg ha⁻¹ sobre el tratamiento 40+60 hacía aumentar de tres a seis el número de experimentos que mejoraban el rendimiento (i.e. experimentos 1, 2, 3, 6, 7 y 8) (Tabla 5). Respecto al contenido de proteína en grano, todos los experimentos respondieron positivamente a la adición extra de un tercer aporte de N en Z37 sobre el tratamiento 40+60 (Tabla 6). El número de experimentos que respondieron aumentó según se incrementaba la dosis del tercer aporte de 40 a 80 kg ha⁻¹ (Tabla 6). La excepción a esta afirmación fueron los experimentos 2 y 10 que cuando

se les aportó 80 kg N ha⁻¹ extra sobre el tratamiento 40+60, no mostraron proteínas significativamente superiores que las obtenidas con el tratamiento 40+60 a pesar de haberlo hecho con el tratamiento 40+60+60.

4.3.3. *Uso del N-Tester*

Se determinó la necesidad y la dosis de la tercera aplicación sobre el tratamiento 40+60 según las lecturas normalizadas del N-Tester. Así se observó un valor NTR32 de 91% por encima del cual las terceras aplicaciones de N de 40, 60 u 80 kg ha⁻¹ sobre el tratamiento 40+60 no suscitaban incrementos en el rendimiento o lo hacían tenuemente (Figs. 2A, 2B, 2C). Por debajo de este valor, las terceras aplicaciones extra sobre el tratamiento 40+60 hacían aumentar el rendimiento en un número de experimentos que aumentó con el incremento de la dosis del tercer aporte de 60 a 80 kg ha⁻¹. En cuanto a las medidas de N-Tester en Z37, se observó que el número de experimentos con un valor de NTR37 inferior al 91% en los que se incrementaba el rendimiento con un tercer aporte era mayor con el incremento de la dosis del tercer aporte de 60 kg ha⁻¹ a 80 kg N ha⁻¹ sobre el tratamiento 40+60 (Figs. 2E, 2F). En los experimentos cuyos valores de NTR37 eran mayores que 91% la probabilidad de que su rendimiento aumentara con terceras adiciones de 40, 60 o 80 kg ha⁻¹ sobre el tratamiento 40+60 era escasa (Figs. 2D, 2E, 2F).

Respecto al contenido de proteína en grano, se observó que era muy probable que en los experimentos cuyo valor de NTR32 era inferior a 92% se obtuviese una respuesta significativa por parte de la

proteína cuando se añadía un aporte tardío extra de 40 kg N ha⁻¹ sobre el tratamiento 40+60 (Fig. 3A). Por encima del valor de 92% en NTR32, se requerían terceros aportes de al menos 60 kg N ha⁻¹ para obtener respuesta proteica (Figs. 3A, 3B) a pesar de que con un tercer aporte de 80 kg N ha⁻¹ este efecto no se observaba claramente. Lo mismo se observó en las mediciones de N-Tester en Z37. Así, mientras que una tercera aplicación de 40 kg N ha⁻¹ sobre el tratamiento 40+60 fue suficiente para que en los experimentos cuyo valor de NTR37 fuera inferior a 92% se obtuvieran contenidos en proteína significativamente superiores, por encima del valor de NTR37 de 92% se necesitaban terceras aplicaciones de al menos 60 kg ha⁻¹ (Figs. 3D, 3E, 3F).

4.4. Discusión

4.4.1. Reparto de la dosis de N

El reparto de las dosis de 140 y 180 kg N ha⁻¹ en tres aportes con una tercera aplicación tardía en vez de en dos, rara vez tuvo efecto sobre el rendimiento, mientras que en el contenido en la proteína se observó repuesta en aproximadamente la mitad de los experimentos estudiados (Tabla 4). En este sentido, Garrido-Lestache *et al.* (2005), al repartir la dosis de 150 kg N ha⁻¹ en diferentes proporciones entre la siembra, el inicio de ahijado (Z20) y el inicio de encañado (Z30), no observaron ningún efecto claro de la repartición de la fertilización nitrogenada ni en el rendimiento ni en el contenido de proteína en

grano, aunque ellos realizaron las aplicaciones en momentos más tempranos debido a las condiciones mediterráneas más secas en las que se desarrolló su experimento.

En los experimentos en los que se observaron diferencias entre tratamientos de la misma dosis pero diferente reparto, la tendencia observada fue que el mayor reparto reducía el rendimiento en un 11% e incrementaba el contenido de proteína en grano en un 21% de media excepto en los experimentos 9 y 10, donde se observó una disminución de aproximadamente el 10% (Tablas 3 y 4). La combinación entre la escasa lluvia que ocurrió en el experimento 10 alrededor de la tercera aplicación de N y la textura arenosa de este experimento (Tabla 1), probablemente dificultó la absorción de la tercera aplicación de N, lo que derivó en un menor contenido de proteína cuando se repartieron en tres aplicaciones tanto la dosis de 140 kg N ha^{-1} como la de 180 kg N ha^{-1} . También llovió poco en el experimento 9 en las quincenas anterior y posterior al aporte de la tercera aplicación 9, lo que también podría ser la razón de los menores contenidos de proteína observados cuando se repartió en tres aportes la dosis de 180 kg N ha^{-1} (Tabla 4), sin embargo, cuando se repartió en tres aportes la dosis de 140 kg N ha^{-1} la respuesta de la proteína fue positiva. Por lo tanto parece que la falta de lluvia comentada produjo un efecto negativo sólo en el caso más extremo en el que el tercer aporte suponía un 45% de la dosis total frente al 29% que suponía el tercer aporte cuando la aplicación de 140 kg N ha^{-1} se efectuaba en tres aplicaciones.

Debido al efecto nulo o negativo del fraccionamiento en tres aportes en vez de en dos de las dosis 140 y 180 kg N ha^{-1} sobre el

4. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA TARDÍA

rendimiento y el coste adicional que una tercera aplicación extra de N supondría por la utilización de la maquinaria, combustible y mano de obra en una ocasión más, los resultados obtenidos nos llevan a no recomendar la aplicación de las dosis de 140 y 180 g N ha⁻¹ en tres aportes vez de en dos cuando el objetivo primordial es el rendimiento y no la proteína. Si la proteína se primase, se debería realizar un estudio económico para evaluar la viabilidad económica del reparto en tres de las dosis 140 y 180 kg N ha⁻¹.

Tabla 5. Rendimiento (kg ha⁻¹) obtenido en cada experimento (Exp.) con las diferentes dosis y repartos fertilizantes y significación de la comparación entre los rendimientos del tratamiento 40+60 y los de los tratamientos 40+60+40, 40+60+60 y 40+60+80. La correspondiente desviación estándar se muestra entre paréntesis.

Exp.	40+60 vs 40+100					40+60 vs 40+60+40					40+60 vs 40+60+60					40+60 vs 40+60+80				
	40+60	40+100	40+60	40+100	40+60	40+60+40	40+60	40+60+40	40+60	40+60+60	40+60	40+60+60	40+60	40+60+80	40+60	40+60+80	40+60	40+60+80	40+60	40+60+80
	(kg ha ⁻¹)																			
1	5022	5389	ns		4820	ns		5483		5459	**		5459	**		5459	**		5459	**
2	8202	8643	ns		8195	ns		9378		9893	**		9893	**		9893	**		9893	**
3	6387	6372	ns		6627	ns		6458		6848	ns		6848	ns		6848	ns		6848	**
4	4487	4472	ns		4307	ns		4128		4969	ns		4969	ns		4969	ns		4969	ns
5	5538	5683	ns		5440	ns		5719		5702	ns		5702	ns		5702	ns		5702	ns
6	4546	5189	**		4750	ns		4672		4891	ns		4891	ns		4891	ns		4891	**
7	5401	6166	*		5292	ns		5729		6197	ns		6197	ns		6197	ns		6197	**
8	6782	7059	ns		7021	ns		7562		7454	**		7454	**		7454	**		7454	**
9	5032	5036	ns		4577	ns		5055		4654	ns		4654	ns		4654	ns		4654	ns
10	5854	5921	ns		6499	ns		6239		6208	ns		6208	ns		6208	ns		6208	ns

*** y ** significativo al nivel 0,1% y 1% respectivamente. ns=no significativo.

Tabla 6. Contenido en proteína (g kg⁻¹) obtenido en cada experimento (Exp.) con las diferentes dosis y repartos fertilizantes y significación de la comparación entre el contenido de proteína del tratamiento 40+60 y los de los tratamientos 40+60+40, 40+60+60 y 40+60+80. La correspondiente desviación estándar se muestra entre paréntesis.

Exp.	40+60		40+60 vs 40+100		40+60+40		40+60 vs 40+60+40		40+60+60		40+60 vs 40+60+60		40+60+80		40+60 vs 40+60+80	
	40+60	40+100	40+60	40+100	40+60+40	40+60+60	40+60+40	40+60+60	40+60+60	40+60+60	40+60+60	40+60+60	40+60+80	40+60+80	40+60+80	40+60+80
(g kg ⁻¹)																
1	97,9	97,3	ns	ns	153,8	132,2	***	***	132,2	132,2	***	*	123,3	123,3	***	***
2	127,6	132,5	ns	ns	129,3	137,6	ns	ns	137,6	137,6	*	*	131,3	131,3	***	***
3	103,7	121,7	**	**	127,8	133,5	***	***	133,5	133,5	*	*	139,9	139,9	*	***
4	102,1	110,7	ns	ns	127,5	120,9	**	**	120,9	120,9	*	*	122,5	122,5	*	*
5	142,1	139,6	ns	ns	144,8	148,4	ns	ns	148,4	148,4	*	*	155,2	155,2	*	*
6	116,2	134,8	***	***	133,6	139,2	**	**	139,2	139,2	*	*	142,5	142,5	***	***
7	115,6	132,1	**	**	134,8	137,7	**	**	137,7	137,7	*	*	138,8	138,8	***	***
8	89,7	102,2	ns	ns	112,4	113,2	*	*	113,2	113,2	*	*	113,6	113,6	*	*
9	108,1	124,9	***	***	132,4	140,2	***	***	140,2	140,2	*	*	127,8	127,8	***	***
10	113,1	133,2	**	**	119,6	136,0	ns	ns	136,0	136,0	*	*	123,4	123,4	*	*

***, ** y * significativo al nivel 0,1%, 1% y 5% respectivamente. ns=no significativo.

4.4.2. Estrategia de baja fertilización

La comparación entre los tratamientos 40+60 y 40+100 reveló que la reducción de la segunda aplicación de N de 100 a 60 kg ha⁻¹ solo afectó al rendimiento en dos experimentos (Tabla 5). Sin embargo, el aumento de la segunda aplicación de N de 60 a 100 kg ha⁻¹ sobre la primera de 40 kg N ha⁻¹ provocó una notable respuesta en proteína que aumentó de 111 a 129 g kg⁻¹ (Tabla 6). Se tuvo en cuenta que Brown y Petrie (2006) comprobaron que el contenido de proteína en grano aumentaba con las aplicaciones tardías de N entre Z53 a Z59, sobre todo cuando se aplicaba menos N con anterioridad. Así se diseñó una estrategia de baja fertilización nitrogenada consistente en la aplicación del tratamiento 40+60 que podía ser opcionalmente suplementada con una tercera aplicación tardía de 40, 60 u 80 kg N ha⁻¹ con el fin de que aumentara el contenido de proteína en grano aún manteniendo el rendimiento.

El contenido de proteína en grano aumentó en casi todos los experimentos con una tercera aplicación sobre el tratamiento 40+60 en Z37 incluso con la dosis más baja de 40 kg ha⁻¹. Con este tercer aporte de 40 kg N ha⁻¹ ya se obtenían contenidos de proteína de al menos 125 g kg⁻¹ en ocho de diez ensayos, siendo éste el contenido de proteína en grano mínimo exigido por el comprador del grano para que al agricultor se le pague una prima (Tabla 6). Además, aumentaba el número de experimentos que respondían al tercer aporte según la dosis de éste se elevaba de 40 a 80 kg N ha⁻¹ (Tabla 6). Sowers et al (1994) también observaron que el contenido de proteína en grano aumentaba con la aplicación de un tercer aporte. Dado que se pensaba que el reparto de la

fertilización en tres aportes en vez de en dos podría disminuir la cantidad de nitrato lixiviado, se barajó la aplicación del tratamiento 40+60 suplementado con una posible tercera aplicación de como máximo 40 kg ha⁻¹, en las zonas vulnerables, ya que la dosis de fertilización nitrogenada permitida en estas zonas es como máximo de 140 kg N ha⁻¹. Tal y como se observa en el siguiente capítulo, el mayor reparto de la dosis de 140 kg N ha⁻¹ no pareció favorecer la reducción de a cantidad de nitrato lixiviado por lo que finalmente el tratamiento 40+60+40 no parece apropiado para las zonas vulnerables. La elección de este tipo de tratamiento en otra zonas distintas a las vulnerables a los nitratos en las que la tercera aplicación podría ser mayor que 40 kg N ha⁻¹ (i.e. 60 u 80 kg N ha⁻¹ kg N ha⁻¹) se reforzaría si los contenidos de proteína en grano se primasen económicamente.

4.4.3. Uso del N-Tester®

Respecto al uso del N-Tester® como una herramienta de decisión sobre la conveniencia de la aplicación de un tercer aporte, se observó que una tercera aplicación sobre el tratamiento 40+60 en los experimentos donde las lecturas de NTR32 eran mayores de 91% no tenía en general efecto sobre el rendimiento del trigo incluso con la dosis más alta estudiada de 80 kg N ha⁻¹ (Figs. 2A, 2B, 2C). Esto era probablemente debido a que a) el trigo estaba suficientemente nutrido, b) la aplicación extra no era suficiente para producir un rendimiento mayor y/o c) el experimento sufrió condiciones climáticas desfavorables tras Z32 que derivaron en un empeoramiento del estado nutricional. Esta última posibilidad se comprobó en varios casos

mediante el estudio de la evolución de los valores de NTR en el tiempo. Así, cuando se compararon las lecturas de NTR32 y NTR37 se observó que mientras que en la mayoría de experimentos los valores de NTR37 eran similares a los de NTR32, los valores de NTR37 en los experimentos 9 y 10 eran mucho menores que los valores de NTR32 (Fig. 3). Por lo tanto, y a pesar de que Z32 es un estado más temprano y por lo tanto más cómodo para el agricultor con el fin de predecir la necesidad y la dosis de una tercera aplicación, como Denuit *et al.* (2002) también dedujeron, los valores de NTR en Z37 eran más apropiados y producían una lectura más homogénea del estado nutricional nitrogenado. Por lo tanto, se desecharon los valores de N-Tester en Z32 como guía para administrar terceras aplicaciones de N en Z37 y en su lugar se eligieron las lecturas de NTR37 para este fin.

En general, se observó que el rendimiento que se obtenía con el tratamiento 40+60 cuando los valores de NTR37 eran menores de 91% era susceptible de ser mejorado con una tercera aplicación de 60 kg N ha⁻¹ o, más probablemente, con una de 80 kg N ha⁻¹ (Figs. 2A, 2E, 2F) siempre que lloviera lo suficiente para su absorción, aparentemente más de 20-30 mm en las quincenas anterior y posterior a la administración de la tercera aplicación. Así el rendimiento no fue significativamente mayor para el tratamiento 40+60+80 que para el tratamiento 40+60 en los experimentos 9 y 10 dado que fue en estos experimentos donde menos llovió en torno a Z37 (Tabla 1), lo que derivó en la ineficacia de la tercera aplicación nitrogenada (Fig. 2F). En este sentido, tal y como Arregui *et al.* (2006) sugirieron, se debe enfatizar la importancia de la lluvia como un factor de la producción y remarcar que los experimentos

se desarrollaron en condiciones de secano y en un clima mediterráneo húmedo, con una mayor probabilidad de lluvias tardías que en otras zonas productivas de España, generalmente bajo condiciones climáticas mediterráneas.

Cuando los valores de NTR37 fueron mayores de 91% el rendimiento era susceptible de ser mejorado con una tercera aplicación de 80 kg N ha⁻¹ (Figs. 2F). y con una probabilidad del 50% con 80 kg N ha⁻¹

En la elección de un tercer aporte extra sobre el tratamiento 40+60 cuando el contenido de proteína en grano era el mayor objetivo, se observó que cuando los valores de NTR 37 eran inferiores a 92%, casi todos los experimentos respondían positivamente a un tercer aporte de incluso solamente 40 kg ha⁻¹ en Z37 sobre el tratamiento de 40+60. El número de los experimentos que respondían aumentaba según la dosis del tercer aporte se incrementaba de 40 a 60 kg ha⁻¹ (Tabla 6).

Cuando los valores de NT37 eran mayores que 92%, todos los experimentos respondieron positivamente a un tercer aporte de 60 kg N ha⁻¹.

Por lo tanto, según los valores de NTR37, las recomendaciones para incrementar el contenido de proteína en grano serían las siguientes: para valores de NTR37 menores de 92%, la aplicación de 40 kg N ha⁻¹ sobre el tratamiento 40+60 serían suficientes para obtener mayores contenidos de proteína, mientras que se necesitaría aplicar al menos 60 kg ha⁻¹ cuando los valores de NTR37 fueran mayores de 92%. De manera similar, Debaeke *et al.* (2006) describieron un valor relativo del medidor de clorofila SPAD de 91% en Z39 por debajo del cual variedades de bajo contenido proteico necesitaban aportes tardíos

extra de N bien en cuando la vaina de la última espiga estaba en zurrón (Z40) o a mediados de anthesis (Z65) con el fin de producir contenidos de proteína similares a los propios de variedades de alto contenido proteico.

Figura 2. Valores de N-Tester relativizados en Z32 (NTR32) y en Z37 (NTR37) en relación al rendimiento obtenido con los tratamientos 40+60+40, 40+60+60 o 40+60+80. Los experimentos en los que se han encontrado diferencias significativas entre los tratamientos indicados y 40+60 se muestran con puntos blancos y los que no con rombos negros.

