



Universitat de Lleida

Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl

**Estudio ambiental, diagnóstico y manejo del nitrógeno en
sistemas de agricultura de regadío: aplicación a la zona regable
de los canales del Urgell**



Memoria presentada por

Pere Villar Mir

Para optar al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo

Director de Tesis: **Dr. Josep M. Villar Mir**. Universitat de Lleida

Director de Tesis

Doctorando

Lleida, Junio 1999

4.2. Material y métodos

Localización y tipo de suelo

El trabajo experimental se desarrolló en 1994 en una parcela comercial de maíz. El suelo pertenece a la serie Tornabous, franca fina sobre esquelética arenosa, mezclada, mélica, *Xerochrept calcixerólico* (SSS,1992) y se localiza Linyola (Lleida). Es un suelo profundo, muy bien drenado, con una Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD) de 133 mm/m. Todos los horizontes tienen textura franco-arenosa hasta los 90 cm de profundidad. A partir de los 90 cm se encuentra una capa de gravas por la que circula el freático. La presencia de elementos gruesos es frecuente a partir de los 25 cm de profundidad.

Tabla núm. 1. Paraámetros analíticos del perfil del suelo.

Prof. cm	pH	M.O (%)	CO ₃ Ca equiv. (%)	Arena	Limo (%)	Arcilla	W(%) -33 kPa	W (%) -1500kPa	Clase textural USDA
0-20	8.5	1.71	21.9	63.09	19.08	17.83	17.2	9.0	Franco-arenoso
20-40	8.6	--	28.0	75.87	13.63	10.50	12.3	5.1	Franco-arenoso
40-60	8.5	--	21.8	69.16	17.86	12.98	15.1	6.3	Franco-arenoso

Esta parcela se seleccionó por el elevado rendimiento obtenido (14.97 Mg ha⁻¹) durante una prospección realizada el año anterior en varias parcelas de la zona.

Diseño experimental

Las parcelas se dispusieron en un diseño de bloques al azar con un tratamiento en split-plot y con tres repeticiones. La parcela principal (main plot) fue la dosis de fertilizante en pre-siembra y la parcela secundaria (sub-plot) las aplicaciones de cobertera. En la parcela

principal se aplicaron tres dosis de fertilizante nitrogenado (0,125 y 250 kg N ha⁻¹) y en las parcelas secundarias se aplicó nitrógeno en cobertera (0 y 125 kg N ha⁻¹), resultando un total de seis combinaciones distintas (0 + 0; 0 +125; 125 + 0; 125 + 125; 250 + 0; 250 + 125) con tres repeticiones de cada una. Las aplicaciones de fertilizante nitrogenado se realizaron a mano. La fertilización de pre-siembra se realizó con urea y la cobertera con nitrato amónico(NH₄NO₃). Cada parcela tiene una superficie de 10 x 5m (50 m²).

Técnicas de cultivo

El maíz (variedad Juanita de Pioneer) se sembró el 6 de abril a 70 cm entre hileras. La dosis de siembra fue de 84.126 semillas por hectárea. Finalmente germinaron 75.713 plantas por hectárea. La fertilización de pre-siembra se realizó con 110 Unidades fertilizantes de fósforo y 110 UF de potasio por hectárea. Se realizaron dos tratamientos herbicidas e insecticidas en abril y mayo controlando prácticamente todas las malas hierbas y las plagas.

El sistema de riego es por superficie y con sistema de distribución por turnos, que es el predominante en la zona. Se realizaron un total de 8 riegos (Tabla 3) durante la época de crecimiento del cultivo. La dotación media de agua para el maíz es de 8000 m³ ha⁻¹. Se midieron las concentraciones de nitratos del agua en cada riego con un reflectómetro portátil de campo Nitrachek[®]. Antes de finalizar el invierno, se realizó un riego, debido a la escasa pluviometría registrada. El objetivo de este riego es preparar el suelo con la humedad suficiente para la germinación de las semillas.

Procedimiento de toma de muestras y análisis

Las muestras de suelo se tomaron antes de la siembra, que se corresponde con el PPNT (23 de marzo), en el estadio V6, que se corresponde con el PSNT (25 de mayo), en el estadio de polinización (8 de julio), durante el período de llenado del grano (12 de agosto) y en madurez fisiológica (28 de septiembre). Para el análisis de nitratos en el suelo se cogieron muestras cada 30 cm de profundidad hasta 120 cm. Cada muestra se obtiene mediante tres sondeos y mezclando el contenido de acuerdo con Onken et al., 1985. Las muestras de suelo se analizan sin secado previo el mismo día de muestreo. La extracción utilizada es 1:2 (p/p), 25 g de tierra con 50 mL de agua desionizada. Paralelamente se determina la humedad de la muestra para corregir el resultado obtenido. El extracto obtenido se analiza en flujo continuo en un autoanalizador en el Laboratorio de Análisis y Fertilidad de suelos, LAF.

Se instalaron piezómetros de 10 cm de diámetro para medir la fluctuación del nivel freático y su contenido en nitratos. La concentración de nitratos en el agua freática se midió con un reflectómetro portátil de campo Nitrachek®.

Se recogieron cinco plantas en cada parcela para determinar la concentración de nitratos y nitrógeno Kjeldhal en la base del tallo. Se cortaron 20 cm de longitud del tallo, entre 15 y 35 cm sobre la superficie del suelo (McClenahan et al., 1988). Las muestras de material vegetal se secaron el mismo día de su recolección a 70°C. La muestra una vez seca, se pulveriza. Para la determinación de nitratos se realiza una extracción 1:2 (p/V) con 25 g de materia seca y 50 mL de agua desionizada (Mills, 1980). El nitrógeno orgánico y amoniacal,

se determina mediante el método Kjeldhal. Se determinaron la biomasa y rendimiento en el estadio de madurez fisiológica cosechando a mano 10 m² de las filas centrales. El rendimiento en grano se ajustó a un contenido de humedad de 140g kg⁻¹ y la biomasa (hojas, tallos y zuros) al contenido seco a 70°C.