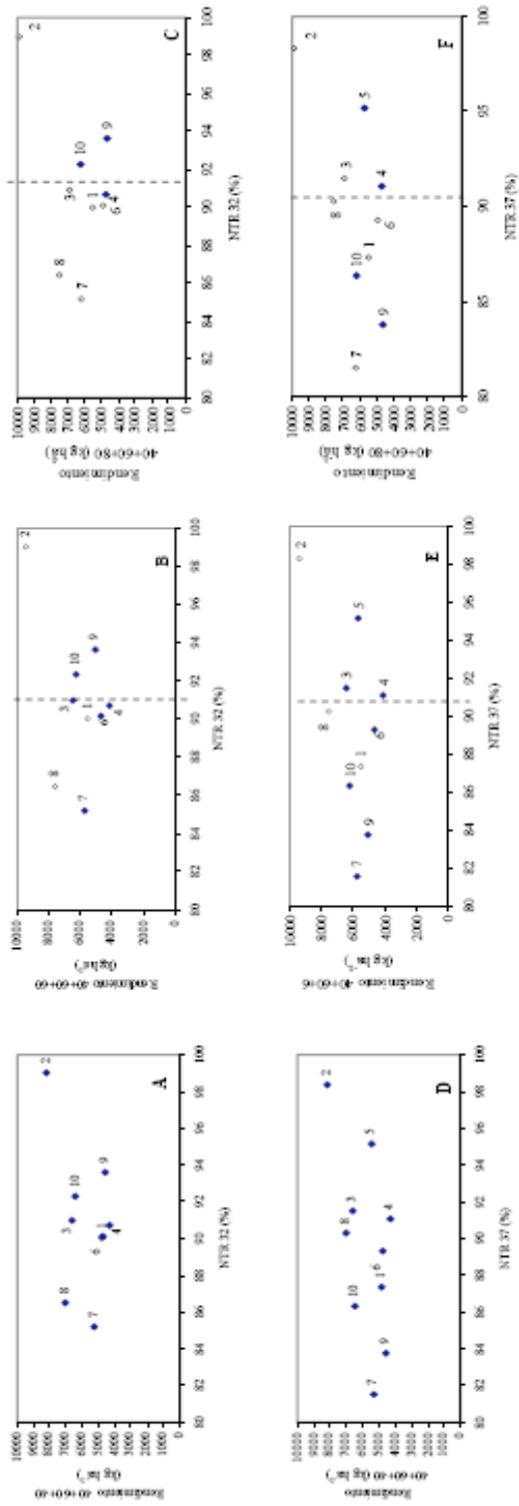
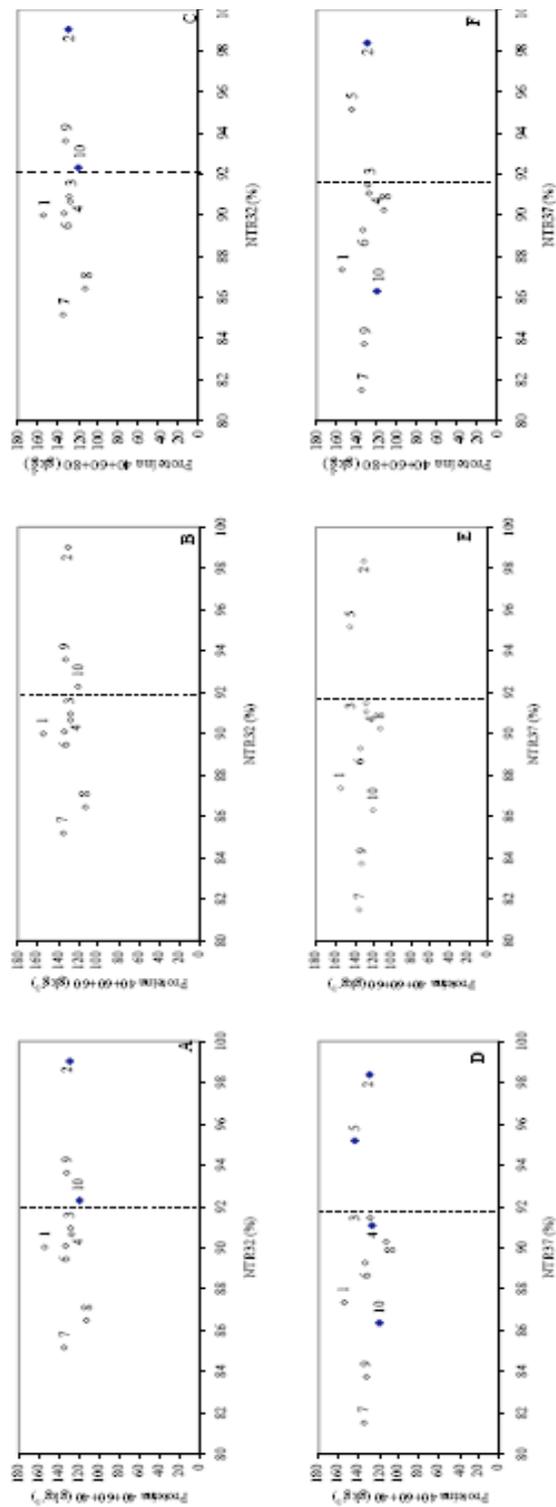


Figura 3. Valores de N-Tester relativizados en Z32 (NTR32) y en Z37 (NTR37) en relación al rendimiento obtenido con los tratamientos 40+60+40, 40+60+60 o 40+60+80. Los experimentos en los que se han encontrado diferencias significativas entre los tratamientos indicados y 40+60 se muestran con puntos blancos y los que no con rombos negros.



4.5. Conclusiones

1) El reparto de las dosis de 140 y 180 kg ha⁻¹ en tres aplicaciones siendo una de ellas tardía en vez de en dos afectó al rendimiento del 30% de los ensayos observados. Sin embargo, el contenido de proteína en grano se vio significativamente afectado aproximadamente en la mitad de los experimentos estudiados. Así, cuando ocurrieron modificaciones significativas, el efecto general de repartir tres veces la fertilización nitrogenada fue el decrecimiento del rendimiento y el incremento del contenido de proteína en grano.

2.) Debido al efecto nulo o negativo del fraccionamiento en tres aportes en vez de en dos de las dosis 140 y 180 kg N ha⁻¹ sobre el rendimiento y el coste adicional que una tercera aplicación extra de N supondría debido a la utilización de la maquinaria, combustible y mano de obra, los resultados obtenidos nos llevan a no recomendar la aplicación de las dosis de 140 y 180 g N ha⁻¹ en tres aportes vez de en dos cuando el objetivo primordial es el rendimiento y no la proteína. Si la proteína se primase, se debería realizar un estudio económico para evaluar la viabilidad económica del reparto en tres de las dosis 140 y 180 kg N ha⁻¹. En las zonas vulnerables a los nitratos no se pudo recomendar la aplicación del tratamiento 40+60 suplementado con una tercera aplicación de como máximo 40 kg ha⁻¹, debido a que contrariamente a los que se esperaba la aplicación de N fraccionada en dos en vez de en tres aportes no disminuía la cantidad de nitrato lixiviado.

3.) Los valores relativos de N-Tester en Z37 fueron más apropiados que los realizados en Z32 para la recomendación de terceras aplicaciones de N en Z37. En condiciones mediterráneas húmedas, cuando los valores de NTR fueron inferiores de 91% el rendimiento obtenido con la aplicación del tratamiento 40+60 era susceptible de mejora cuando en Z37 se realizaba una tercera aplicación de 60 kg N ha⁻¹, o con más probabilidad, una de 80 kg N ha⁻¹ siempre que en las quincenas anterior y posterior a la aplicación de tercer aporte lloviera más de 20-30 mm. Por encima de este valor de NTR, la probabilidad de aumentar el rendimiento con la administración de una tercera aplicación de 80 kg N ha⁻¹ sobre el tratamiento 40+60, era del 50%. Con el fin de aumentar el contenido de proteína en grano respecto al obtenido con el tratamiento 40+60 se recomienda la aplicación de sólo 40 kg N ha⁻¹ en Z37 cuando los valores de NTR37 sean inferiores a 92%, mientras que cuando el valor de NTR37 es mayor de 92%, la tercera aplicación recomendada es de 60 kg N ha⁻¹.

Pérdidas de N por lixiviación y en forma gaseosa. Balance de N.

5.1. Introducción

El nitrógeno (N) juega un papel decisivo en el crecimiento y desarrollo del trigo, por lo que la producción y la calidad del trigo se pueden modificar mediante la fertilización nitrogenada. Sin embargo, los cultivos utilizan el N de una forma ineficiente, y por lo general el 50% del N aplicado no es asimilado por las plantas (Tilman *et al.*, 2002; Dobermann y Cassman, 2004). Así, se dan pérdidas de N en forma gaseosa o por lixiviación, generando costes económicos y medioambientales. Entre los costes económicos, destacan aquéllos derivados de la disminución de la eficacia del uso del N. Entre los principales costes medioambientales destacan la contribución al efecto invernadero debida a la emisión de algunos compuestos gaseosos de N (Bouwman, 1990), la lluvia ácida (Kennedy, 1992) y la contaminación y eutrofización de las aguas derivadas de la lixiviación de nitratos mayor profundidad que la zona radicular (Schröder, 1990; Addiscot *et al.*, 1991; Follet *et al.*, 1991). En este sentido en Álava, Arrate *et al.* (1997) describen varios cambios de manejo en el terreno cultivable en Álava durante los años 1967-1997 (drenaje de los humedales, aplicación de grandes cantidades de fertilizante, aplicación de fitosanitarios, etc.) que indujeron al aumento progresivo de la

concentración de compuestos nitrogenados en las aguas subsuperficiales. Por ello y en aplicación de la directiva europea 88/778/EEC relativa al agua para consumo humano (EEC, 1980), se designó como zona vulnerable a la polución por nitratos de origen agrícola (ZVN) la zona de Álava correspondiente al sector oriental del acuífero del cuaternario de Vitoria en el año 1999 (GV-EJ, 1999). Esta zona abarca el 38% del área en la que se cultiva trigo en Álava, aproximadamente 9500 ha. En estas zonas, la fertilización nitrogenada está limitada a cantidades iguales o inferiores a 140 kg N ha⁻¹ dependiendo del cultivo previo y de la riqueza del suelo y no está permitida a una distancia de 3 m de cualquier curso de agua.

El óxido nitroso (N₂O) es un gas no muy reactivo con una duración en la atmósfera de unos 150 años (Yamulki *et al.*, 1995). Este gas absorbe la radiación electromagnética en el infrarrojo en varias longitudes de onda en la región comprendida entre 7.7-17 μm (Ramathan *et al.*, 1985) y su efecto invernadero total por unidad de masa es unas 300 veces mayor que el del CO₂ (Rodhe, 1990). En este sentido, se estima que la contribución del N₂O al calentamiento del planeta en los últimos 100 años ha sido aproximadamente del 5% (Watson *et al.*, 1996). Un 90% de las emisiones de N₂O son de origen antropogénico, siendo la agricultura la principal fuente de su emisión (Isermann, 1994). En los suelos el N₂O se puede producir tanto por nitrificación como por desnitrificación (Fig. 1). La nitrificación es un proceso aeróbico microbiano en el que el amonio se oxida primero a nitrito y posteriormente a nitrato. En este proceso de oxidación de

amonio a nitrito, se puede producir y liberar N_2O a la atmósfera (Wrage *et al.*, 2001). Por otro lado, la desnitrificación es un proceso microbiano anaeróbico en el que el carbono orgánico se utiliza como fuente de energía y el nitrato como último aceptor de electrones, reduciéndose a los compuestos gaseosos nitrogenados finales N_2O y N_2 . Los procesos de nitrificación y desnitrificación pueden ocurrir simultáneamente en el suelo ya que las condiciones aeróbicas y anaeróbicas pueden ocurrir simultáneamente en el mismo agregado del suelo (Kuenen y Robertson, 1994).

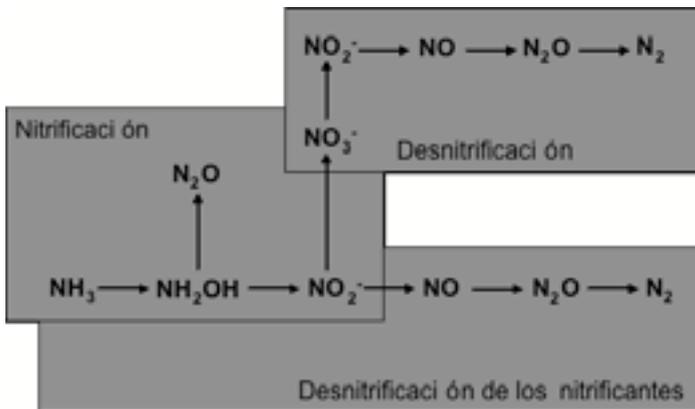


Figura 1. Transformación del nitrógeno mineral en el suelo (Wrage *et al.*, 2001).

El balance de N permite el conocimiento de la evolución del N en el sistema suelo-planta en un periodo de tiempo conocido. A partir de la elaboración del balance también se pueden conocer las fuentes de N distintas a la fertilización, y la tasa de transferencia entre los distintos compartimentos de N, los mecanismos principales de pérdida de N y

qué cantidad de N no es susceptible de ser recuperada (Mary, 1997). Por lo tanto, la determinación del balance de N en un sistema de cultivo ayuda a explicar ciertos parámetros que determinan la dosis de N que necesita el cereal (Lasa *et al.*, 2002), optimizando la nutrición nitrogenada de la planta y disminuyendo el peligro de contaminación.

El objetivo de este capítulo fue cuantificar las pérdidas de N en forma de nitrato lixiviado y en forma gaseosa y estudiar las variables que afectaban a dichas pérdidas. Así mismo, se pretendía determinar el balance de N en el sistema suelo-planta.

5.2. Materiales y Métodos

5.2.1. Establecimiento del ensayo

Se llevó a cabo un experimento de fertilización nitrogenada en Gauna, Álava (pluviometría media anual 779 mm y 11.5 °C de temperatura media anual) de noviembre de 2001 a febrero de 2004 durante tres campañas consecutivas. El ensayo se encuentra en el Sector Occidental del acuífero de del cuaternario de Vitoria que es colindante a la zona vulnerable a la contaminación de nitratos de origen agrícola. El ensayo se organizó en bloques al azar con cuatro repeticiones en las que cada parcela elemental abarcaba un área de 50 m². El suelo sobre el que se estableció el ensayo se clasificó como Aquertic Eutrudept (Soil Survey Staff, 2006) y estaba precedido por trigo. Algunas propiedades del suelo se muestran en la Tabla 1. Las fechas en las que se realizaron la

siembra, el primer, segundo y tercer aporte de la fertilización nitrogenada y la cosecha se muestran en la Tabla 2. Antes de la siembra se aplicaron 90 kg ha^{-1} de $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ y 90 kg ha^{-1} de $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$ como 0-14-14. Se aplicaron dosis de nitrógeno de 0, 140 y 220 kg N ha^{-1} como nitrato amónico (33.51% N g/g) en dos o tres aportes tal y como se describe en la Tabla 3. Se incluyó un tratamiento control en el que no se aplicaba N, como testigo del experimento. El tratamiento en el que se administraban 140 kg N ha^{-1} se aplicó en dos o tres aportes (Tabla 3) para observar el efecto del fraccionamiento y para evaluar el efecto de la estrategia de baja fertilización en tres aportes propuesta en el capítulo IV como posible gestión de la fertilización nitrogenada en las zonas vulnerables.

Tabla 1. Propiedades del suelo del experimento realizado en Gauna (Álava).

	Profundidad (cm)	
	0-30	30-60
Arena (%)	45,18	48,25
Limo (%)	27,14	39,21
Arcilla (%)	27,67	12,49
pH	7,98	8,13
Materia orgánica (%)	2,12	1,52
Fósforo (P) ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	43,30	32,53
Potasio (K) ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	135,00	93,00
Carbonatos (%)	11,90	22,00

*K (NH_4AcO), P (Olsen, 1965), pH (1:2,5 suelo: agua), Materia orgánica (Walkey, 1935), arena, limo y arcilla (Gee y Bauder, 1986)

5. PERDIDAS Y BALANCE DE N

Tabla 2. Fechas de siembra, primer, segundo y tercer aporte nitrogenado, cosecha y laboreo.

Siembra	Primer aporte	Segundo aporte	Tercer aporte	Cosecha	Laboreo
30/11/2001	4/03/2002	08/04/2002	13/05/2002	24/07/2002	
29/10/2002	20/01/2003	24/03/2003	12/05/2003	08/07/2003	17/11/03
20/11/2003	16/03/2004	15/04/2004	20/05/2004	28/07/2004	

Tabla 3. Dosis y reparto de los tratamientos de fertilización nitrogenada.

Dosis (kg N ha ⁻¹)	Tratamiento	Reparto (kg N ha ⁻¹)*		
		Inicio de ahijado (Z20)	Inicio de encañado (Z30)	Hoja bandera (Z37)
0	0	0	0	0
140	40+100	40	100	0
140	40+60+40	40	60	40
220	80+140	80	140	0

*Z20, Z30 y Z37 corresponden a la escala Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974)

5.2.2. Nitrógeno mineral (N_{min})

Las dos primeras medidas de N_{min}, (N amónico más N nítrico), a inicio de ahijado y salida de invierno de 2001, se determinaron a partir de una mezcla de ocho muestras repartidas por todo el ensayo tomadas a las profundidades de 0-30 y 30-60 cm. Posteriormente todos los valores de N_{min} se determinaron de una mezcla de dos muestras por tratamiento, bloque y profundidad. Estas muestras se tomaron antes de la siembra, en la salida invierno coincidiendo con Z20 y tras la cosecha en todos los años y en todos los tratamientos excepto en la

salida de invierno del año 2003, que sólo se tomaron muestras del tratamiento control.

Las muestras de suelo se desmenuzaron manualmente desechando de ellas piedras, raíces y cualquier otro tipo de material vegetal. A continuación, se determinó la humedad de las muestras gravimétricamente.

Se añadieron 200 mL de KCl 1M a 100 g de suelo y la mezcla se agitó durante 30 minutos. Tras su filtrado, se analizó el nitrógeno de origen nítrico del filtrado mediante inyección de flujo segmentado (Alpkem, 1986, 1987). El cálculo de Nmin por hectárea se corrigió según el contenido de elementos gruesos del suelo (Tabla 4).

Tabla 4. Densidad aparente (g cm^{-3}) y elementos gruesos (% g/g) en las profundidades 0-20, 20-40 y 40-60 cm.

Profundidad (cm)	Densidad aparente suelo (g cm^{-3})	Elementos gruesos (% g/g)	Densidad aparente suelo sin piedras (g cm^{-3})
0-20	1,57	20,8	1,4
20-40	1,59	21,5	1,4
40-60	1,93	42,6	1,6

5.2.3. Nitrato lixiviado

Se insertaron dos cápsulas de cerámica por tratamiento y bloque a 60 cm de profundidad (Fig. 2). Como comprobación en la cosecha del año 2003 se realizó una calicata en la que se observó que las raíces del trigo

llegaban como máximo a 60 cm de profundidad, por lo que se asumió que la profundidad de las cápsulas cerámicas era la adecuada para considerar que el nitrato recogido no era extraíble por las plantas. Se recogieron muestras de lixiviados de las cápsulas cuando la pluviometría sumaba 20-40 mm o cada 15 días. La primera muestra tras cada inserción de cápsulas se extrajo pero no se analizó. Las fechas de muestreo estuvieron comprendidas entre el 20 de diciembre de 2002 y el 18 de septiembre de 2003 y entre el 9 de enero y el 27 de septiembre de 2004. En ambos periodos se retiraron las cápsulas para cosechar el trigo y a continuación se volvieron a insertar. Tras cada muestreo se realizaba un vacío parcial de unos 50 kPa en cada cápsula mediante una bomba de vacío manual. Posteriormente se analizó la concentración de nitratos en el agua recogida mediante inyección de flujo segmentado (Alpkem, 1986, 1987).

El balance hídrico se determinó en las capas de 0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad en base al método simplificado en cascada de Campbell (1985), en el que se considera que cada capa de suelo se llena antes de que el agua fluya hasta la siguiente (Eqs. 1, 2 y 3). Cada vez que se tomaba muestra de lixiviado se determinaba la humedad del suelo para las tres capas con objeto de calcular la variación en la reserva de agua. Para cada una de las capas la humedad del suelo se determinó tanto gravimetricamente como mediante un medidor TDR (Time Domain Reflectometry) de la marca IMKO con el fin de elaborar una curva de calibración. Sin embargo y, tras comprobar que no existía relación entre ambas medidas, se optó por utilizar únicamente las medidas gravimétricas.



Figura 2. Caña para recogida de lixiviados insertada en el suelo.

El balance hídrico en la capa de 0 a 20 cm se determinó según la Eq. 1:

$$D_{20} = Pr - ETc \pm VR_{20} \quad [1]$$

Donde D_{20} es el drenaje por debajo de 20 cm (mm), Pr la precipitación (mm), ETc la evapotranspiración del cultivo (mm) calculada según la metodología FAO (Allen *et al.*, 1998) y VR_{20} es la variación de la reserva de agua en la capa 0-20 cm (mm).

El drenaje por debajo de 40 y 60 cm se calculó según las Eqs. 2 y 3 respectivamente:

$$D_{40} = D_{20} \pm VR_{40} \quad [2]$$

Donde VR_{40} es la variación de la reserva de agua en la capa 20-40 cm (mm) y D_{40} es el drenaje por debajo de 40 cm (mm)

$$D_{60} = D_{40} \pm VR_{60} \quad [3]$$

Donde VR_{60} es la variación de la reserva de agua en la capa 40-60 cm (mm) y D_{60} es el drenaje por debajo de 60 cm (mm)

Finalmente, la masa de N drenada durante el periodo de muestreo se calculaba mediante la Eq. 4:

$$N_i = D_{60} \cdot [N]_i \cdot 10^{-2} \quad [4]$$

Donde, N_i es la masa de nitrógeno de origen nítrico drenada por periodo y tratamiento (kg N ha^{-1}), D_{60} es la pérdida de agua por percolación profunda en el periodo entre muestreos (L m^{-2}) y $[N]$ es la concentración de nitrógeno nítrico en el lixiviado recogido al final del periodo i (mg L^{-1}).

Finalmente se sumaron los valores obtenidos en la Eq. 4 para cada tratamiento y día de muestreo en el periodo comprendido entre la inserción de cápsulas y su retirada con el fin de calcular la masa de nitrógeno lixiviada por hectárea a lo largo de dicho periodo.

Se instaló un piezómetro próximo al ensayo con el fin de reconocer aquellos momentos en los que el nivel del agua estuviera por encima de 60 cm. Esto ocurrió los días 5 de febrero y 7 de mayo de 2003 y 11 de marzo y 1 y 30 de abril de 2004 cuando el nivel del piezómetro fue superior a 60 cm.

5.2.4. Pérdidas gaseosas

5.2.4.1. Emisiones de N_2O

Con el fin de identificar el efecto de la aplicación del fertilizante sobre las emisiones de N_2O (N_2O_{em}), el año 2002 se midieron dichas

emisiones en las semanas posteriores a las aplicaciones de fertilización nitrogenada, desde el 4 de marzo de 2002 hasta el 17 de mayo de 2002. Durante este periodo las determinaciones se hicieron cada dos días en los tratamientos 0, 40+100, 40+60+40 y 80+140. En el año 2003 se realizaron medidas más exhaustivas con el fin de conocer no sólo las diferencias de emisión tras las fertilizaciones, sino también con el objetivo de estudiar las emisiones de N_2O del suelo tras la cosecha y el laboreo y determinar los efectos de la temperatura y humedad del suelo sobre las emisiones. Así, este año se muestreó cada dos días tras la aplicación de fertilizante nitrogenado durante dos semanas y cada quince días desde el 20 de enero de 2003 hasta el 4 de febrero del año 2004 en los tratamientos 0, 40+100 y 80+140. En torno al laboreo se intensificó nuevamente el muestreo.

Para llevar a cabo las citadas medidas se insertaron en el suelo a una profundidad de 2 cm dos cámaras herméticas de 3 L de polivinil cloruro (PVC) provistas de un septo de goma (Figura 3) en todas las repeticiones. Antes de su colocación se tomaron 4 muestras de 10 mL de la atmósfera del experimento a 2 m de altura. Pasados 45 minutos, se tomaron 4 muestras de 10 mL del aire de cada cámara y se almacenaron en tubos de recogida de sangre Vacutainer®. Posteriormente se analizó el N_2O en las muestras mediante un cromatógrafo de gases (Unicam 8925) con detector de captura de electrones (ECD). En el momento en el que se realizó el muestreo en el campo se midió la temperatura del aire a 2 m de altura y la del suelo a 10 cm de profundidad. En el año 2003 se midió también la humedad de los primeros 30 cm de suelo por gravimetría en cuatro puntos a lo largo del ensayo.



Figura 3. Cámara insertada en el suelo.

A partir de la medida de humedad del suelo se calculó el porcentaje de poros llenos de agua (PPLA) según la ecuación 5.

$$PPLA = H \rho_{ssp} / (1 - \rho_{ssp} / 2,65) \quad [5]$$

Donde PPLA es el porcentaje de poros llenos de agua (% ml/ml), H el: porcentaje de agua en suelo seco para la capa de 0-30 cm (% g/g), y ρ_{ssp} : Densidad aparente del suelo sin piedras (g cm^{-3}).

La densidad aparente del suelo es el cociente entre el peso de las partículas sólidas del suelo y el volumen total “in situ”. Esta se calculó como la media de los valores obtenidos en cuatro agujeros hechos en el ensayo en los perfiles de 0-20, 20-40 y 40-60 cm por el método de excavación (Blake y Hartge, 1986) con la variante de calcular el volumen mediante la aplicación de resina de poliuretano (Wolf, 1996). Debido al carácter pedregoso del terreno la medida de la densidad aparente en cada perfil del suelo exigía una corrección. Ésta se obtuvo considerando el porcentaje de elementos gruesos (aquellos que no

pasan por un tamiz de 2 mm) del suelo (Tabla 4) y la densidad de los mismos considerada como $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ (Rowell, 1994).

5.2.4.2. Producción de N_2O y desnitrificación total en la capa arable

Desde el 23 de enero hasta el 18 de septiembre de 2003 simultáneamente a las determinaciones de la emisión de N_2O se midió para los mismos tratamientos la tasa de producción de N_2O en la capa arable (N_2Oprod). Con este objetivo, se tomaron dos muestras cilíndricas de 30 cm de largo y 2,65 cm de diámetro de cada parcela correspondientes a los tratamientos a estudio. Estas dos muestras se transfirieron a un bote hermético de 2 L provisto de un septo de goma (Figura 4). A continuación los botes de las distintas parcelas se introdujeron en un agujero realizado en el suelo próximo a cada parcela a estudio, se cubrieron con suelo del mismo agujero y se mantuvieron incubando durante 24 horas. De esta manera se conseguía reproducir la temperatura real del suelo así como sus variaciones. Pasadas las 24 horas se recogieron dos muestras de 10 mL de la atmósfera de cada bote y se almacenaron en tubos Vacutainer® para su posterior determinación de N_2O por cromatografía de gases (Unicam 8925). Se procedió de la misma manera con otros tantos botes a los que se les inyectó 100 mL de acetileno (C_2H_2) creando en el bote una atmósfera del 5% C_2H_2 (Air Liquide, SA) (Figura 4). El C_2H_2 bloquea tanto la reducción de N_2O a N_2 en el proceso de desnitrificación como la oxidación del amonio en el de nitrificación (Okereke, 1984). Por lo tanto el N_2O producido en la incubación con una atmósfera del 5% de

C_2H_2 indica la tasa de producción conjunta de N_2O+N_2 por desnitrificación (N_{desni}) (Aulakh *et al.*, 1992; Knowles, 1981).

Las pérdidas acumuladas de N se calcularon por integración de las tasas diarias de N_{2Oem} , N_{2Oprod} y N_{desni} a lo largo del tiempo.



Figura 4. Bote de incubación antes de su enterrado y bolsa y jeringa con acetileno.

5.2.5. Extracción de N por la planta

Para determinar la extracción de N por el trigo en la parte aérea en el momento de cosecha se eligió al azar un área de 0.25 m^2 en cada parcela de todos los bloques y se cortaron las plantas de este área a ras del suelo. El grano y la paja se separaron y se secaron en el horno a 70°C durante al menos 48 h para conocer la biomasa y a continuación se molieron y se pasaron por un tamiz de 0,5 mm y 1 mm respectivamente. El N total se determinó tanto en paja como en grano mediante el procedimiento Kjeldahl (AOAC, 1999) con un analizador Kjeltex Auto sampler System 1035 (Tecator). La absorción de N por la parte aérea de la planta (N_{ab}) se calculó como la suma de los productos de la concentración de N en grano y paja por sus respectivas biomásas.

La cantidad de grano producida necesaria para el cálculo anterior se determinó cosechando el pasillo central de 1,5 m de cada parcela. El rendimiento se ajustó a un contenido de humedad de 120 g kg^{-1} .

5.2.6. Balance de nitrógeno

Los balances de N se basan en la aplicación del principio de conservación de masa a los sistemas de cultivo. Así, la variación en la cantidad de N almacenado en un sistema será igual a la diferencia entre las entradas y salidas del sistema (Meisinger y Randall, 1991). Es muy frecuente realizar el balance de N considerando las entradas y salidas respecto a una fuente principal, el Nmin en suelo. Éste se considera disponible para las plantas aunque a su vez, es susceptible de ser asimilado por los microorganismos, de perderse en forma gaseosa o de ser lixiviado (Quemada *et al.*, 2006). El balance de N se calculó según la Eq. 8 (Legg y Meisinger, 1982):

$$N_{\text{minS}} + \text{Min} + F = N_{\text{ab}} + N_{\text{abr}} + N_{\text{lix}} + N_{2\text{Oem}} + N_{\text{minDC}} + N_{\text{c}} \quad [8]$$

Donde, N_{minS} : cantidad de Nmin en suelo antes de la siembra (kg N ha^{-1}), Min: fracción de N aportada por el suelo por la conversión del nitrógeno orgánico a amonio (kg N ha^{-1}). Se calcula del ajuste del balance para el tratamiento control, i.e. 0 (kg N ha^{-1}), F: cantidad de N aplicado como fertilizante (kg N ha^{-1}), N_{ab} : N absorbido por la parte aérea de la planta (kg N ha^{-1}), N_{abr} : N

absorbido por las raíces de la planta (kg N ha^{-1}). Se estimó que era de un 25% respecto a N_{ab} (Rroço y Mengel, 2000), N_{lix} : N lixiviado (kg N ha^{-1}), N_{2Oem} : N emitido como N_2O (kg N ha^{-1}), N_{minDC} : Nmin en el suelo después de la cosecha (kg N ha^{-1}), N_c : N no computado.

Por lo tanto, un valor de N_c positivo significa que: i) las entradas se han sobreestimado por el error cometido en su cálculo y/u obtención experimental, ii) las salidas se han infravalorado por las mismas razones que en el punto i, iii) existen otras salidas de N que no se han tenido en cuenta y iv) se da la combinación de varias o todas las situaciones citadas.

Se optó por introducir N_{2Oem} en el balance en vez de N_{2Oprod} o N_{desni} porque estas dos últimas medidas se refieren a gases producidos en la capa arable y no tienen porque suponer una salida del sistema suelo-planta en su totalidad, mientras que el N_{2Oem} si se refiere a la salida de N en forma de N_2O del sistema a la atmósfera.

5.2.7. Eficiencia de uso del nitrógeno

Para el cálculo de las eficiencias del uso del N, se definieron los siguientes parámetros (Huggins y Pan, 1993):

Eficiencia del uso del fertilizante (EUF): diferencia entre N_{ab} del tratamiento fertilizado y el del testigo, dividido por la cantidad de fertilizante aplicado.

Índice de cosecha del N (ICN): cociente entre el N en grano y el extraído por la parte aérea del cultivo (adimensional).

5.2.8. Estadística

Se utilizó el procedimiento PROC GLM (SAS, 1998) para realizar el análisis de varianza y posteriormente determinar las diferencias entre medias según el test de Duncan.

5.3. Resultados y Discusión

5.3.1. *N mineral*

Mediante el análisis del N_{min} se observó que en torno al 80-95% del N del N mineral (N_{min}) analizado en el suelo del ensayo fue de origen nítrico (Tabla 5). El tratamiento testigo resultaba en los menores porcentajes de N nítrico en cada momento y profundidad en comparación con los porcentajes obtenidos en los tratamientos fertilizados debido a que no se fertilizaba. El porcentaje de N nítrico se mantuvo o aumentó con la profundidad, (i.e. de 0-30 a 30-60 cm) excepto en los momentos de después de cosecha en los años 2003 y 2004, cuando el porcentaje de N nítrico fue algo inferior en la capa de 30-60 cm presumiblemente por la extracción profunda y reciente del cultivo hasta cosecha, momento cercano al que en este trabajo se refiere como después de cosecha.

5. PERDIDAS Y BALANCE DE N

Tabla 5. Porcentaje de N de origen nítrico respecto al N_{min} del suelo en diferentes profundidades, momentos y tratamientos.

Momento	Profundidad (cm)	Tratamiento			
		0	40+100	40+60+40	80+140
		N-NO ₃ ⁻ / N-min (%)			
		2002			
Antes de siembra	0-30			82	
	30-60			96	
Salida de invierno	0-30			78	
	30-60			85	
Después de cosecha	0-30	75	89	94	81
	30-60	83	89	94	84
		2003			
Antes de siembra	0-30	82	86	79	88
	30-60	90	89	89	85
Salida de invierno	0-30	67			
	30-60	43			
Después de cosecha	0-30	92	90	86	92
	30-60	89	89	84	87
		2004			
Antes de siembra	0-30	79	84	86	83
	30-60	79	83	83	88
Salida de invierno	0-30	77	87	83	89
	30-60	79	83	82	91
Después de cosecha	0-30	88	88	94	93
	30-60	80	90	85	84

En la Figura 5 se observa que los valores medios de Nmin de 0 a 60 cm de profundidad en los suelos estudiados durante las campañas 2002, 2003 y 2004 se encontraron entre 12 y 53 kg N ha⁻¹. En el momento de antes de la siembra el Nmin varió entre 24 y 40 kg N ha⁻¹, entre 12 y 31 kg N ha⁻¹ en salida de invierno y entre 16 y 53 kg N ha⁻¹ después de la cosecha. No se percibieron diferencias estadísticas entre tratamientos según el test de Duncan en ningún momento. Estos valores de Nmin son en general inferiores a los observados en otros ensayos realizados en Navarra de 54 a 252 kg N ha⁻¹ (Arregui *et al.*, 2006; Lasa *et al.*, 2006) pero son similares a los valores de Nmin observados en otras zonas de Álava (Ortuzar-Iragorri *et al.*, 2006) y están en el rango indicado por el método de balance del ITCF (2002) en el que se calcula que tras un cultivo precedente de gramíneas el Nmin del suelo estará entre 34 y 58 kg N ha⁻¹. Según el mismo método, la fertilización en Z20 o inicio de ahijado del trigo resultaba necesaria durante los tres años de ensayo de Gauna, ya que el contenido de Nmin en el suelo a una profundidad de 60 cm fue siempre inferior a 60 kg N ha⁻¹.

En cuanto a la evolución del Nmin para el tratamiento testigo se observa que en los años 2002 y 2004 en que la pluviometría entre los momentos de antes de la siembra y salida de invierno fue 111 y 294 mm respectivamente, el Nmin no descendió y se mantuvo en torno a 40 kg N ha⁻¹. Sin embargo, en el año 2003 la pluviometría en el mismo periodo fue mayor, 458 mm, y el Nmin disminuyó de 25 a 12 kg N ha⁻¹. Esto parece indicar que a pesar de que en este caso los contenidos de Nmin son bajos, cuando la pluviometría es alta puede ocurrir el lavado de N, por lo que las aplicaciones de N en el momento de la siembra se desaconsejan.