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico para ordenador Statistical Analysis System (SAS).

La concentración de nitratos detectados en las muestras de suelo se expresan en kg N- NO₃ ha⁻¹. El uso de estas unidades, permite realizar balances de nutrientes y la suma de los contenidos en nitratos del suelo con las dosis de fertilizante aplicados. Para facilitar los cálculos se ha estimado una densidad aparente del suelo de 1.5 Mg m⁻³ (valor muy frecuente en suelos de características similares a las del ensayo). La relación obtenida entre las distintas unidades es la siguiente: 4.5 kg N- NO₃ ha⁻¹ equivale a 1mg N-NO₃ kg⁻¹ (1ppm).

Las relaciones entre producción y nitrógeno absorbido con la concentración de nitratos y nitrógeno en la base del tallo (BT) fueron examinadas mediante el análisis de Cate-Nelson (Cate y Nelson, 1971) y mediante el uso de regresiones lineales.

4.3. Resultados

4.3.1. Condiciones meteorológicas durante el año 1994

Durante el período abril-agosto, la pluviometría acumulada durante 1994 fue de 47 mm, muy inferior al promedio de la zona (165.1 mm). Las estimaciones, según el agricultor, del impacto de esta falta de agua de lluvia durante el período de crecimiento de cultivo son de una reducción del rendimiento en un 22% respecto al rendimiento del año anterior en la misma parcela, que recibió 166 mm de agua de lluvia, igual al año medio. Estas estimaciones de pérdidas en el rendimiento debido al período prolongado de sequía, a pesar de disponer de agua de riego, se ajustan a la estimaciones que se dieron en la zona (25%) y a las obtenidas en el presente estudio (18%).

La estación agrometeorológica automatizada de El Palau d'Anglesola está ubicada en la zona, próxima a la parcela de estudio (3-4 km). Los resultados se presentan en la Tabla núm. 2. La ETo media diaria fue de 6.2 mm/día en junio y de 6.1 mm/día en julio, cuando en general la evapotranspiración media diaria es normalmente superior en el mes de julio. Ello fue debido precisamente a la falta de lluvia, elevado déficit de presión de vapor de la atmósfera, a la baja nubosidad, y a una velocidad media del viento ligeramente superior. Estas condiciones ambientales estresantes fueron las responsables del menor rendimiento obtenido respecto a los años anteriores, a pesar de disponer de agua de riego.

Tabla núm. 2. Datos meteorológicos medios mensuales medidos en la estación agrometeorológica de EL Palau d'Anglesola (1994).

Mes	TM	Tm	HR	U	St	P	ET _o
Enero	11.3	-2	83.4	1.5	204.2	6.1	40.5
Febrero	14.2	0.4	81.2	1.6	249.2	25.2	52.9
Marzo	19.8	2.7	72.8	1	454.3	6.1	92.4
Abril	18.9	4.8	66.9	2.6	562.6	23.8	128.1
Mayo	11.3	-2	71.4	1.1	636.8	6.1	147.3
Junio	29.7	12.4	59.6	1.2	751	7.4	186.4
Julio	34.2	16.7	62.3	0.8	736.7	1.6	188.2
Agosto	33.1	17	71	0.7	616.5	7.8	167.2
Septiembre	24.5	11.2	77	0.8	433.5	114.6	111.1
Octubre	19.9	9.3	90.9	0.4	254	117.7	53.2
Noviembre	13.7	5.7	95.6	0.3	131.6	99.8	24.6
Diciembre	8.5	1.8	95.9	0.4	82.3	7	15.5
TOTAL						423	1207.4

TM Temperatura máxima media del aire (°C); Tm Temperatura mínima media del aire (°C); HR Humedad relativa media (%); U Velocidad media del viento (m/s); St Radiación solar total (MJ/m²); P Precipitación (mm); ET_o Evapotranspiración de referencia (mm/mes)

4.3.2. Aportación de nitratos por el agua de riego y por las aguas freáticas

La aportación total de nitratos con el agua de riego depende de la dosis de agua aplicada en cada riego y de su concentración en nitratos. El cálculo de la dosis de riego real es difícil de evaluar en la zona debido al sistema de riego utilizado. No obstante se pueden estimar las dosis aportadas en función de la CRAD del suelo. La tabla núm. 3 indica el calendario de riegos de la parcela y la concentración de nitratos del agua de riego. En la tabla núm. 4 se presentan las estimaciones sobre las dosis de nitrógeno aportadas con el agua de riego.

La dosis de nitrógeno aportado con el agua de riego oscila entre 51 y 77 kg N-NO₃ ha⁻¹ de acuerdo con el trabajo de Ferrer et al. (1997) (Tabla 4). La variación depende de las dosis de riego aplicadas. Las variaciones de caudal y las secciones de las acequias dificultan el

cálculo de las dosis de riego. Las aplicaciones realizadas se estiman en 100 mm por riego (800 mm para el total de los ocho riegos realizados) (Tabla3), si bien para tener una mayor aproximación se han supuesto aplicaciones que van entre los 80 y los 120mm, con lo que se obtiene el intervalo más probable de nitratos recibidos con el agua de riego.