La pluviometría entre los momentos de salida de invierno y después de la cosecha fue de 268, 147 y 189 mm en los años 2002, 2003 y 2004 respectivamente. En correspondencia al orden decreciente de la pluviometría pero presumiblemente a causa de la combinación de otros factores además de la lluvia, el Nmin correspondiente al tratamiento testigo entre los momentos de salida de invierno y después de cosecha disminuyó en unos 15 kg N ha⁻¹ en el año 2002, se mantuvo en torno a 30 kg N ha⁻¹ el año 2004 y aumentó en unos 25 kg N ha⁻¹ el año 2003 (Fig. 5). Entre los momentos salida de invierno y después de cosecha de los años 2002 y 2004 los valores de Nmin correspondientes al tratamiento 40+100 se mantuvieron y los de 40+60+40 aumentaron. Este hecho sugiere que el tercer aporte en el tratamiento 40+60+40 contribuye o favorece el contenido de Nmin tras la cosecha, probablemente debido a un menor aprovechamiento del tercer aporte por parte de la planta o porque altera el patrón de mineralización del suelo.

El periodo comprendido entre los momentos de después de cosecha y antes de la siembra parecía tener un efecto igualador entre tratamientos. Esto se debía presumiblemente a la lixiviación ocurrida en los meses previos a la siembra que causaba que las parcelas partieran de valores de Nmin similares cada año (en torno a 25 o 40 kg ha⁻¹) a pesar de haber sido tratadas de un modo distinto el año anterior. En este sentido Quemada y Lloveras (2006) indicaban que tampoco en Navarra se observaron diferencias de Nmin en presiembra a pesar de que el cultivo precedente fuera guisante, colza, cereal, girasol o barbecho y apuntaban a que en clima mediterráneo húmedo el Nmin

aportado por las leguminosas podía perderse en el periodo de otoño-invierno.

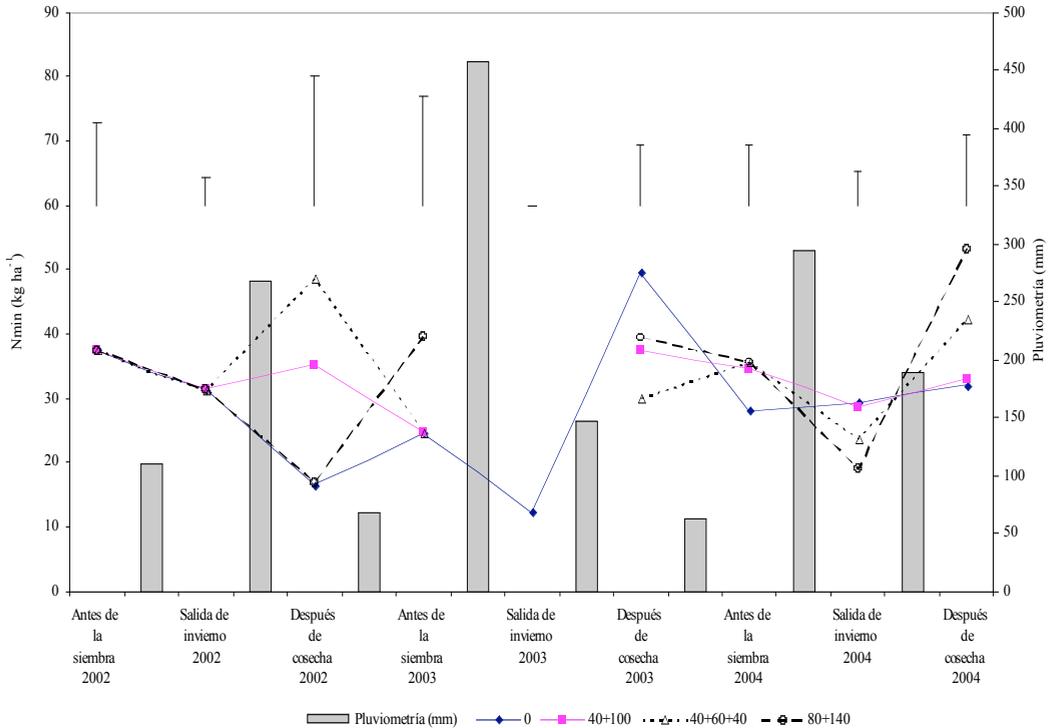


Figura 5. N min en los primeros 60 cm de profundidad (kg N ha^{-1}) y pluviometría (mm) acumulada entre los momentos indicados. Las barras de error indican la mitad de las diferencias mínimas significativas entre tratamientos para un nivel de significación $\alpha=0,05$.

5.3.2. Nitrato lixiviado

En las Figuras 6 y 7 se muestra la evolución de la concentración de nitrato en las muestras de lixiviados recogidas en los años 2003 y 2004 respectivamente.

En el año 2003 se observan varios picos de nitrato se observan varios picos desde el inicio del muestreo hasta el momento del segundo aporte de fertilización nitrogenada, el 24 de marzo de 2003 (Fig. 6A). Los mayores picos de concentración de N-NO_3^- sucedieron los días 30 de enero para los tratamientos 40+100 y 40+60+40 y los días 5 de febrero y 7 de marzo para el tratamiento 80+140 abarcando un rango de concentraciones de N-NO_3^- entre 15,5 y 24,3 mg L^{-1} , que superaba el límite de concentración de 11,3 mg L^{-1} N-NO_3^- permitido para el agua potable (EEC, 1980). El 5 y el 13 de febrero, coincidiendo con un nivel del piezómetro superior a la profundidad de las cápsulas detectado el día 5 de febrero, el tratamiento testigo mostró una concentración de N-NO_3^- superior a la observada en varios o todos los tratamientos fertilizados indicando quizás el mezclado del agua lixiviada de todos los tratamientos e incluso de otras parcelas en estos momentos.

Tras el segundo aporte de fertilización nitrogenada el 24 de marzo de 2003, la concentración de las muestras recogidas disminuyó y se mantuvo en torno a 0-2 mg L^{-1} de N-NO_3^- probablemente debido a la absorción eficiente del N_{min} del suelo por parte de las plantas al ser éste momento, Z20, un estadio fenológico de crecimiento muy activo (Gate, 1995; Alley *et al.*, 1999). El día 7 de mayo no se observó ningún cambio en la concentraciones del nitrato en los diferentes tratamientos por causa de que el nivel freático del agua fuera superior al de las cápsulas, tal y como indicaba el piezómetro.

Tras la tercera aplicación de N en el tratamiento 40+60+40 el día 12 de mayo la pluviometría disminuyó y la concentración de nitrato

de las cápsulas en los tratamientos 40+100 y 80+140 comenzó a crecer hasta describir dos picos de 5,4 y 13,6 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻ respectivamente el día 1 de julio (Fig. 6).

Una vez que se cosechara, se extrajeran y se reinsertaran las cápsulas, el 18 de septiembre de 2003 se observaron concentraciones de N-NO₃⁻ de entre 16,4 y 32,1 mg L⁻¹ en todos los tratamientos. Estos altos valores (incluso en el tratamiento control) se dieron como resultado de las altas temperaturas de septiembre que se reflejaron en el incremento de la temperatura del suelo, y coincidieron con una rehidratación del suelo debida a la lluvia de primeros de septiembre (Fig. 8D). Esto debió provocar una alta tasa de mineralización en el suelo y la subsiguiente acumulación de N_{min} en el suelo debido a la ausencia de plantas para absorberlo. Además en suelos arenosos como el de Gauna la mineralización es mayor que en suelos arcillosos o limosos (Whitehead ,1995) El nitrato⁻ resultante de la mineralización del suelo se lavó con la lluvia de principios de septiembre, dando lugar a tales concentraciones.

En el año 2004 la concentración de nitrato inicial en las cápsulas estuvo comprendida entre 10,3 y 20,3 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻ (Fig. 7A). Estos valores correspondían respectivamente a los tratamientos 0 y 40+60+40 e indicaban el efecto residual del tratamiento del año anterior.

Debido a las importante precipitaciones acaecidas hasta el 2 de abril de 2004 (Fig. 7B), los valores de concentración de nitrato

descendieron hasta 2,6-4,2 mg L⁻¹ el día 2 de abril. Tal y como indican Webster *et al.* (2003), la importancia de la lluvia en la concentración de las muestras fue considerable, ya que en su ensayo de seis años con varios cultivos la concentración de nitrato de los lixiviados a una profundidad de 60 cm fue inferior a 11, 3 mg L⁻¹ sólo en los dos años más lluviosos. El día 15 de abril se observó un aumento de la concentración del nitrato lixiviado correspondiente al tratamiento 80+140 de hasta 7,4 mg L⁻¹ como consecuencia del primer aporte de 80 kg N ha⁻¹ realizado el 16 de marzo de 2004, en este intervalo de tiempo llovieron unos 80 mm.

Tras la segunda aplicación de fertilizante nitrogenado, el 15 de abril, se observaron mayores concentraciones de N-NO₃⁻ hasta cosecha, el 28 de julio de 2004, coincidiendo con un descenso de la pluviometría. La mayor concentración observada en este periodo correspondió al tratamiento de mayor dosis (80+140) llegando al valor de 26,8 mg L⁻¹ en el 26 de julio de 2004 (Fig. 7A).

Al igual en el año 2003 en el otoño del año 2004 se observaron valores altos de concentración de nitrato⁻ en las cápsulas. En este periodo, la menor concentración correspondió al tratamiento testigo y la mayor al tratamiento 80+140, mientras que la concentración en el tratamiento 40+60+40 fue mayor que en 40+100. Por lo tanto, como en el año 2003, se presume que el nitrato medido es el resultante de la mineralización del suelo durante un periodo en que el suelo no está cubierto por un cultivo que lo pueda extraer. Para evitar o disminuir tales pérdidas de N del sistema suelo-planta sería interesante el uso de cultivos de cobertera más teniendo en

cuenta que debido a la textura arenosa del suelo potencial para la lixiviación es mayor (Jensen *et al.*, 1994).

En las tablas 6 y 7 se muestran las cantidades de N-nítrico lixiviado en los periodos comprendidos bien desde el inicio del muestreo hasta cosecha o bien desde el inicio del muestreo hasta el final del mismo. Estadísticamente sólo se observaron diferencias significativas entre el tratamiento 80+140 y el resto de tratamientos en el periodo comprendido entre el inicio de la campaña y cosecha en el año 2003 y en todo el periodo de muestreo en el año 2004. A pesar de que para el tratamiento testigo Webster *et al.* (1993) en el Reino Unido calculaban una lixiviación de 19 kg ha^{-1} , una cifra similar a la calculada en el año 2004 en este trabajo (Tabla 7), la cantidad de 32 kg N ha^{-1} obtenida para el tratamiento 80+140 es inferior a la cantidades de 50 kg N ha^{-1} calculadas por los mismos autores y dosis similares seguramente debido a variables tales como diferentes tipos de suelo, etc. Deduciendo la cantidad de N-nítrico lixiviada en el testigo, las cantidades de N-Nítrico lixiviadas hasta cosecha los años 2003 y 2004 supusieron entre el 4 y el 6% del N aplicado y , sumando este periodo hasta final de periodo de muestreo, fueron de entre el 8 y el 14% del N aplicado como fertilizante.

5. PERDIDAS Y BALANCE DE N

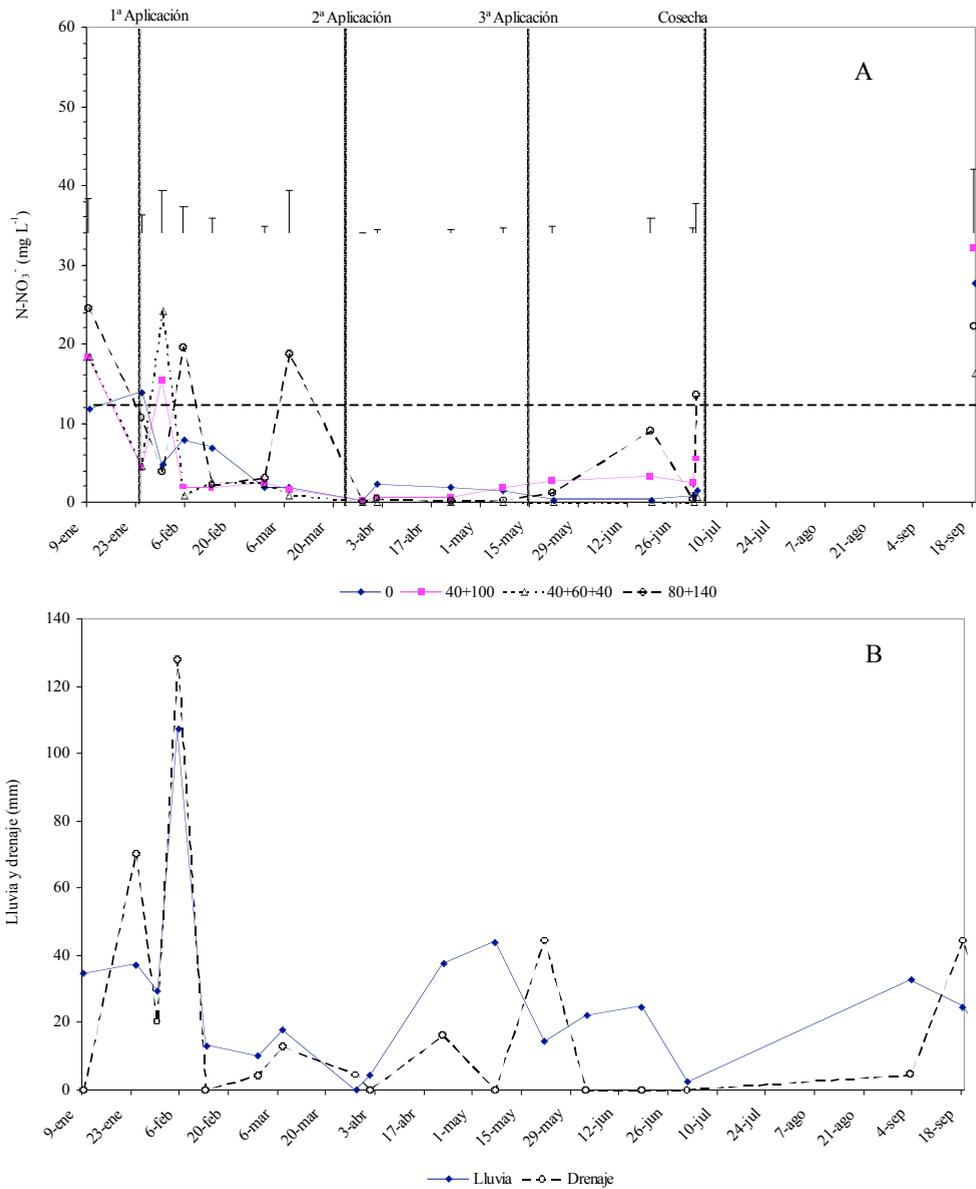


Figura 6. Concentración de nitrato (mg L^{-1}) en el agua lixiviada en el año 2003 (A). Las líneas verticales indican la primera, segunda y tercera aplicación de fertilización nitrogenada y la cosecha. La línea horizontal indica el límite de $11,3 \text{ mg L}^{-1}$ de N-NO_3^- del agua potable. Las barras de error indican la mitad de las diferencia mínima significativa entre tratamientos por día para un nivel de significación $\alpha=0,05$ (A). Lluvia y drenaje (mm) entre los días de muestreo (B).

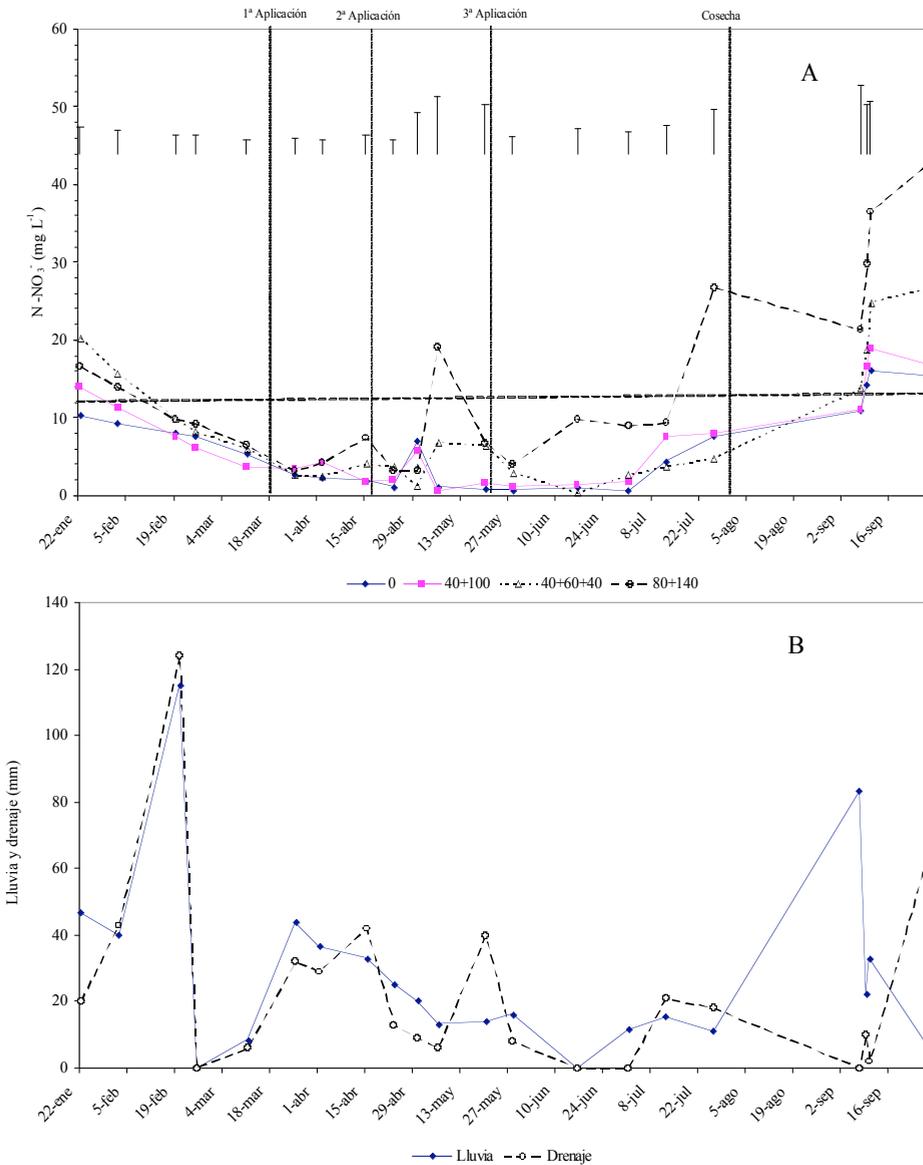


Figura 7. Concentración de nitrato (mg L^{-1}) en el agua lixiviada en el año 2004 (A). Las rayas indican la primera, segunda y tercera aplicación de fertilización nitrogenada y la cosecha. La línea horizontal indica el límite de $11,3 \text{ mg L}^{-1}$ de N-NO_3^- del agua potable. Las barras de error indican la mitad de la diferencia mínima significativa entre tratamientos por día para un nivel de significación $\alpha=0,05$ (A). Lluvia y drenaje (mm) entre los días de muestreo (B).