Durante los meses de julio y primera quincena de agosto, existe la posibilidad de que el cultivo de maíz, que tiene un desarrollado sistema radicular, llegue a consumir agua y nitratos del agua freática (tabla 5). No obstante, el consumo que puede efectuar el cultivo es muy difícil de evaluar, ya que si por ejemplo se aplica la técnica del balance de nitrógeno para su estimación, aparecen otros factores muy difíciles de evaluar en campo como son la mineralización de la materia orgánica o las pérdidas de nitrógeno por lixiviación. En la tabla núm. 5 se indica la variación de la profundidad del nivel freático y la evolución del contenido de nitratos.

Tabla núm.3. Fecha de riego y evolución de la concentración de nitrato

Fecha de riego	NO ₃ (ppm)
Mayo 31	18
Junio 10	25
Junio 21	35
Julio 3	45
Julio 15	57
Julio 28	43
Agosto 10	31
Agosto 25	25

Tabla núm. 4. Dosis de nitrógeno aportadas con el agua de riego durante la época de cultivo

Riego	Nitrato (ppm)	kg N-NO ₃ ha ⁻¹		
		80 mm	100 mm	120 mm
1	18	3.3	4.1	4.9
2	25	4.6	5.8	6.9
3	35	6.5	8.1	9.7
4	45	8.3	10.4	12.4
5	57	10.5	13.1	15.7
6	43	7.9	9.9	11.9
7	31	5.7	7.1	8.6
8	25	4.6	5.8	6.9
	Total	51.4	64.3	77

Tabla núm. 5. Profundidad del nivel freático y evolución del contenido de nitrato.

Fecha muestreo	NO ₃ (ppm)	Profundidad (cm)
6/2/94	98	124
6/14/94	70	120
6/23/94	47	105
6/30/94	137	130
7/8/94	42	120
7/13/94	25	130
7/18/94	34	150
7/28/94	60	100
8/1/94	40	104
8/12/94	41	95
8/24/94	9	100
9/8/94	3	105
9/28/94	0	105

4.3.3. Evolución del contenido de nitratos en el suelo.

El contenido de nitratos en el suelo antes del inicio del ensayo, el día 23 de marzo (PPNT), era de 56 kg N ha⁻¹ en el horizonte superficial del suelo (0-30cm) y de 125 kg N ha⁻¹ si se considera el perfil total del suelo (0-120cm).

Tabla núm. 6. Balance de nitrógeno en el horizonte superficial del suelo y estimación de las pérdidas por volatilización del nitrógeno aplicado.

Nitrógeno aplicado en pre-siembra	PSNT (kg N-NO ₃ ha ⁻¹) (0-30cm)	PSNT-PPNT (kg N-NO ₃ ha ⁻¹) (0-30cm)	(PSNT-PPNT) - N aplicado (kg N ha ⁻¹)	Cálculo pérdidas volatilización del N aplicado (%)
0	94c	38	38	0
125	203b	147	22	12.8
250	314a	258	8	12

La aplicación de fertilizantes en pre-siembra se realizó el 31 de marzo. Las dosis aplicadas fueron de 0, 125 y 250 kg N ha⁻¹. En el análisis de nitratos en el horizonte superficial del suelo durante el estadio de 6 hojas (PSNT), se observa un aumento de nitrógeno en el suelo de 38 kg ha⁻¹ en las parcelas en los que no se aplicó nitrógeno en pre-siembra. En el período transcurrido entre los dos muestreos no se realizaron riegos por lo que se suponen que las pérdidas por lixiviación y los aportes de nitrógeno con el agua de riego fueron nulos. A pesar del consumo producido por el cultivo en este estadio, se ha producido un aumento significativo de nitratos en el suelo, debido seguramente a la mineralización de la materia orgánica. Si descontamos el nitrógeno aplicado en las parcelas que recibieron fertilización de pre-siembra con 125 y 250 kg N ha⁻¹, se observa un menor aumento relativo en el total de nitratos en el suelo (tabla 6).

El aumento de N en el suelo entre PPNT y PSNT para la dosis en pre-siembra de 125 y 250 kg N ha⁻¹ fueron respectivamente de 22 y 8 kg N ha⁻¹. La explicación del menor aumento se justifica probablemente en la pérdida por volatilización que experimenta la parte amoniacal del fertilizante aportado, y que se ha estimado por diferencia con los resultados obtenidos (Tabla núm. 6).

El cálculo realizado a partir de las diferencias observadas para el testimonio (dosis 0) respecto la

dosis de fertilizante aplicado indica que las posibles pérdidas de fertilización en las dos dosis aplicadas fueron de un 12 y un 12.8% de la cantidad total de nitrógeno aplicado. El incremento de nitrógeno en el suelo en el horizonte superficial superó así los 38 kg N ha⁻¹ entre los dos meses de intervalo existentes entre los muestreos correspondientes al PPNT y al PSNT.

Tabla núm. 7. Contenido de nitratos en el suelo en distintos estadios de cultivo.

Nitrógeno aplicado en pre-siembra	PSNT (kgN-NO ₃ ha ⁻¹) (0-30cm)	PSNT (kgN-NO ₃ ha ⁻¹) (0-120cm)	N aplicado en cobertera Kg N ha ⁻¹	N polinización (0-120cm) Kg N-NO ₃ ha ⁻¹	N llenado del grano (0-120cm)	N Residual (0-120 cm) kg N-NO ₃ ha ⁻¹
0	94c	175c	0	47c	50b	53b
			125	141a	48b	71ab
125	203b	285b	0	79b	52b	98 ^a
			125	125ab	119a	121 ^a
250	314a	407a	0	143a	62ab	102a
			125	139a	57ab	71ab

Entre columnas, medias seguidas de la misma letra no tienen diferencias significativas para un nivel de significación de 0.05

Tras la aplicación de cobertera se realizaron tres riegos por inundación antes del estadio de polinización. A pesar de ello todavía se detectan diferencias significativas en el contenido de nitratos en el suelo (tabla núm. 7). Posteriormente al estadio de polinización se realizaron otros tres riegos antes del muestreo en llenado del grano (12 de agosto).

Finalmente en el muestreo realizado en madurez fisiológica (28 de septiembre) se observa cierta variabilidad entre subparcelas pero sin ningún tipo de correlación con otros factores de producción. Únicamente se han detectado niveles en el suelo significativamente inferiores en las parcelas no fertilizadas (0+0). En este caso la cantidad de nitratos residuales fue de 53 kg N-NO₃ ha⁻¹.

4.3.4 Producción de maíz-grano y absorción del nitrógeno

Las mayores producciones en grano se registraron para aportaciones en pre-siembra de 125 y 250 kg N ha⁻¹ y sin aportación de fertilizante en cobertera. Las parcelas testimonio (dosis 0) fueron las que registraron el promedio de producción más bajo (9.330 kg ha⁻¹). La producción de biomasa total fue en consonancia con los rendimientos totales en grano (tabla núm. 8).

La concentración de nitrógeno en grano alcanzó un máximo de 1.53% para la máxima aportación de fertilizante N (250+125 kg N ha⁻¹). Los mínimos se registraron en el testimonio y cobertera sobre testimonio (0 y 0+125 kgN ha⁻¹). En el resto de tratamientos no se observaron diferencias significativas (Tabla 9).

El tratamiento de cobertera sobre testimonio (0+125) consiguió aumentar significativamente la producción respecto al testimonio, aunque disminuyó ligeramente el contenido en N del grano. La falta de absorción N durante los primeros estadios de desarrollo y el mayor crecimiento producido posteriormente produjo un menor transporte, en proporción, de N al grano. La máxima absorción de nitrógeno se registró en los tratamientos en pre-siembra con 250 kg N ha⁻¹ con y sin cobertera y para 125 kg en pre-siembra (234, 232 y 240 kg N ha⁻¹ respectivamente). Se detectaron niveles significativamente más bajos de absorción en el testimonio (175 kg N ha⁻¹) (Tabla núm. 9).

Tabla núm. 8. Nitrógeno aplicado y repartición de biomasa.

N Aplicado kg N ha ⁻¹	Tallos Kgha ⁻¹	Hojas kgha ⁻¹	Zuros Kgha ⁻¹	Grano kgha ⁻¹	Biomasa kgha ⁻¹	Indice de Cosecha
0 + 0	2968	3369	1123	9330 b	15484b	0.52
0+125	3355	3808	1269	10549 ab	17504ab	0.52
125+0	3520	3996	1332	10932 a	18250a	0.52
125+125	3272	3714	1238	10466 ab	17225ab	0.52
250+0	3405	3865	1288	11322 a	18295a	0.53
250+125	3338	3789	1263	10608 ab	17513ab	0.52

Entre columnas, medias seguidas de la misma letra no tienen diferencias significativas para un nivel de significación de 0.05

Tabla núm. 9. N absorbido y concentración de N en distintas partes del maíz.

N Aplicado kg N ha ⁻¹	% N Tallo	%N Hoja	%N Zuro	%N Grano	N absorbido kg N ha ⁻¹
0 + 0	0.48 b	0.73 a	0.61 b	1.38 bc	175 c
0+125	0.57 ab	0.78 a	0.68 ab	1.31 c	196 bc
125+0	0.69 ab	1.05 a	0.87 a	1.43 ab	234 a
125+125	0.78 a	0.90 a	0.84 a	1.50 ab	227 ab
250+0	0.73 a	0.98 a	0.86 a	1.47 ab	240 a
250+125	0.73 a	0.93 a	0.83 a	1.53 a	232 a

Entre columnas, medias seguidas de la misma letra no tienen diferencias significativas para un nivel de significación de 0.05

4.3.5 Análisis de nitratos y nitrógeno en la base del tallo

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla núm. 10.

Nitratos

En el estadio V6, la concentración de nitratos en la base del tallo (BT) fue significativamente inferior en el tratamiento con dosis 0 (8.8 g N- NO₃ kg⁻¹) respecto al resto de parcelas fertilizadas con nitrógeno en pre-siembra, que presentaban hasta 21.8 g N- NO₃ kg⁻¹ en el estadio de polinización.

El contenido de nitratos en la base del tallo fue de 0.28 g N- NO₃ kg⁻¹ en el tratamiento 0+0 y significativamente inferior al resto de tratamientos. Los tratamientos con 125 kg N ha⁻¹ (0+125 y 125 +0) presentan una concentración de 12.97 g N- NO₃ kg⁻¹ y 11.13 g N- NO₃

kg⁻¹ respectivamente y también significativamente distintos del resto de los tratamientos. El valor más alto fue de 19.92 g N- NO₃ kg⁻¹ para el tratamiento 250 + 125. En la fase de madurez fisiológica el contenido de nitratos más bajo y significativamente inferior fue para el tratamiento 0+0 con 0.15 g N- NO₃ kg⁻¹. En las parcelas con tratamientos más elevados de nitrógeno en pre-siembra más cobertera se llegó a alcanzar los 10.61 g N- NO₃ kg⁻¹ (125+125) y 8.44 g N- NO₃ kg⁻¹ (250+125).