Tabla 6. N-NO₃⁻ lixiviado desde enero hasta cosecha en el año 2003. Los valores significativamente diferentes ($\alpha \leq 0,05$) se indican con distinta letra.

Tratamiento	N-NO ₃ ⁻ (kg N ha ⁻¹)	Drenaje (mm)	[N-NO ₃ ⁻] medio (mg L ⁻¹)
0	14 b		4 b
40+100	14 b	350	4 ab
40+60+40	12 b		3 b
80+140	23 a		7 a

En concordancia con los resultados obtenidos con el tratamiento 80+140, en un estudio realizado en Dinamarca Kjellerup y Kofoed (1983) observaron que aplicaciones de fertilizante nitrogenado con dosis en torno a 200 kg N ha⁻¹ incrementaban notablemente el nitrato lixiviado en las aguas de drenaje pues rebasaban la capacidad del cultivo de aprovechar el N aplicado y calculaban pérdidas de 40 kg N ha⁻¹. Para trigo en la comunidad autónoma de Navarra, Arregui (2006) también describió la tendencia al incremento de la lixiviación de nitrato con dosis superiores a 110 o 120 kg N ha⁻¹.

Aproximadamente el 50% del N-NO₃⁻ lixiviado en toda la campaña de muestreo de 2004 se lixivió en el periodo comprendido entre después de cosecha y final de muestreo en septiembre para todos los tratamientos (Tabla 7).

Tabla 7. N-NO₃⁻ lixiviado desde enero hasta cosecha y en todo el periodo de muestreo el año 2004. Los valores significativamente diferentes ($\alpha \leq 0,05$) se indican con distinta letra.

Tratamiento	2004 hasta cosecha*			2004 en todo el periodo**		
	N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)	Drenaje (mm)	[N-NO ₃ ⁻] medio (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)	Drenaje (mm)	[N-NO ₃ ⁻] medio (mg L ⁻¹)
0	19 a		5 a	38 b		8 b
40+100	20 a		5 a	41 b		8 b
40+60+40	31 a	371	8 a	62 ab	487	13 ab
80+140	32 a		9 a	70 a		14 a

*desde el 9 de enero de 2004 hasta el 1 de julio de 2004.

**desde el 9 de enero de 2004 hasta el 27 de septiembre de 2004.

En las Tablas 6 y 7 también se muestra la concentración media de N nítrico en la cantidad total de agua drenada, calculándose mediante la división del N total drenado (kg ha⁻¹) acumulado en todo el periodo y el drenaje del mismo periodo (mm).

Así, se observa que la concentración media máxima de N-NO₃⁻ en el periodo de estudio fue de 7 ppm de N en el año 2003 y 14 ppm en el año 2004 para el tratamiento 80+140, que fue el tratamiento que en cuanto a concentración media de N-NO₃⁻, se diferenció significativamente del resto de tratamientos en el año 2003 y del resto de tratamientos excepto el tratamiento 40+60+40 el año 2004 cuando se consideraba todo el periodo de muestreo. Las concentraciones medias en los tratamientos 40+60+40 y 80+140 en el año 2004 cuando se consideró todo el periodo, fueron superiores al límite de 11,3 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻ permitido.

5.3.3. Pérdidas gaseosas

En la Figura 8 se muestran la tasa de emisión de N_2O a la atmósfera (N_2O_{em}) (Fig. 8A), la tasa de producción de N_2O en la capa arable (N_2O_{prod}) (Fig. 8B), la tasa de producción de N_2O+N_2 por desnitrificación total (N_{desni}) (Fig. 8C) y la temperatura y humedad de la capa arable del suelo en los días de muestreo (fig. 8D) desde el 20 de enero de 2003 hasta el 4 de febrero de 2004.

Se observaron cinco picos principales de emisión de N_2O . El primer pico se produjo el día 23 de enero. Como se aprecia en las Figuras 8B y 8C los picos de N_2O_{prod} y N_{desni} son similares en esta fecha. Por esta razón y por las condiciones anaeróbicas del suelo debidas al alto valor de PPLA en torno a esta fecha (Fig. 8D), se deduce que el N_2O se produce por desnitrificación. Sin embargo este pico no se reflejó en N_2O_{em} debido a la difusión limitada por el alto porcentaje de PPLA.

El segundo pico, que tuvo lugar el día 12 de febrero de 2003, se produjo por la combinación de un pequeño aumento de la temperatura del suelo a 4,8 °C y un descenso del PPLA de 101 a 97% como se observa en la Fig. 8D. Davidson (1991) y Menéndez *et al.* (2006) indicaron que los mayores flujos de N_2O por nitrificación se dan entre valores de PPLA de entre 30 y 60% cuando hay suficiente oxígeno, mientras que en el intervalo de 50 a 80% ó 60 a 90% (según las propiedades del suelo) la desnitrificación es el principal proceso productor de N_2O . En nuestro caso, la producción de N_2O (Fig. 8B) y la de N_2O+N_2 por desnitrificación (Fig. 8C) que ocurren en torno a este segundo pico de emisión son de magnitud similar. Dado el alto PPLA

del suelo las pérdidas por nitrificación deberían ser insignificantes y por lo tanto esto supondría que las pérdidas totales por desnitrificación ($\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$) ocurrieron en su mayoría en forma de N_2O y estaría indicando un bajo potencial de reducción de N_2O a N_2 por los organismos desnitrificantes. Este bajo potencial para la desnitrificación de N_2 se deduciría también en la fecha anterior al pico de producción de $\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$. En esta fecha se observó una baja tasa de producción de $\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$ por desnitrificación en todos los tratamientos, cuando el PPLA del suelo se encontraba en su punto máximo con un valor de 101% y era de esperar que la producción de $\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$ por desnitrificación ocurriera en su gran mayoría en forma de N_2 . Sin embargo, en este momento también se observa una mayor producción de N_2O que de $\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$ por desnitrificación en el tratamiento 80+140 lo que indicaría que en este momento la producción de N_2O ocurriría tanto por nitrificación como por desnitrificación (Figs. 8B y 8C). Tal incongruencia se puede achacar al error experimental debido a que al introducir la muestra de suelo en el bote de incubación ésta se expone al aire en toda su superficie, como no lo estaría en el suelo.

El tercer pico de emisión de N_2O que se observa se encuentra en torno al día 27 de marzo de 2003 (Fig. 8A), coincidiendo con el aumento de la temperatura del suelo a 14,5 °C, y un PPLA en torno a 60% y ocurriendo además entre tres y cinco días después de la segunda aplicación nitrogenada. Esto que causó el mayor incremento de la emisión de N_2O para el tratamiento 80+140, produciéndose uno de los mayores valores registrados, (0,15 kg N- N_2O ha⁻¹ día⁻¹). Este valor coincide con el descrito por Menéndez *et al.* (2006) en un ensayo de

trigo realizado en condiciones climáticas mediterráneas en el sur de España donde las emisiones máximas de N-N₂O estuvieron en torno a 0,15 kg ha⁻¹ día⁻¹. En nuestro estudio este pico de emisión de N₂O se vio acompañado por un aumento general de la tasa de N₂Oprod y de la de Ndesni con un valor de unos 0,15 kg ha⁻¹ día⁻¹ en el tratamiento 80+140. En este sentido Sánchez *et al.* (2001) subrayaron la importancia de la fertilización nitrogenada en la desnitrificación ya que en su estudio en España central los picos de desnitrificación ocurrían tras cada aplicación de fertilizante nitrogenado.

El cuarto pico ocurrió el día 4 de julio de 2003 acompañado por un descenso de el PPLA de 71% a 48%, lo que aparentemente favoreció la nitrificación y no la desnitrificación tal y como demuestra el hecho de que este pico se correspondiera con otro pico apreciable de producción de N₂O en la capa arable (Fig. 8B) mientras que la Ndesni era despreciable (Fig. 8C). Es más, a partir del 4 de julio hasta el fin del muestreo el 1 de octubre de 2003 no se registró ningún otro aumento de Ndesni debido a la disminución de PPLA a valores menores de 60% (Fig. 8B).

Finalmente, el quinto pico en la emisión de N₂O ocurrió el 3 de septiembre de 2003 acompañado de un aumento de la temperatura a 28°C y del PPLA a alrededor del 50%, lo que promovió la mineralización y subsiguiente nitrificación en todos los tratamientos.

El laboreo promueve la aireación del suelo, la evaporación del agua del suelo y facilita el acceso de la masa microbiana a los residuos del cultivo promoviendo la mineralización y la producción de nitrato por nitrificación. Así, Estavillo *et al.* (2002) describieron que el laboreo

5. PERDIDAS Y BALANCE DE N

Tabla 9. Balance de nitrógeno (kg N ha⁻¹) durante la campaña 2002. Se indican las medias ± error estándar.

Dosis	0		140		140		220	
Fraccionamiento	0		40+100		40+60+40		80+140	
Nmin inicial (NminS)	40 ±	3	40 ±	3	40 ±	3	40 ±	3
N mineralizado (MIN)	120 ±	11	120 ±	11	120 ±	11	120 ±	11
N aplicado fertilizantes (F)	0		140		140		220	
NTOTAL ENTRADAS	160 ±	11	300 ±	11	300 ±	11	380 ±	11
N extraído parte aérea (Nab)	113 ±	6	177 ±	15	185 ±	15	188 ±	24
N extraído raíces (Nabr)	28 ±	2	42 ±	3	44 ±	3	44 ±	5
N gas (N ₂ O em)	2 ±	0	2 ±	0	6 ±	3	5 ±	2
Nmin postcosecha (NminDC)	17 ±	5	33 ±	1	45 ±	14	17 ±	3
NTOTAL SALIDAS	160 ±	8	254 ±	15	280 ±	21	254 ±	25
N no computado	0 ±	14	±	19	19 ±	24	126 ±	27
Eficiencia uso del fertilizante			0,49 ± 0,12		0,60 ± 0,14		0,35 ± 0,12	
Índice de cosecha de N	0,84 ±	0,08	0,90	0,04	0,81 ±	0,05	0,87 ±	0,06

de praderas viejas promovía la mineralización del N del suelo incrementando la emisión de N_2O . Sin embargo, no se produjo un aumento significativo de las emisiones de N_2O (Fig 8A) indicando que la cantidad de N mineralizado siendo por supuesto menor que el de una pradera, no era suficiente para provocar una emisión de N_2O apreciable.

Mediante la integración de las tasas de emisión y producción diarias en el tiempo, se calcularon las pérdidas de N_2O emitido a la atmósfera y las de producción de N_2O y N_2O+N_2 por desnitrificación para el total de los años 2002 y 2003 (Tabla 8). A pesar de que la fertilización nitrogenada desempeñe un papel clave en la emisión de N_2O (Bouwman, 1996), no se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos fertilizantes para la emisión o la producción acumulada de N_2O , tal y como describió Menéndez (2006) en un ensayo realizado en condiciones climáticas mediterráneas. De todas formas cuando se deduce la cantidad de N_2O_{em} correspondiente al tratamiento testigo de la del resto de tratamientos, las cantidades de N_2O emitido varían entre el 1,8% y el 2,9% del N aportado como fertilizante, cifras superiores a la de 1,25% indicada por el IPCC (1995) a la hora de estimar el efecto invernadero producido por la agricultura.

Así como en el año 2003 la dosis de N aplicado no tuvo efecto sobre las emisiones de N_2O a la atmósfera ni sobre su producción en la capa arable, sí lo tuvo sobre la producción de N_2O+N_2 por desnitrificación total, siendo superior para el tratamiento de mayor dosis (i.e. 80+140). Tal y como se ha mencionado anteriormente, sólo se observaron picos de N_2O+N_2 por desnitrificación hasta el 2 de abril por lo que estas mayores pérdidas por desnitrificación se deben a los picos de

5. PERDIDAS Y BALANCE DE N

desnitrificación observados tras la fertilización. Por la misma razón, los valores acumulados de las tasas de $N_2O + N_2$ por desnitrificación hasta cosecha y tras ésta son similares.

Tabla 8. Emisiones acumuladas de N_2O (N_2Oem) en todo el periodo de muestreo en el año 2002. En el año 2003, acumulación de N_2Oem , de las tasas de producción de N_2O (N_2Oprod) y de las de $N_2O + N_2$ por desnitrificación ($Ndesni$) desde el inicio del muestreo hasta cosecha y hasta el final del muestreo. Los valores significativamente diferentes se indican con diferente letra.

Tratamiento	2002*	2003 hasta cosecha**			2003 en todo el periodo***
	N_2Oem	N_2Oem	$Ndesni$	$Nprod$	N_2Oem
	(kg N ha ⁻¹)				
0	2 a	5 a	4 b	7 a	10 a
40+100	2 a	4 a	5 b	10 a	9 a
40+60+40	6 a				
80+140	5 a	8 a	9 a	11 a	14 a

*desde el 5 de marzo hasta el 17 de mayo de 2002

**desde el 21 de enero hasta el 4 de julio de 2003

***desde el 21 de enero de 2003 hasta el 4 de febrero de 2004.

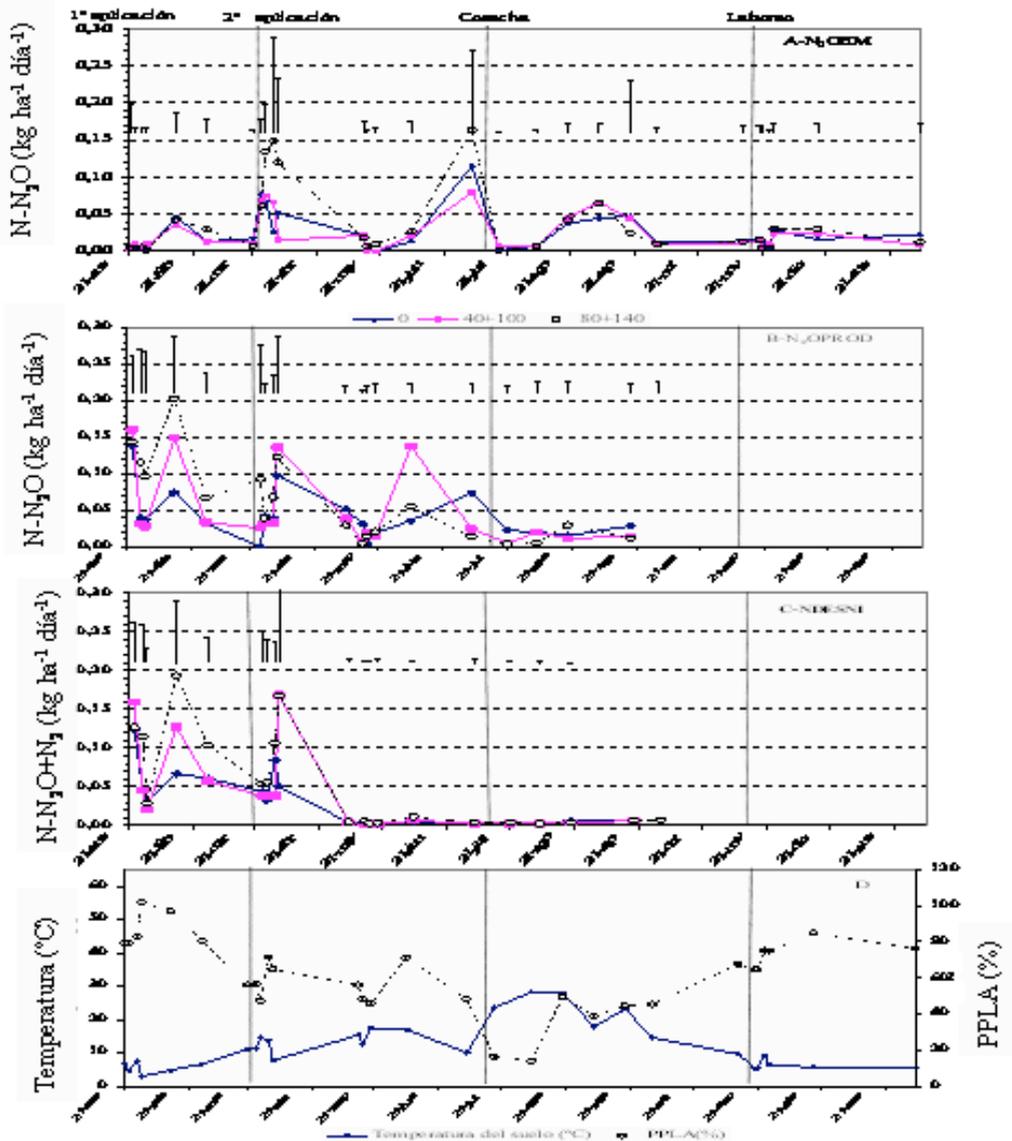


Figura 8. Tasa de emisión de N₂O (N₂Oem) (A), tasa de producción de N₂O (Nprod) (B) y tasa de producción de N₂+N₂O por desnitrificación (Ndesni) (C) en el año 2003. Las líneas verticales respectivamente indican la primera y segunda aplicación de fertilización nitrogenada, la cosecha y el laboreo. Temperatura (°C) y PPLA (%) (D). Las barras de error se refieren a la mitad de las diferencias mínimas significativas entre tratamientos por día de los valores para un nivel de significación $\alpha=0,05$.