Nitrógeno total

En el estadio V6, la concentración de nitrógeno en la base del tallo, manifiesta diferencias significativamente inferiores entre el tratamiento 0 (2.84%) y el resto de tratamientos. Dichas diferencias se mantienen durante los estadios de polinización y madurez fisiológica. En el período de polinización el contenido de nitrógeno total en la base del tallo fue de 0.44% en la base del tallo y significativamente inferior al resto de tratamientos que llega a tener un contenido medio del 0.92% en el tratamiento 125+125. En madurez fisiológica el nivel inferior continua siendo para el tratamiento 0 con un 0.41% y el contenido más alto para el tratamiento 125+125 con 0.76%.

Tabla núm. 10. Concentración de nitratos y nitrógeno en la base del tallo en distintos estadios del cultivo

N Aplicado kg N ha ⁻¹	Nitratos en V6 (gN- NO ₃ kg ⁻¹)	Nitratos en poliniz. (gN- NO ₃ kg ⁻¹)	Nitratos en madurez fisiológ. (gN- NO ₃ kg ⁻¹)	N total en V6 (%)	N total en poliniz. (%)	N total en madurez fisiológica (%)
0 + 0	8.88 b	0.28 c	0.15 b	2.84 b	0.44 c	0.41 b
0+125		12.97 b	2.43 a		0.70 b	0.48 ab
125+0	18.86 a	11.13 b	2.49 a	3.27ab	0.83 a	0.62 ab
125+125		18.94 a	10.61 a		0.92a	0.76 a
250+0	21.8 a	18.40 a	4.07 a	3.43 a	0.80 ab	0.73 ab
250+125		19.92 a	8.44 a		0.89 a	0.74 a

Entre columnas, medias seguidas de la misma letra no tienen diferencias significativas para un nivel de significación de 0.05

Para observar el aumento (evolución) medio del contenido de nitratos y de nitrógeno total se han agrupado los tratamientos de acuerdo con la cantidad total de nitrógeno aplicada independientemente del momento de aplicación (tabla núm. 11). Los resultados muestran como a mayor cantidad de nitrógeno aplicado siempre hay un mayor contenido tanto de nitratos como de nitrógeno total. El tratamiento cero muestra niveles significativamente inferiores al resto de tratamientos.

Tabla núm. 11. Contenidos medios de nitratos y nitrógeno total, en los estados de polinización y en madurez fisiológica

N aplicado kgN ha ⁻¹	Nitratos en polinización (gN- NO ₃ kg ⁻¹)	Nitratos en madurez fisiológica (gN- NO ₃ kg ⁻¹)	N total en polinización (%)	N total en madurez fisiológica (%)
0	0.28c	0.15b	0.44c	0.41ns
125	12.05b	2.46a	0.77ab	0.55ns
250	18.67a	7.34a	0.86ab	0.75ns
375	19.92a	8.44a	0.89a	0.74ns

Entre columnas, medias seguidas de la misma letra no tienen diferencias significativas para un nivel de significación de 0.05. ns muestra las diferencias no significativas.

4.4. Discusión de los resultados

4.4.1. Influencia del abonado en el rendimiento.

Los contenidos en nitratos en el suelo (0-30cm) en el estadio V6 (PSNT) por debajo de 94 kg N-NO₃ ha⁻¹, equivalentes a 21 ppm, se consideran insuficientes para alcanzar producciones medias en las condiciones edáficas, de riego y meteorológicas del presente ensayo. Dichos resultados están en concordancia con Magdoff (1991) para rendimientos próximos a los 11 Mg ha⁻¹.

Una fertilización de cobertera de 125 kg N ha⁻¹ para dicho nivel fue suficiente para alcanzar la productividad de los otros tratamientos. Una concentración de nitratos en el horizonte superficial del suelo (0-30cm) en el estadio V6 (PSNT) de 203 kg N-NO₃ ha⁻¹, equivalente a 45 ppm, fue suficiente para alcanzar la productividad media para las condiciones del ensayo. Dicho nivel es superior al propuesto por otros autores como Magdoff (1991) y Blackmer (1992).

La dosis mínima de nitrógeno aplicada para alcanzar las máximas producciones fue de 125 kg N ha⁻¹, no importando el momento de aplicación, pre-siembra o cobertera. La cantidad de nitrógeno disponible en el horizonte superficial del suelo antes del abonado (PPNT) fue de 56 kgN ha⁻¹ equivalente a una concentración de 12 ppm.

Para rendimientos promedio de 10.5 Mg ha⁻¹, con extracciones de cultivo de 215 kg N ha⁻¹ (tabla núm.14) y con niveles medios en el horizonte superficial del suelo de 12 ppm (PPNT), fueron suficientes aplicaciones de FN de 125 kg N ha⁻¹.

La figura 1 muestra el rendimiento obtenido en cada sub-plot en relación al nitrógeno aplicado en pre-siembra y en cobertera. Observando solo los tratamientos sin cobertera, en color azul, se distingue un aumento de producción entre el testimonio y las distintas dosis

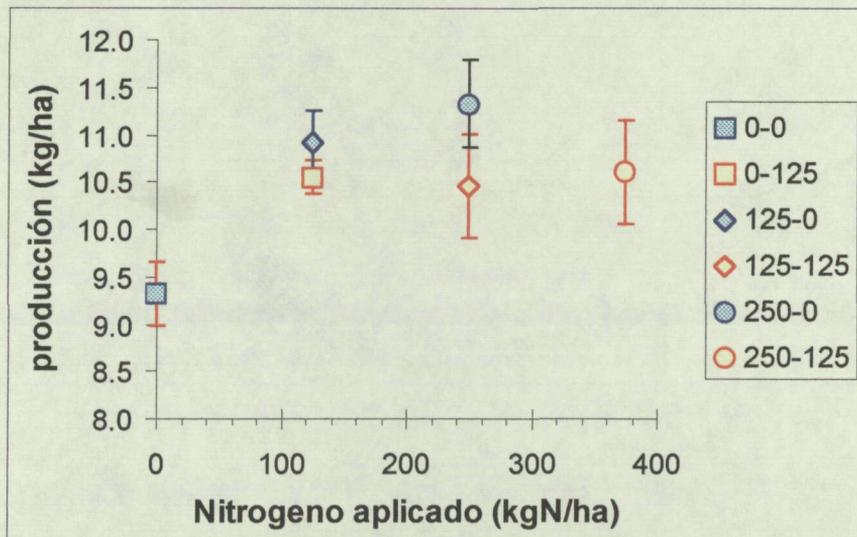


Figura 1. Relación entre el rendimiento en grano y el nitrógeno aplicado.

de fertilizante nitrogenado aplicado en pre-siembra. Al analizar todos los datos en conjunto apenas se observan diferencias entre los distintos tratamientos.

No se observan diferencias significativas entre el fraccionamiento del nitrógeno. En este caso no se recomienda fraccionar la fertilización para aumentar la producción en grano ni tampoco para aumentar el contenido en proteínas del cultivo. (Tabla 12).

Estos resultados contradicen las prácticas habituales de la zona (en todo tipo de suelos) en los cuales el fraccionamiento del abonado nitrogenado es habitual.

Tabla 12. Diferencias de rendimiento, absorción y N en grano entre aplicaciones de cobertera.

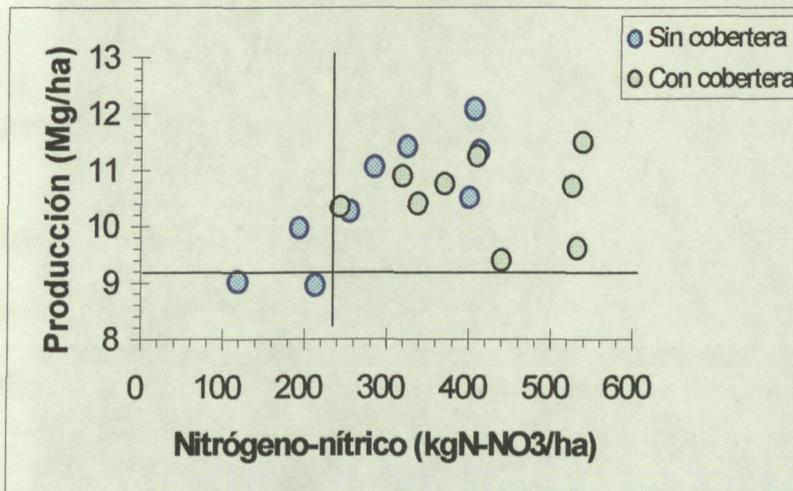
N aplicado en cobertera	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Absorción (kgN ha ⁻¹)	Nitrógeno en el grano (%)
0	10541a	216a	1.43a
125	10528a	218a	1.45a

Entre columnas, medias seguidas de la misma letra no tienen diferencias significativas para un nivel de significación de 0.05

4.4.2. El análisis de nitratos como elemento de diagnóstico en las recomendaciones de fertilización nitrogenada.

La figura 2 muestra una elevada correlación entre las aplicaciones en pre-siembra, sin cobertera, y la producción de maíz grano ($R^2=0.69$). En el eje de abcisas se muestra el nitrógeno detectado en el perfil del suelo de 0-120cm en el estadio de desarrollo de cultivo de 6 hojas y en el caso de aplicaciones de cobertera se han sumado los 125 kg N ha⁻¹

Figura 2. Relación entre la producción de maíz grano y el contenido de nitratos en el



suelo 0-120cm en el estadio de desarrollo de cultivo de 6 hojas y las aplicaciones de cobertera.

aplicados. Aplicando la técnica de Cate-Neson se muestra como para rendimientos de 9.20 Mg ha⁻¹ es suficiente un contenido de nitrógeno en el perfil del suelo (0-120cm) de 230 kg N- NO₃ ha⁻¹ en el estadio de desarrollo del cultivo de 6 hojas. Dicha cantidad equivale a

unos 142 kg N ha^{-1} en el horizonte superficial (Figura 3) o a una concentración de $31 \text{ mg N- NO}_3 \text{ kg}^{-1}$. Dicha concentración coincide con la propuesta por Magdoff (1991) como nivel de no respuesta para producciones en grano del orden de los 11 Mg ha^{-1} .

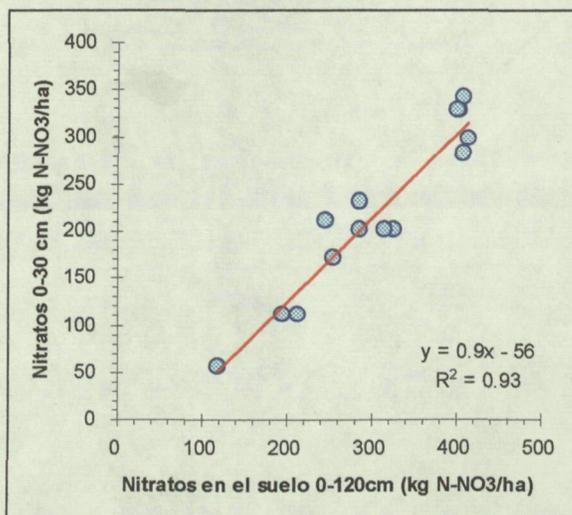


Figura 3. Relación entre el contenido de nitratos en el horizonte superficial del suelo (0-30cm) y en el perfil del suelo (0-120cm).

En la figura 3 se muestra la elevada correlación detectada en el contenido de nitratos en el horizonte superficial (0-30cm) y el total del perfil del suelo (0-120cm) en el estadio de desarrollo del cultivo de 6 hojas.