5.3.4. Balance de nitrógeno

Los balances de N para las distintas campañas se presentan en las Tablas 9, 10 y 11. El rendimiento y por tanto la extracción del tratamiento testigo el año 2002 fue mayor que en las dos campañas posteriores seguramente debido a que el primer año de ensayo el precedente era un campo homogéneamente fertilizado mientras que en los años posteriores fue precedido por el propio trigo y se mantuvo sin fertilizar. La extracción de la parte aérea en el resto de tratamientos varió entre 134 y 188 kg N ha⁻¹. La mineralización estuvo entre 93 y 123 kg N ha⁻¹ en las tres campañas.

Se observa que el N no computado tendió a aumentar con la dosis aportada como sucedió con las cantidades de N lixiviadas y las emitidas de N₂O. En general, tal efecto se observó también para balances de N realizados en Navarra y Castilla-La Mancha (Quemada *et al.*, 2006). Tal y como Estavillo *et al.* (1997) propusieron, estos hechos sugieren una tasa de mineralización de N diferente a la del tratamiento testigo y dependiente de la dosis de fertilizante nitrogenado aportada. En este sentido, Kuzyakova y Stahr. (2006) observaron que había un efecto sobre el patrón de la mineralización tras la aplicación de fertilizante nitrogenado en varios suelos y Webster *et al.* (1993) achacaban el N_c creciente a épocas cortas de inmovilización que incrementaban con la dosis de N_{min} disponible. Otra posibilidad es que el aumento del N_c se deba a otro tipo de pérdidas no determinadas en el estudio como las derivadas de la lixiviación del amonio, que se presume que no serán muy importantes ya que la cantidad de amonio respecto a nitrato supuso aproximadamente el 10% de la medida de

N_{min} (Tabla 5). Tampoco se estimaron las pérdidas correspondientes a la volatilización de amoníaco, pero en estudios posteriores en la misma zona han demostrado ser despreciables (comunicación personal).

La EUF varió entre 0,35 y 0,60 en el año 2002 y entre 0,62 y 0,82 en los años 2003 y 2004 (Tablas 9, 10 y 11). Esto fue a causa de la mayor extracción de N en el testigo en la primera campaña en comparación con las dos siguientes ya que en la primera campaña al ensayo le precedía un cultivo fertilizado, mientras que en las dos campañas siguientes el tratamiento testigo no se fertilizó. Los valores de EUF que oscilan entre 0,3 y 0,6 son habituales en los ensayos realizados por el ITGA en Navarra (Irañeta *et al.*, 2002). Se observó que la EUF decrecía conforme aumentaba la dosis de fertilizante, tal y como han observado otros autores (Huggins y Pan, 1993). Fischer (1993) describió que dependiendo de la cantidad y reparto del N el ICN en el trigo variaba de 0,64 a 0,85. Similarmente, el ICN abarcó valores de entre 0,65 y 0,87 en nuestro ensayo, el valor más frecuente de ICN situándose en torno a 0,70 - 0,80 (Tablas 9, 10 y 11).

Tabla 10. Balance de nitrógeno (kg N ha^{-1}) durante la campaña 2003. Se indican las medias \pm error estándar.

Dosis	0	140	140	220
Fraccionamiento	0	40+100	40+60+40	80+140
Nmin inicial (NminS)	25 \pm 5	24 \pm 1	25 \pm 3	40 \pm 10
N mineralizado (MIN)	123 \pm 12	123 \pm 12	123 \pm 12	123 \pm 11
N aplicado fertilizantes (F)	0	140	140	220
NTOTAL ENTRADAS	147 \pm 13	287 \pm 12	288 \pm 13	383 \pm 15
N extraído parte aérea (Nab)	53 \pm 6	139 \pm 21	145 \pm 25	180 \pm 22
N extraído raíces (Nabr)	13 \pm 1	35 \pm 5	36 \pm 6	45 \pm 5
N lixiviado (Nlix)	14 \pm 3	14 \pm 2	12 \pm 2	23 \pm 3
N gas (N_2O em)	5 \pm 4	4 \pm 1		8 \pm 3
Nmin postcosecha (NminDC)	50 \pm 4	37 \pm 4	30 \pm 3	40 \pm 1
NTOTAL SALIDAS	135 \pm 8	229 \pm 21	224 \pm 25	296 \pm 22
N no computado	12 \pm 16	58 \pm 24	65 \pm 28	86 \pm 27
Eficiencia uso del fertilizante	\pm	0,76 \pm 0,22	0,82 \pm 0,21	0,72 \pm 0,11
Índice de cosecha de N	0,76 \pm 0,77	0,77 \pm 0,03	0,71 \pm 0,08	0,65 \pm 0,04

5. PERDIDAS Y BALANCE DE N

Tabla 11. Balance de nitrógeno (kg N ha^{-1}) durante la campaña 2004. Se indican las medias \pm error estándar.

Dosis	0		140		140		220	
Fraccionamiento	0		40+100		40+60+40		80+140	
Nmin inicial (NminS)	28 \pm	2	35 \pm	2	36 \pm	7	36 \pm	3
N mineralizado (MIN)	93 \pm	16	93 \pm	16	93 \pm	16	93 \pm	16
N aplicado fertilizantes (F)	0		140		140		220	
NTOTAL ENTRADAS	121 \pm	16	268 \pm	16	269 \pm	17	349 \pm	16
N extraído parte aérea (Nab)	56 \pm	14	134 \pm	7	145 \pm	10	165 \pm	5
N extraído raíces (Nabr)	14 \pm	3	33 \pm	2	36 \pm	2	41 \pm	1
N lixiviado (Nlix)	19 \pm	2	20 \pm	2	31 \pm	2	32 \pm	2
Nmin postcosecha (NminDC)	32 \pm	1	33 \pm	1	42 \pm	8	53 \pm	2
NTOTAL SALIDAS	121 \pm	15	220 \pm	8	254 \pm	13	291 \pm	7
N no computado	0 \pm	22	48 \pm	18	15 \pm	22	58 \pm	18
Eficiencia uso del fertilizante			0,69 \pm 0,18		0,79 \pm 0,20		0,62 \pm 0,10	
Índice de cosecha de N	0,77	\pm 0,26	0,73	\pm 0,03	0,87	\pm 0,04	0,74	\pm 0,07

5.4. Conclusiones

- 1.) Los valores medios de Nmin en los suelos estudiados a lo largo de los años 2002, 2003 y 2004 se encontraron entre 12 y 53 kg N ha^{-1} .
- 2.) El periodo inter cultivo pareció ejercer un efecto igualador en el Nmin antes de la siembra entre tratamientos seguramente por causa de la lixiviación entre cultivos. De hecho, la concentración de nitrato en los lixiviados al inicio del periodo del muestreo del tercer año de ensayo, año 2004, se ordenó proporcionalmente a la dosis de fertilizante

aplicado. Además, la lixiviación de nitrato tras la cosecha en el año 2004 supuso el 50% de la lixiviación total para todos los tratamientos. Así, se dedujo que ocurría una fuerte mineralización tras cosecha que, junto a la ausencia de cultivo en verano, generaba la acumulación del N_{min} en el suelo y la posterior lixiviación de éste con las lluvias de otoño.

3.) Con el tratamiento 80+140 se lixivió significativamente más nitrato que en los tratamientos 0 y 40+100, computándose pérdidas de hasta 70 kg N ha⁻¹ en todo el periodo de muestreo en 2004. En este mismo tratamiento y el tratamiento 40+60+40, se superó el límite de 11,3 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻ expresado como la concentración media en el agua drenada durante el periodo de muestreo. Deduciendo la cantidad de N-nítrico lixiviada en el testigo, las cantidades de N-Nítrico lixiviadas hasta cosecha los años 2003 y 2004 supusieron entre el 4 y el 6% del N aplicado. Al incluir el periodo tras cosecha el año 2004 estas pérdidas supusieron entre el 8 y el 14% del N-aplicado.

4.) Los picos de emisión de N₂O fueron en general causados por efecto del aumento de la temperatura y por las adiciones de fertilizante nitrogenado, especialmente tras la aplicación del segundo aporte en el tratamiento 80+140 (el aporte de mayor dosis) que generó la máxima emisión registrada de 0,15 kg N ha⁻¹ día⁻¹. Las cantidades de N-N₂O emitidas a la atmósfera en todo el periodo de muestreo del año 2003 oscilaron entre 10 kg N ha⁻¹ en el tratamiento testigo y 14 kg N ha⁻¹ para el tratamiento 80+140. Mediante la deducción del N₂O emitido por

5. PERDIDAS Y BALANCE DE N

el tratamiento testigo del resto de tratamientos se calculó que las cantidades de N_2O emitido fueron de entre 1,8% y 2,8% del N aportado como fertilizante en los periodos de muestreo de los años 2002 y 2003.

5.) No se observó efecto alguno por causa del laboreo ni en N_2O emitido, ni en N desni ni en Nprod.

6.) Del balance de N se dedujo que las entradas de N al sistema suelo-planta superaron a las salidas, de hecho, el N no computando tendió a aumentar con la dosis aportada, tal y como lo hicieron tanto las cantidades de N lixiviadas como las emitidas en forma de N_2O . Este hecho sugiere una tasa de inmovilización de N superior a la del tratamiento testigo en los tratamientos fertilizados y dependiente de la dosis de fertilizante nitrogenado aportada.

7.) La eficiencia en el uso del fertilizante varió de 0,35 a 0,82 y fue inferior el año 2002 que en los siguientes dos años. Esto fue a causa de la mayor extracción de N en el testigo en la primera campaña en comparación con las dos siguientes porque en la primera campaña al ensayo le precedía un cultivo fertilizado, mientras que en las dos siguientes el testigo no se fertilizó. El valor más frecuente de índice de cosecha del nitrógeno se encontró en torno a 0,70-0,80.

Conclusiones generales

Cuando la fertilización nitrogenada de trigo blando de invierno en Álava se realizó en dos aportes la dosis de N diagnosticada por el modelo cuadrático-meseta para la obtención del rendimiento máximo fue de 182 kg N ha⁻¹, si bien a este respecto la variabilidad entre los diferentes ensayos realizados fue considerable. Cuando la proteína no se remuneraba, las dosis económicamente óptimas variaron de 168 y 150 kg ha⁻¹.

Mediante el modelo cuadrático se dedujo que la dosis de N necesaria para obtener un contenido de proteína en grano del 12,5% era de 176 kg ha⁻¹ cuando se aplicaba en dos aportes. Cuando la proteína no se remuneraba, las dosis económicamente óptimas de N a aplicar variaron de 168 kg ha⁻¹ a 150 kg ha⁻¹ según el precio del trigo y del fertilizante en los años 2002, 2003 y 2004. Los beneficios así obtenidos serían de entre 482 € ha⁻¹ y 805 € ha⁻¹.

El reparto de las dosis 140 y 180 kg ha⁻¹ en tres aplicaciones en vez de en dos siendo la tercera tardía tuvo poco efecto sobre el rendimiento, y cuando lo tuvo fue pernicioso. Sin embargo, el contenido de proteína en grano se vio afectado aproximadamente en la mitad de los experimentos estudiados.

Se probó una estrategia de fertilización ajustada a mínimos que consistía en la aplicación de 40 y 60 kg ha⁻¹ en los momentos Z20 y Z30 y una posible tercera dosis de 40, 60 u 80 kg N ha⁻¹ en Z37. Tanto la proteína en grano como el rendimiento aumentaron con la adición de

6. CONCLUSIONES GENERALES

terceras aplicaciones en Z7 de como mínimo 40 y 60 kg N ha⁻¹ respectivamente.

En cuanto a las herramientas de diagnóstico, se evaluaron el Nmin en suelo y el N-Tester en planta. No se observó una clara relación entre el N mineral (Nmin) a la salida de invierno y la dosis necesaria para obtención del rendimiento máximo para los distintos ensayos presumiblemente debido a que el rango de valores de N mineral encontrados no resultaba lo suficientemente amplio para la identificación de rangos de dosis óptimas según el N mineral del suelo (Nmin). De todas formas, los valores de Nmin del suelo no fueron, en general, lo suficientemente altos como para considerar una corrección de la dosis de fertilización nitrogenada a aportar.

Tanto los valores de N-Tester absolutos como los relativizados en Z32 y Z37 solo diferenciaron estados nutricionales y predijeron producciones correspondientes a tratamientos no fertilizados respecto a las correspondientes a tratamientos fertilizados.

Dentro de la llamada fertilización ajustada a mínimos, se trató de evaluar la utilización del N-Tester como herramienta de guía en la aplicación y dosificación del tercer aporte. El aparato fue útil en Z37 para determinar la cantidad extra de N necesaria para la planta en ese momento. Así se recomendó el aporte de 60 u 80 kg N ha⁻¹ en Z37 para mejorar el rendimiento en parcelas cuyos valores de NTR37 eran inferiores a 91%. Para valores de NTR37 superiores a 91%, sólo se inducía el aumento del rendimiento con una aplicación extra de 80 kg N ha⁻¹ en el 50% de los casos. Para aumentar la proteína respecto a la obtenida con el tratamiento 40+60, cuando los valores de NTR 37 eran

inferiores a 92% se recomendaba la aplicación de sólo 40 kg N ha⁻¹, mientras que cuando los valores de NTR37 eran superiores a 92%, la tercera aplicación recomendada era de 60 kg N ha⁻¹. Se observó que esta estrategia exigía una pluviometría mínima de 20 a 30 mm en torno al tercer aporte para que éste fuera aprovechado.

En cuanto a las pérdidas de N, deduciendo las correspondientes al tratamiento testigo, durante aproximadamente un año se perdieron entre 0 y 4 kg ha⁻¹ de N como N₂O o entre 1,8 y un 2,9% respecto al N aplicado. Como nitrato lixiviado las pérdidas de N en el mismo periodo supusieron entre el 8 y el 14% del N aplicado como fertilizante. Las emisiones de N₂O tendieron a aumentar con la temperatura y con la dosis de N aplicada. Sin embargo, no mostraron diferencias significativas respecto a los tratamientos de fertilización nitrogenada. La cantidad de N-NO₃⁻ lixiviada fue significativamente superior en el tratamiento 80+140 que en el resto de los tratamientos ensayados en varias ocasiones. En 2004, cabe destacar la tendencia del nitrato lixiviado a aumentar no sólo en el tratamiento 80+140 si no también en el tratamiento 40+60+40, como consecuencia de la mineralización tras la cosecha aparentemente favorecida en este tratamiento con respecto al tratamiento 40+100 por la adición de tercer aporte de 40 kg N ha⁻¹ y su posterior contribución al nitrato lixiviado en otoño. Así se concluye que en las zonas vulnerables la estrategia de baja fertilización no resultó recomendable debido, por un lado, al riesgo de mayor lixiviación observado, y, por otro lado, a que la suplementación del tratamiento 40+60 con 60 kg ha⁻¹ siempre era necesaria para evitar pérdidas de rendimiento excediendo por tanto la dosis total aplicable de 140 kg N ha⁻¹ en las zonas vulnerables.

6. CONCLUSIONES GENERALES

En las zonas no vulnerables la estrategia de tres aportes frente a dos resultaba arriesgada tanto para la dosis de 140 como para la de 180 kg N ha⁻¹ en cuanto al rendimiento porque se corría el riesgo de la reducción del mismo en un 30% y 20% de los casos según la dosis respectivamente. En cuanto a la proteína, el fraccionamiento en tres aportes frente a dos tuvo un efecto sobre el contenido de proteína en un 50% de los casos. El signo del efecto del fraccionamiento sobre el contenido de proteína en grano dependió de la lluvia en torno al tercer aporte, siendo positivo cuando la lluvia no fuera inferior a unos 20 o 30 mm. Por lo tanto, la pluviometría tardía es un factor importante a tener en cuenta en la aplicación de esta estrategia. Dentro de esta estrategia se elegiría el tratamiento 40+60+60 como tratamiento que aúna el efecto de, con el mínimo tercer aporte, aumentar tanto el rendimiento como la proteína .

El N no computando (Nc) en los balances de N tendió a aumentar con la dosis aportada, tal y como lo hicieron tanto las extracciones de N por la planta así como las cantidades de N lixiviadas como las emitidas en forma de N₂O, aunque no significativamente. Esto sugería una tasa de inmovilización de N superior a la del tratamiento testigo en los tratamientos fertilizados y dependiente de la dosis de fertilizante nitrogenado aportada. De hecho, la concentración de nitrato en las cápsulas de lixiviado indicaba que este N inmovilizado en el periodo de crecimiento de cultivo hasta cosecha era posteriormente remineralizado y susceptible de ser lixiviado. La eficiencia de utilización de fertilizante varió entre 0,35 y 0,82. El valor más frecuente de ICN se encontró en torno a 0,70-0,80.

Bibliografía

- AETC, Asociación Española de técnicos cerealistas. 2004. Encuesta de calidad de los trigos españoles, cosecha 2003. Subdirección General de Investigación y Tecnología, INIA, Madrid.
- Addiscot, T.M., Whymore, A.P., Powlson, D.S. 1991. Farming, fertilizers and the nitrate problem. CAB International, Wallingford, UK.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. Water Resources, Development and Management Service.
- Alley, M.M., Brann, D.E., Hammons, J.L., Scharf, P. y Baethgen, W.E. 1999. Nitrogen management for winter wheat: Principles and recommendations. Virginia Coop. Ext. Pub. 424-026.
- Alpkem, 1986. Nitrate + nitrite nitrogen (A353, S-170). p. 1-10. *En*: Alpkem Corp (ed.). RFA methodology. Alpkem Corp., Clackomas, OR.
- Alpkem. 1987. Ammonia nitrogen (A303, S-020). p. 1-7. *En*: Alpkem Corp (ed.). RFA methodology. Alpkem Corp., Clackomas, OR.
- Anderson, R.L., y Nelson, L.A. 1975. A family of models involving intersecting straight lines and concomitant experimental designs useful in evaluating response to fertilizer nutrients. *Biometrics* 31:303-318.