4.4.3. Relaciones entre la concentración de nitrógeno kjeldhal y nitratos en la base de del tallo de maíz en distintos estadios de desarrollo del cultivo con el nitrógeno disponible en el suelo.

Para un nivel crítico de $230 \text{ kg N- NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ en el perfil del suelo (0-120cm) en el estadio de 6 hojas, se intenta evaluar la concentración crítica de nitratos y nitrógeno en la base del tallo en este mismo estadio con el objetivo de disponer de otro método de evaluación de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Las correlaciones obtenidas entre niveles en el suelo y concentraciones en planta fueron de 0.68 para los nitratos y de 0.57 para el nitrógeno. Aplicando la técnica de Cate-Nelson se detecta un nivel crítico de $15 \text{ g N- NO}_3 \text{ kg}^{-1}$. Dicho nivel coincide plenamente con los resultados obtenidos por Fox et al. (1989)

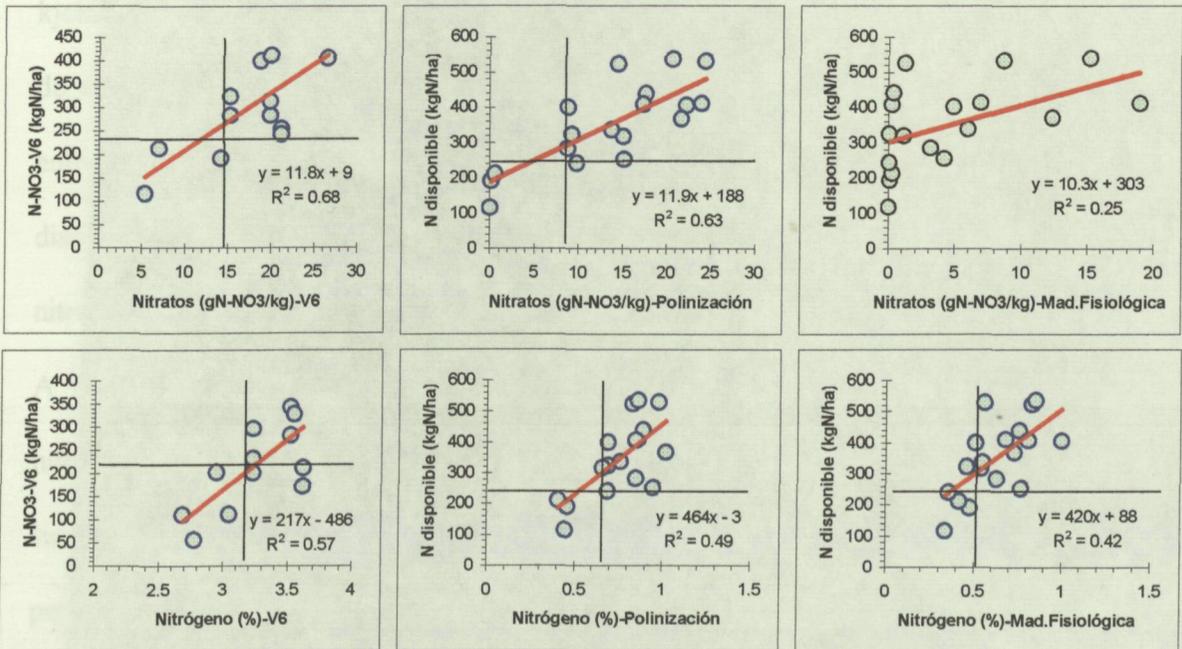


Figura 4. Relaciones entre la concentración de nitrógeno kjeldhal y nitratos en la base de del tallo de maíz en distintos estadios de desarrollo del cultivo con el nitrógeno disponible en el suelo.

que obtuvo un nivel de $14.5 \text{ g N- NO}_3 \text{ kg}^{-1}$, y se sitúa dentro del intervalo establecido por

Iversen et al (1985) de entre 11 y 16 mg N- NO₃ kg⁻¹ y McClenahan et al. (1988) de entre 9 y 17.8 g N- NO₃ kg⁻¹. Respecto a la concentración de nitrógeno kjeldhal en la base del tallo y aplicando la técnica de Cate-Nelson se obtuvo un nivel crítico de 3.2 %.

Para relacionar las concentraciones en la base del tallo de nitratos y nitrógeno en estados más avanzados del cultivo se ha considerado el contenido de nitratos en el suelo a inicio del crecimiento vegetativo (6 hojas) y en el caso de aplicación de coberteras se han añadido los 125 kg N ha⁻¹. Las correlaciones obtenidas en el estadio de polinización han sido de 0.63 y 0.49 respectivamente para las concentraciones de nitratos y nitrógeno kjeldhal. Al igual que en el estadio anterior se obtienen mejores correlaciones en el análisis de nitratos que de nitrógeno kjeldhal. Aplicando la técnica de Cate-Nelson se obtienen niveles críticos de 8 mg N- NO₃ kg⁻¹ en el caso del análisis de nitratos y de 0.6% para el análisis de nitrógeno kjeldhal en la base del tallo. La falta de antecedentes analizados en esta época de desarrollo de cultivo no nos permite comparar con otros estudios. La proporcionalidad mantenida entre los dos estadios de cultivo hace pensar en la posibilidad de poder diagnosticar la disponibilidad de nitrógeno en el suelo en momentos en que ya no pueda medirse el nivel de nitratos en el suelo.