7. BIBLIOGRAFÍA

- AOAC, Association of Official Analytical Chemists International. 1999. Plants. p. 24, 127. *En*: Patricia Cunniff (ed.) Official methods of AOAC International. 16th ed. AOAC International, Gaithersburg, Maryland, USA.
- Arbuckle, K.E. y Downing, J.A. 2001. The influence of watershed land use on lake N:P in a predominantly agricultural landscape. *Limnol. Oceanogr.* 46: 970-975.
- Arrate, I., Sanchez-Perez, J. M., Antigüedad, I., Vallecillo, M. A., Iribar, V., y Ruiz, M. 1997. Groundwater pollution in Quaternary aquifer of Vitoria–Gasteiz (Basque Country, Spain). *Environ. Geol.* 30: 257-265.
- 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., Lasa, B., Lafarga, A., Irañeta, I., Baroja, E., y Quemada, M. 2006a. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. *Eur. J. Agron.* 24:140-148.
- Arregui, L.M., Maeztu, I., y Quemada, M. 2006b. Balances de nitrógeno en cultivo de cereal de invierno en clima mediterráneo húmedo. p. 11-17. *En*: M. Quemada (ed.). Balance de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz en varias regiones españolas. Monografías INIA: Serie Agrícola 22. INIA, Madrid.

- Aulakh, M. S., Doran, J. W., y Moiesier A.R. 1992. Soil denitrification-significance, measurement and effects of management. *Adv. Soil Sci.* 18:1-57.
- Baker, D.A., Young, D.L., Huggins, D.R., y Pan, W.L. 2004. Economically Optimal nitrogen fertilization for yield and protein in hard red spring wheat. *Agron. J.* 96:116-123.
- Baret, F., y Fourty, Th. 1997. Radiometric estimates of nitrogen status of leaves and canopies. p. 201-229. *En: Lemaire G. (ed.) Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops.* Springer-Verlag, Berlin, Alemania.
- Barraclough, P.B. 1997. N requirement of winter wheat and diagnosis efficiency. p. 117-124. *En: Gooding, M.J. y P.R. Shewry (eds.) Optimising cereal inputs: its scientific basis, Part I: genetics and nutrition.* The Association of Applied Biologists. Warwick, UK.
- Bélanger, G., Walsh, J.R., Richards, J.E., Milburn, P.H., y Ziadi, N. 2000. Comparison of Three Statistical Models Describing Potato Yield Response to Nitrogen Fertilizer. *Agron. J.* 92:902-908.
- Blake, G.R., y Hartge, K.H. 1986. Bulk Density. P. 363-375. *En: Klute, A. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 1 Physical and mineralogical methods.* ASA-SSSA. Madison, WI.
- Bodson, B., Destain, J.P., Vancutsem, F., Herman, J.L., Polaert, J., Denuit, J.P., Monfort, B., Couvreur, L., Goffart, J.P., Frankinet, M., y Falisse, A. 2004. Les conseils de fumure azotée. [Online]. *En: www.fsagx.ac.be/pt/lbfev2004/Fractionnement%20de%20la%20fumure.doc* (acceso 26 de enero de 2005, verificado 21 julio de 2005). Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique.

7. BIBLIOGRAFÍA

- GV-EJ, Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza. 1999. Decreto 390/1998 por el que se dictan normas para la declaración de Zonas Vulnerables a la contaminación de las aguas por los nitratos procedentes de la actividad agraria y se aprueba el Código de Buenas Prácticas Agrarias de la Comunidad Autónoma del País Vasco. BOPV 18:1448-1474.
- Bouwman, A.F. 1990. Soils and the greenhouse effect. Wiley, New York.
- Bouwman, A.F. 1996. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 46:53-70
- Brown, B.D., y Petrie, S. 2006. Irrigated hard winter wheat response to fall, spring, and late season applied nitrogen. *Field Crops Res.* 96:260–268.
- Bullock, D.G., y Bullock, D.S. 1994. Quadratic and quadratic-plus-meseta models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82:138-143.
- Campbell, G.S. 1985. Soil physics with BASIC: Transport models for soil-plant systems. Elsevier, Amsterdam.
- Campbell, C.A., Selles, F., De Jong, R., Zentner, R.P., Hamel, C., Lemke, R., Jefferson, P.G., y McConkey, B.G. 2006. Effect of crop rotation on NO_3^- leached over 17 years in a medium-textured Brown Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 86:109-118.
- Caraco, N.F., y Cole, J.J. 1999. Human impacts on nitrate exports: an analysis using major world rivers. *Ambio* 28: 167-170.
- Cate, R., y Nelson, L.A. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35:658-660.

- Cerrato, M.E., y Blackmer, A.M. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilization. *Agron. J.* 82:138-143.
- Chaney, K. 1990. Effect of nitrogen fertilizer rate on soil nitrate nitrogen content after harvesting winter wheat. *J. Agron. Sci.* 114:171-176.
- Chang, C.C.Y., Kendall, C., Sila, S. R., Battaglin, W.A. y Campbell D.H. 2002. Nitrate stable isotopes: tools for determining nitrate sources among different land uses in the Mississippi River Basin. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59: 1874-1885.
- Davidson, E.A. 1991. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. p. 219-235. *En: J.E. Rogers and W.B. Whitman (eds.) Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Nitrogen Oxides, and Halomethanes.* American Society of Microbiology, Washington DC.
- Debaeke, P., Rouet, P., y Justes, E. 2006. Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: application to durum wheat. *J. Plant Nutrition* 29:75-92.
- Denuit, J.P., Marguerite, O., Gofaux, M. J., Herman, J. L., Goffart, J.P., Destain, J. P., y Frankinet, M. 2002. Management of nitrogen fertilization of winter wheat and potato crops using the chlorophyll meter for crop nitrogen status assessment. *Agronomie* 22: 847-853.
- Destain, J.P., Bodson, B., Herman, J.L., y Destain, J.P. 2002. Évolution de la fumure du Livre blanc «céréales». F.U.S.A. y C.R.A, Gembloux, France.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Dobermann, A., y Cassman, K.G. 2004. Environmental dimensions of fertilizer nitrogen: What can be done to increase nitrogen use efficiency and ensure global food security?. p. 261-278 *En*: Moision, A. R., Syers, J. K. y Freney, J. R. (eds.) Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the Impact of Fertilizer Use on Food Production and the Environment. SCOPE 65 Paris, France.
- Duru, M. 2002. Evaluation of Chlorophyll meter to assess N status of cocksfoot sward. *J. Plant Nutr.* 25:275-286.
- Echeverria, H., Bergonzi, R. y Ferrari, J. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la provincia de BuenosAires. Argentina. *Ciencia del suelo*, 12:56-62.
- EEC. 1980. Council Directive 88/778/EEC of 15 July 1980 relating to the quality of water intended for human consumption. OJL 229: 11.
- Estavillo, J.M., Rodriguez, M., Lacuesta, M. y, González-Murua, C. 1997. Effect of cattle slurry and mineral N fertilizer applications on various components of the nitrogen balance of mown grassland. *Plant and Soil* 188: 49-58.
- Estavillo, J.M., Merino, P., Pinto, M., Yamulki, S., Sapek, A., y Corré, W. 2002. Short term effect of ploughing a permanent pasture on N₂O production from nitrification and denitrification. *Plant and Soil* 239:253-265.
- Eustat-Euskal Estatistika Erakundea. Instituto Vasco de Estadística. 2004. Principales producciones agrícolas clasificadas por tipo de cultivo, 2002 [Online]. *En*: www.eustat.es/ele/ele0000300/tbl0000349_c.html (acceso 21 de noviembre de 2003, verificado 8 de Julio de 2004). Gobierno Vasco-Eusko Jaularitza, Vitoria.

- Euskalmet, 2006. Datos de estaciones. [Online]. En: <http://www.euskalmet.euskadi.net/s07>. Gobierno Vasco–Eusko Jaularitza, Vitoria.
- Evenson, RE. y Gollin, D. 2003. Assessing the impact of the green revolution, 1960 to 2000. *Science* 300: 758-762.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nation Statistics. 2006. [Online]. En: www.eustates.es/elem/-ele0000300/tbl0000349_c.html (acceso 20 de febrero de 2007, verificado 1 de mayo de 2007). <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=340&lang=es>. ONU, Nueva York.
- Firestone, M.K., y Davidson, E.A. 1989. Microbiological basis for NO and N₂O production and consumption in soils. p. 7-21. En: Andreade, M. y Schimel, O.D.S. (eds.) Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. John Wiley, Nueva York.
- Fischer, RA, Howe, GN y Ibrahim, Z. 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. I. Grain yield and protein content. *Field Crops Res.* 33: 37-56.
- Follet, R.F., Keeney, D.R. y Cruse, R.M. 1991. Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. Soil Science Society of America, Madison.
- Follett, R.H., and R.F. Follett. 1992. Use of a Chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23:687-697.
- Fowler, D.B., Brydon, J., y Baker, R.J. 1989. Nitrogen fertilization of no-till winter wheat and rye. Influence on grain proteins. *Agron. J.* 81:72-77.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Fox, R.H., Meisinger, J.J., Sims, J.T., y Piekielek, W.P. 1992. Predicting N fertilizer needs in humid regions: Advances in Mid-Atlantic States. p. 43-56. *En*: Bock y K.R. Kelley (eds.), Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions, bull. Y-226. National Fertilizer Environmental Research Center, TVA, Muscle Shoals, AL, 35660, USA.
- Fox, R.H., Piekielek, W.P., y Macneal, K.M. 1994. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25:171-181.
- Garrido-Lestache, E., López-Bellido, R.J. y López-Bellido, L. 2005. Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *Eu. J. Agron.* 23:265–278
- Gate, P. 1995. *Ecophysiologie du blé*. Lavoisier Tec and Doc, Paris.
- Gee, G.W., y Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411 *EN*: Klute, A.. (ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1*. 2nd ed. Physical and Mineralogical Methods. SSSA, Madison, WI., USA.
- Gómez, K.A., y Gómez, A.A. 1983. Regression and correlation analysis. p. 357-423. *En* John Wiley & Sons (ed.) *Statistical procedures for agricultural research*. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- González-Montaner, J., Maddonni, G., Mailland, N. y Posborg, M. 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo del trigo a partir de un modelo de decisión para la subregión IV. *Ciencia del Suelo*, 9:41-51.

- González Murua, González Moro, MB y Estavillo, JM. 2004. Nitrógeno, agricultura y medio ambiente. p. 49-58. *En*: Reigosa Roser, M.J., Pedrol Bonjoch, N. y Sanchez Moreiras A. (eds.). La ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis. Thompson Paraninfo, Madrid.
- Gooding, M.J., y Davies, W.P. 1997. Wheat production and utilization. CAB Int., Wallingford, UK.
- Guerrero, A. 1999. Cultivos Herbáceos extensivos. Mundi Prensa, Madrid.
- Hoel, B.O. 1998. Use of a hand-held chlorophyll meter in winter wheat: evaluation of different measuring positions on the leaves. *Soil and Plant Sci.* 48:222-228.
- Howard, D.D., Newman, M.A., Essington, M.E., y Percell, W.M. 2002. Nitrogen fertilization of conservation-tills wheat II. Timing of application of two nitrogen sources. *J. Plant Nutrition* 25:1329-1339.
- Huggins, D.R., y Pan, W.L. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping systems differences in productivity. *Agron. J.* 85:898-905.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 1995. Climate Change. Scientific and technical analysis of impacts, Adaptions and Mitigation. Contribution of Working Group II to the Second assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Irañeta, I., Armesto, A.P., Segura, A., Lafarga, A., Arregui, L.M., Merina, M., Baroja, M., y Quemada, M. 2002. Herramientas de ayuda a la decisión para el manejo correcto de fertilizantes nitrogenados en cereales de invierno. *Navarra Agraria* 133:6-16.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Isermann, K. 1994. Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share. *Environ. Pollut.* 83:95-111.
- ITCF, Institut Technique des Céréales et des Fourrages, 2002. Gérer la fertilisation azotée des céréales a pailles dans le Sud-Ouest. Service Communication Marketing ITCF, Francia.
- ITGA, Instituto Técnico para la Gestión Agrícola de Navarra. 2005. Cultivos extensivos, campaña 2004. Informe Técnico Rep. 3. Instituto Técnico y de Gestión Agrícola, Villava, Spain.
- Jauregui, M.A., y Paris, Q. 1984. Spline response functions for direct and carry-over effects involving single nutrient. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 49:140-145.
- Jensen, C., Stougaard, B. y Østergaard, H. 1994. Simulation of nitrogen dynamics in farmland areas of Denmark (1989-1993). British Society of Soil Science, England.
- Justes, E., Mary, B. y Meynard, J.M. 1997a. Evaluation of a nitrate test indicator to improve the nitrogen fertilization of winter wheat crops. *En: Diagnostic procedure for crop N management. Les Colloques*, nº 82. INRA, Paris.
- Justes, E., Jeuffroy, M.H., y Mary, B. 1997b. The nitrogen requirement of major agricultural crops : Wheat, Barley and Durum Wheat. p. 73-89. *En: Lemaire, G. (ed.) Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Justes, E., Meynard, J.M., Mary, B., y Plénet, D. 1997c. Management of N nutrition: diagnosis using stem base extract: JUBIL method. p. 163-187. *En Lemaire, G. (ed.) Diagnosis of the nitrogen status in crops.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

- Kemmler, G. 1983. Modern aspects of wheat manuring. IPI-Bull. 1. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Kennedy, I.R. 1992. Acid soil and acid rain.. Research Studies Press Ltd., Taunton.
- Kjellerup, V., y Kofoed, A. 1983. Nitrogen fertilization in relation to leaching of plant nutrients from soil. Lysimeter experiments with 15N. Tidskr. Planteavl. 87:1-22.
- Knowles, R. 1981. Denitrification. p. 323-369. *En*: Paul, E.A. y Ladd, J. (eds.). Soil Biochemistry, Vol. 5. Marcel Dekker, New York.
- Kuenen, J.G., y Robertson, L.A. 1994. Combined nitrification-denitrification processes. FEMS Microbiol. Rev. 15:109-117.
- Kuzyakova, I. F. y Stahr, K. 2006. Studying the dynamics of the net N mineralization rate in a catena on loess deposits using time series analysis. 2006. *Eu. Soil Sci.* 39: 397-402
- Ladha, J.K., Pathak, H., Krupmik, T.J., Six, J., y van Kessel, C. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Adv. Agron.*, 87:85-155.
- Laegrid, M, Bockman, O C y Kaarstad, O. 1999. Agriculture, Fertilizer y the Environment. CABI Publishing, Norsk Hydro, ASA.
- Lasa B., Irañeta, J., Armesto, A.P. y Lafarga, A. 2006. Balances de nitrógeno en cereal de invierno en la Comunidad Foral de Navarra.p. 48-58. *En*: M. Quemada (ed.). Balance de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz en varias regiones españolas. Monografías INIA: Serie Agrícola 22. INIA, Madrid.
- Laurent, F, Justes, E., Gate P.1996. Jubil. La méthode Jubil® fait ses preuves. *Perspectives Agricoles* 214, 1-12.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Laurent, F. 2000. Faut-il varier la dose d'azote en parcelles hétérogènes?. *Perspectives Agricoles*, 262:62-69.
- Legg, J.O., y Meisinger, J.J. 1982. Soil nitrogen budgets. p.1-42. *En*: Stevenson, F.J. (ed.). *Nitrogen in agricultural soils*. American Society of Agronomy, Madison, WI, EEUU.
- Leigh, R.A., y Johnston, A.E. 1985. Nitrogen concentrations in field-grown spring barley: an examination of the usefulness of expressing concentrations on the basis of tissue water. *J. Agric.Sci.*105:397-406.
- Leygue, J.P., Martin, G., Lacroix, S. y Bal, F. 2000. Gagner en qualité pour conserver nos marchés. *Perspectives Agricoles*, 262: 34-39.
- Loewy, T., Ron , M. 1993. Fertilización nitrogenada del trigo en el S.O. bonaerense. p. 131-132. Modelo general de fertilidad. Proc. XIV congreso argentino de la Ciencia del suelo.
- López-Bellido, L. 1991. *Cultivos Herbáceos, Vol. I. Cereales*. Mundi-Prensa, Madrid.
- López-Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J.E., López-Garrido, R.J., y Fernández, E.J. 1996. Long-term tillage, crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agron. J.* 88:783-791.
- López-Bellido, R.J., Shepherd, C.E., y Barraclough, P.B. 2004. Predicting post-anthesis N requirements of bread wheat with a Minolta SPAD meter. *Eur. J. Agron.* 20:313-320.
- López-Bellido Garrido, R.J., y López-Bellido, L. 2001. Effects of crop rotation and nitrogen fertilization on soil nitrate and wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomie* 21: 509-516.

- Lorbeer, S., Jacobsen, J., Bruckner, P., Wichman, D., y Berg, J. 2000. Capturing the Genetic Protein Potential of Winter Wheat. Fertilizer facts 23. Montana State University Extension Service Montana, USA.
- Lord, E.I., y Mitchell, R.D.J. 1998. Effect of nitrogen inputs to cereals on nitrate leaching from sandy soils. *Soil Use and Management*. 14:78-83.
- Ma, B.L., Subadi, K.D., y Dwyer, L.M. 2006. Timing and method of ¹⁵nitrogen-labeled fertilizer application on grain protein and nitrogen use efficiency of spring wheat. *J. Plant Nutr.* 29:469-483.
- Makowski, D., Wallach, D., y Meynard, J.M. 1999. Models of yield, grain protein and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. *Agron. J.* 91:377-385.
- Mary, B. 1997. Concluding Remarks: N Hazards to crops and Environment. p. 229-236. *En*: Lemaire, G. (ed.) *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Springer-Verlag, Berlin, Alemania.
- Meisinger J.J., y Randall, G.W. 1991. Estimating nitrogen budgets for soil-crop systems. p. 85-124. *En*: Follet R.F. *et al*, (eds.) *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability* SSSA, Madison, WI, EEUU.
- Menéndez, S. 2006. Evaluating gaseous emissions from agricultural soils under different management strategies. Tesis Doctoral. UPV-EHU, Leioa.
- Menéndez, S., Merino P., Pinto M., González-Mura C., y Estavillo, J.M. 2006. 3,4-Dimethylpyrazol phosphate effect on nitrous oxide, nitric oxide, ammonia, and carbon dioxide emissions from grasslands. *J. Environ. Qual.* 35:973-981.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Millner, J.P., McEwan, J.M., y Valentine I. 1994. Effect of late nitrogen on the grain yield and quality of spring sown "Rongotea" wheat. *N. Z. J. Crop Hort. Sci.* 22:187-194.
- Moss, H.J. 1981. Purchasing wheat on a quality basis: technical aspects. *Proc. Agron. Soc. NZ* 11:105-106.
- Neukirchen, D. y Lammel, J. 2002. The chlorophyll Content as an Indicator for Nutrient and Quality Management. *Nawozy y Nawozenie-Fertilizers and Fertilization* 11:89-109.
- Okereke, G.U. 1984. Prevalence of nitrous oxide reducing capacity in denitrifiers from a variety of habitats. *Plant and Soil* 81:421-428.
- Olness, A., Evans, S.D., y Alderfer, R. 1998. Calculation of Optimal Fertilizer Rates: A comparison of three response models. *J. Agron. Crop Sci.* 180:215-222.
- Olsen, S.R., y Dean, L.A. 1965. Phosphorous. p. 1035-1049. *En: Black, C.A. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2.* ASA, Madison, WI.
- Ortuzar-Iragorri, M.A, Alonso, A., Castellón, A., Besga, G., Estavillo, J.M., y Aizpurua, A. 2005. N-Tester use in soft winter wheat: Evaluation of nitrogen status and grain yield prediction. *Agron. J.* 97:380-1389.
- Ortuzar-Iragorri, M.A., Alonso, A., Castellón, A., Onamunzaga O., Azkorra, Z., Aizpurua, A., y Estavillo, J.M. 2006. Balances de N en el cultivo de trigo de invierno en el País Vasco. p. 29-47. *En. Qemada, M. (ed.) Balance de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz varias regiones españolas Monografía INIA: Serie Agrícola 22.* INIA, Madrid.

- Peltonen, J., Virtanen, A., y Haggren, E. 1995. Using a chlorophyll meter to optimize nitrogen fertilizer application for intensively-managed small-grain cereals. *J. Agron. Crop Sci.* 174:309-318.
- Peng, S., García, R.C., Laza, R.C., y Cassman, K. G. 1993. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agron. J.* 85:987-990.
- Peng, S., Cassman, K.G., y Kropff, M.J. 1995. Relationship between leaf photosynthesis and nitrogen content of field-grown rice in tropics. *Crop Sci.* 35:1627-1630.
- Piekielek, W.P., y Fox, R.H. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements of maize. *Agron. J.* 84:59-65.
- Prud'homme, M. 2003. World fertilizer supply and demand outlook. Contribución al Octavo Congreso Nacional de Fertilizantes de China, 10-13 noviembre 2003, Yichang, China.
- Quemada, M., Arregui, L.M., y Maeztu, I. 2006. Balances de nitrógeno en cultivo de cereal de invierno en clima mediterráneo húmedo. p 17-28. *En: Quemada, M. (ed.) Balances de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz en varias regiones españolas. Monografías INIA: Serie agrícola. nº 22. INIA, Madrid.*
- Quemada, M y Lloveras, J. 2006. Conclusiones. p 134-137. *En: Quemada, M. (ed.) Balances de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz en varias regiones españolas. Monografías INIA: Serie agrícola. nº 22. INIA, Madrid.*
- Ramathan, V., Cicerone, R.J., Singh, H.B., y Kiehl, J.T. 1985. Trace gas trends and their potential role in climatic change. *J. Geophys. Res.* 90:554-5566.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Reuter, D.J. y Robinson, J.B. Plant Analysis. An interpretation manual. Inkata Press, Sidney.
- Richards, I.R., Wallace, P.A., y Paulson, G.A. 1996. Effects of applied nitrogen on soil nitrate-nitrogen content after harvest of winter barley. Fert. Res. 45:61-67.
- Rig J., Smilde, K. y Wijnen, G. 1981. Nitrogen fertilizer recommendations for arable crops as based on soil analysis. Fert. Res. 2: 21-32.
- Rodhe, H. 1990. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. Science 248:1217-1219.
- Rowell, D.L. 1994. Soil Science: Methods and Applications. Longman Scientific & Technical, Essex, England.
- Rroço, E., y Mengel, K. 2000. Nitrogen losses from entire plants of spring wheat (*Triticum aestivum*) from tillering to maturation. Eu. J. Agron., 13:101-110.
- Sanchez, L, Diez ,JA, Vallejo,A y Cartagena, M.C. 2001. Denitrification losses from irrigated crops in central Spain. Soil Biol. Biochem. 33: 1201-1209
- SAS Institute. 1998. SAS version 8. SAS Institute, Cary, NC.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., y Papendick, R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Amer. J. 50:1031-1036.
- Schepers, J.S., Francis, D.D., Vigil, M., y Below, F.E. 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 23:2173-2187.

- Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, USA.
- Sowers, K.E., Miller, B.C., y Pan, W.L. 1994. Optimizing yield grain in soft white winter wheat with split nitrogen applications. *Agron. J.* 86:1020–1025.
- Stevenson, F.J. 1982. Origin and distribution of N in the soil. *En*: Stevenson F.J. (ed.). Nitrogen in gricultural soils. American Society of Agronomy, Madison, WI, EEUU.
- Tamames, R. 2004. El petróleo también daña la agricultura. [Online]. En www.agroprofesional.com/especiales/tamames/tamames26.php. (acceso 21 Marzo 2004; verificado 21 julio 2005). Agrocope, Spain.
- Teller, G.L. 1932. Non-protein nitrogen compounds in cereals and their relation to the nitrogen factor for protein in cereals and bread. *Cereal Chemistry* 9:261-274.
- Tiedje, J.M. 1988. Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium. p. 179-244. *En* Zehnder, A.J.B. (ed.) *Biology of anaerobic microorganisms*. John Wiley, New York.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R.L., y Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418:671-677.
- Triboi, E., y Triboi-Blondel, A.M. 2002. Productivity grain or seed composition: a new approach to an old problem-invited paper. *Eur. J. Agron.* 16:163-186.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Vaughan, B., Westfall, D.G., y Barbarick, K.A. 1990. Spring nitrogen fertilizer recommendation models for dryland hard red winter wheat. *Agron. J.* 82:565-671.
- Walkey, A. 1935. An examination of methods for determining organic carbon and nitrogen in soils. *J. Agron. Sci.* 25:598-609.
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H., y Dokken, D.J. 1996. *Climate change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, USA.
- Webster, C.P., Shepherd, M.A., Goulding, K.W.T., y Lord, E. 1993. Comparisons of methods for measuring the leaching of mineral nitrogen from arable land. *Eu. J. Soil Sci.* 44:49-62.
- Webster, C.P., Conway, J.S., Crew, A.P. y Goulding, K.W.T. 2003. Nitrogen leaching losses under a less intensive farming and environment (LIFE) integrated system. *Soil Use and Management* 19: 36-44
- Whitehead, D.C. 1995. *Grassland Nitrogen*. CAB International, Wallingford, UK.
- Wienhold, B.J., y Krupinsky, J.M. 1999. Chlorophyll meter as nitrogen management tool in malting barley. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30:2551-2562.
- Wolf, B. 1996. *Diagnostic techniques for improving crop production*. Food Products Press, The Haworth Press, Inc. New York.

- Wrage, N., Velthof, G.L., van Beusichem, M.L., y Oenema, O. 2001. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biol. Biochem.* 33:1723-1732.
- Yamulki, S., Goulding, K.W.T., Webster, C.P., y Harrison, R. 1995. Studies on NO and N₂O fluxes from a wheat field. *Atmos. Environ.* 29:1627-1635.
- Yara, 2006. Important questions on the fertilizer and the environment. Yara International ASA, Norway.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., y Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 4:415-421.
- Zarco-Hernández, J., Michelena, A., y Royo, C. 1999. Calidad del trigo duro en España. *Vida Rural* 92:22-28.

TESIS DOCTORALES PUBLICADAS

- Nº 1. La raza Latxa: Sistemas de producción y características reproductivas. EDUARDO URIARTE EGURCEGUI
- Nº 2. Estudio y puesta a punto de un método simplificado de control lechero cualitativo en la raza ovina Latxa y su inclusión en el plan de selección. GUSTAVO ADOLFO MARIA LEVRINO
- Nº 3. Implicaciones tecnológicas de la composición química del pescado con especial referencia a los lípidos. ROGELIO POZO CARRO
- Nº 4. Estudio de suelos de Vizkaia. MARGARITA DOMINGO URARTE
- Nº 5. El Maedi o neumonía progresiva en el conjunto de las enfermedades respiratorias crónicas del ganado ovino en la Comunidad Autónoma Vasca. LORENZO GONZÁLEZ ANGULO
- Nº 6. Estudio experimental de las fases iniciales de la paratuberculosis ovina. RAMÓN A. JUSTE JORDAN
- Nº 7. Identificación, origen y factores fisicoquímicos que condicionan la contaminación por elementos metálicos de sedimentos de ríos. ESTILITA RUIZ ROMERA
- Nº 8. Análisis financiero de proyectos de inversión en repoblaciones forestales. ÁLAVARO AUNOS GÓMEZ
- Nº 9. Desarrollo y evaluación del sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS) para la fertilización de las praderas permanentes. Marta Rodríguez Julia
- Nº 10. Estudio de las mieles producidas en la Comunidad Autónoma del País Vasco. MARÍA TERESA SANCHO ORTIZ
- Nº 11. La biomasa microbiana como agente de las transformaciones de nitrógeno en el suelo tras el enterrado de la paja de cereal. JESÚS ÁNGEL OCIO ARMENTIA
- Nº 12. Análisis jurídico y económico de la implementación de la política agraria comunitaria en la Comunidad Autónoma del País Vasco. BEATRIZ PÉREZ DE LAS HERAS
- Nº 13. Nemátodos formadores de quistes (*Globodera spp.*) en patata (*Solanum tuberosum L.*): caracterización taxonómica, reproducción y actividad de las formas juveniles. AZUCENA SALAZAR BAYONA
- Nº 14. Ensayo comparativo de tres métodos de tratamiento antihelmítico estratégico en rebaños de ovejas latxas. ANA LUISA GRACIA PÉREZ
- Nº 15. Estudio sobre una encefalitis vírica similar al Louping-ill en el ganado ovino de la Comunidad Autónoma Vasca. DANIEL FERNÁNDEZ DE LUCO MARTINÉZ
- Nº 16. Análisis de caracteres involucrados en la selección y mejora de *Lupinus hispanicus* Boiss. et Reuter. VERÓNICA ARRIETA PICO
- Nº 17. Contribución al estudio de fermentaciones artesanales e industriales de Rioja Alavesa. MILAGROS VIÑEIRA GARCÍA
- Nº 18. Estudio del manejo de la alimentación en los rebaños ovinos de raza Latxa y su influencia sobre los resultados reproductivos y de producción de leche. LUIS M^a. OREGUI LIZARRALDE
- Nº 19. El sector pesquero vizcaíno, 1800-1960. Análisis de la interacción de los elementos ambiental, extractivo y comercial en la pesquería. JOSÉ AGUSTÍN MAIZ ALCORTA
- Nº 20. Epidemiología, diagnóstico y control de la paratuberculosis ovina en la Comunidad Autónoma del País Vasco. J. J. ADURIZ RECALDE
- Nº 21. Agrupación de poblaciones locales de maíz (*Zea mays L.*) mediante caracteres morfológicos y parámetros ambientales. JOSÉ IGNACIO RUIZ DE GALARRETA GÓMEZ
- Nº 22. Estudio del potencial melífero de Bizkaia. AMELIA CERVELLO MARTÍNEZ

- Nº 23. Influencia de los procesos de salado y ahumado sobre las características fisicoquímicas del queso Idiazabal (compuestos nitrogenados). FRANCISCO C. IBAÑEZ MOYA
- Nº 24. El Euskal Artzain Txakurra (el perro pastor vasco) descripción y tipificación racial. MARIANO GÓMEZ FERNÁNDEZ
- Nº 25. Evaluación de diferentes ciclos de selección recurrente en dos poblaciones sintéticas de maíz. GOTZONE GARAY SOLACHI
- Nº 26. Valoración agronómica de la gallinaza: Compostaje. ADOLFO MENOYO PUELLES
- Nº 27. Relación clima-vegetación en la Comunidad Autónoma del País Vasco. AMELIA ORTUBAY FUENTES
- Nº 28. Influencia de los procesos de salado y ahumado tradicional sobre las características microbiológicas y organolépticas del queso Idiazabal. FRANCISCO J. PÉREZ ELORTONDO
- Nº 29. Mastitis en la oveja Latxa: epidemiología, diagnóstico y control. JUAN C. MARCO MELERO
- Nº 30. Contribución al conocimiento anatomopatológico y diagnóstico de la tuberculosis caprina y ovina por *Mycobacterium bovis*. M.^a MONTSERRAT GUTIÉRREZ CANCELA
- Nº 31. Estudio de factores que pueden influir en la calidad de la pluma de gallos Eusko-oiloa (Variedad *Marradune*) para la fabricación de moscas artificiales utilizadas en la pesca de la trucha. ROSA M.^a ECHARRI TOMÉ
- Nº 32. Estudio de la fracción lipídica durante la maduración del queso Idiazabal. Influencia de los procesos tecnológicos del tiempo de permanencia en salmuera y ahumado. ANA ISABEL NÁJERA ORTIGOSA
- Nº 33.- Influencia del tipo de cuajo y adición de cultivo iniciador sobre los compuestos nitrogenados durante la maduración del queso Idiazabal. M.^a SOLEDAD VICENTE MARTÍN
- Nº 34. Estudio de la infección por *Borrelia burgdorferi*, grupo *Ehrlichia phagocytophila* y virus de la encefalitis ovina en las poblaciones de ixódidos de la Comunidad Autónoma Vasca. MARTA BARRAL LAHIDALGA
- Nº 35. Lipólisis en el queso Idiazabal: efecto de la época de elaboración, del cultivo iniciador, de la pasteurización y del tipo de cuajo. FELISA CHAVARRI DÍAZ DE CERIO
- Nº 36. Aspectos inmunológicos de la paratuberculosis de los pequeños rumiantes. Respuesta inmune asociada a la vacunación. JUAN MANUEL CORPA ARENAS
- Nº 37. Desarrollo y evaluación de nuevas técnicas de diagnóstico del Maedi-Visna. ANA BELÉN EXTRAMIANA ALONSO
- Nº 38. Estudios sobre Patogenia y Diagnóstico de la Adenomatosis Pulmonar Ovina. MARÍA MERCEDES GARCÍA GOTI
- Nº 39. Análisis de los factores de explotación que afectan a la producción lechera en los rebaños de raza Latxa de la CAPV. ROBERTO J. RUIZ SANTOS
- Nº 40. Crecimiento y producción de repoblaciones de *Pinus radiata* D. Don en el Territorio Histórico de Gipuzkoa (País Vasco). LUIS MARIO CHAUCHARD BADANO
- Nº 41. Puesta a punto de técnicas PCR en heces y de Elisa para el diagnóstico de la Paratuberculosis. Estudio de prevalencia en ganado bovino. JOSEBA M. GARRIDO URKULLU
- Nº 42. Epidemiología y diagnóstico de la leptospirosis y la neosporosis en explotaciones de bovino lechero de la CAPV. RAQUEL ACHAERANDIO GALDOS
- Nº 43. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización. VALENTÍN TERÉS TERÉS
- Nº 44. Zonas endémicas de enfermedad de Lyme en la CAPV: estudio del papel de los micromamíferos en el mantenimiento de *Borrelia burgdorferi* sensu lato en el medio natural. HORACIO GIL GIL

- Nº 45. Optimización del esquema de mejora de la raza Latxa: análisis del modelo de valoración e introducción de nuevos caracteres en el objetivo de selección. ANDRÉS LEGARZA ALBIZU
- Nº 46. Influencia de las condiciones de almacenamiento, reimplantación y lluvia ácida en la viabilidad de *Pinus radiata* D. Don. MIREN AMAIA MENA PETITE
- Nº 47. Estudio sobre encefalopatías en peces: patogenicidad del nodavirus causante de la enfermedad y retinopatía vírica (ERV) y transmisión experimental del prión *scrapie* a peces. RAQUEL ARANGUREN RUIZ
- Nº 48. Enfermedades transmitidas por semilla en judía-grano (*Phaseolus vulgaris* L.): detección, control sanitario y mejora genética. ANA MARÍA DÍEZ NAVAJAS
- Nº 49. Pastoreo del ganado vacuno en zonas de montaña y su integración en los sistemas de producción de la CAPV. NEREA MANDALUNIZ ASTIGARRAGA
- Nº 50. Aspectos básicos de la mejora genética de patata (*Solanum tuberosum* L.) a nivel diploide. LEIRE BARANDALLA URTIAGA
- Nº 51. El cuajo de cordero en pasta: preparación y efecto en los procesos proteolíticos y lipolíticos de la maduración del queso de Idiazabal. M^a. ÁNGELES BUSTAMANTE GALLEGO
- Nº 52. Dinámica de la población de atún blanco (*Thunnus alalunga* Bonnaterre 1788) del Atlántico Norte. JOSU SANTIAGO BURRUTXAGA
- Nº 53. El pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) en la historia forestal de la Comunidad Autónoma de euskadi. Análisis de un proceso de forestalismo intensivo. MARIO MICHEL RODRÍGUEZ
- Nº 54. Balance hídrico y mineral del pimiento de Gernika (*Capsicum annuum* L., cv Derio) en cultivo hidropónico. Relaciones con la producción. HUGO MACÍA OLIVER
- Nº 55. Desarrollo de métodos moleculares y su aplicación al estudio de la resistencia genética y patogé- nia molecular del Scrapie. DAVID GARCÍA CRESPO
- Nº 56. Estudio epidemiológico y experimental de la transmisión y control del virus Maedi-Visna en ovino lechero de raza Latxa del País Vasco. VEGA ÁLVAREZ MAIZTEGUI
- Nº 57. Desarrollo y aplicación de técnicas de diagnóstico serológico para el estudio de la transmisión calostrual y horizontal del virus Maedi-Visna (VMV) en ovino. MARA ELISA DALTAUIT TEST
- Nº 58. Integral Study of Calving Ease in Spanish Holstein Population. EVANGELINA LÓPEZ DE MATURANA LÓPEZ DE LACALLE
- Nº 59. Caracterización Molecular, Detección y Resistencia de *Mycobacterium avium subespecie paratuberculosis*. IKER SEVILLA AGIRREGOMOSKORTA