A final de ciclo, en el estadio de madurez fisiológica, se detectan concentraciones de nitratos en la base del tallo inferiores a 1.8 g N- NO₃ kg⁻¹ para contenidos de nitrógeno en el suelo de entre 100 y 450 kg N ha⁻¹. La elevada variabilidad detectada en esta relación hace pensar en la poca fiabilidad de este análisis para evaluar el exceso de nitrógeno disponible para el cultivo en contradicción con Binford et al (1990). Respecto al contenido en nitrógeno kjeldhal en la base del tallo se ha detectado un nivel de correlación de 0.42. Aplicando la técnica de Cate-Nelson para un contenido de nitrógeno disponible de 230 kg N

ha⁻¹ se obtiene una concentración crítica de 0.5%. Concentración próxima a la detectada en el estadio de polinización.

4.4.4. Relaciones entre la concentración de nitrógeno kjeldhal y nitratos en la base de del tallo de maíz en distintos estadios de desarrollo del cultivo con la producción de maíz grano.

Para producciones de maíz grano de 9.2 Mg ha^{-1} y aplicando la técnica de Cate-Nelson se detecta un intervalo crítico de nitratos en la base del tallo en el estadio de desarrollo del cultivo de 6 hojas de entre 8 y $14 \text{ g N- NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ para garantizar productividades superiores a las detectadas en el ensayo con un nivel de probabilidad del 89%. Análogamente, se

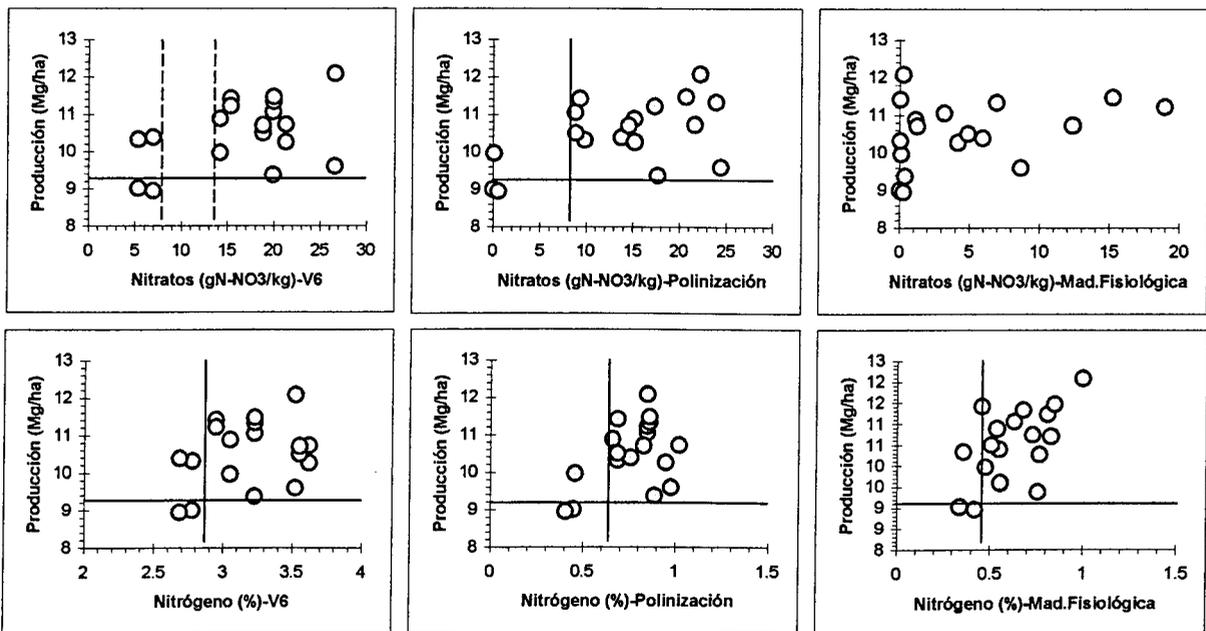


Figura 5. Relaciones entre la concentración de nitrógeno kjeldhal y nitratos en la base de del tallo de maíz en distintos estadios de desarrollo del cultivo con la producción de maíz grano.

detecta una concentración crítica de nitrógeno del 2.9 % en la base del tallo en el mismo período y con idéntica probabilidad.

En las concentraciones de nitratos y nitrógeno en la base del tallo en el estadio de polinización y aplicando la técnica de Cate-Nelson, se obtienen los mismos intervalos críticos que los encontrados para la evolución de N disponible en el suelo, aunque con una probabilidad ligeramente inferior (94%).

En el estadio de madurez fisiológica, se obtienen los mismos resultados que en la relación con el nitrógeno disponible en el suelo. No se detecta ninguna relación entre la concentración de nitratos en la base del tallo a final de ciclo con la producción. Respecto a la concentración de nitrógeno en la base del tallo se observa una tendencia creciente en relación a la productividad de cada sub-plot, lo que permite aplicar la técnica de Cate-Nelson estableciendo un nivel crítico de 0.5% de concentración de nitrógeno en la base del tallo.

4.4.6. Relaciones entre la concentración de nitrógeno kjeldhal y nitratos en la base de del tallo de maíz en distintos estadios de desarrollo del cultivo con la absorción de nitrógeno del cultivo a final de ciclo.

Para un nivel crítico de nitratos en la base del tallo en el estadio de desarrollo del cultivo de 6 hojas de $15 \text{ g N- NO}_3 \text{ kg}^{-1}$ la absorción de nitrógeno por parte del cultivo a final de ciclo supera los 200 kg N ha^{-1} con una probabilidad del 100% en el ensayo realizado.

Para este mismo nivel de absorción de nitrógeno, la concentración de nitrógeno kjeldhal en la base del tallo se sitúa en un intervalo de entre 2.9 y 3.2 %.

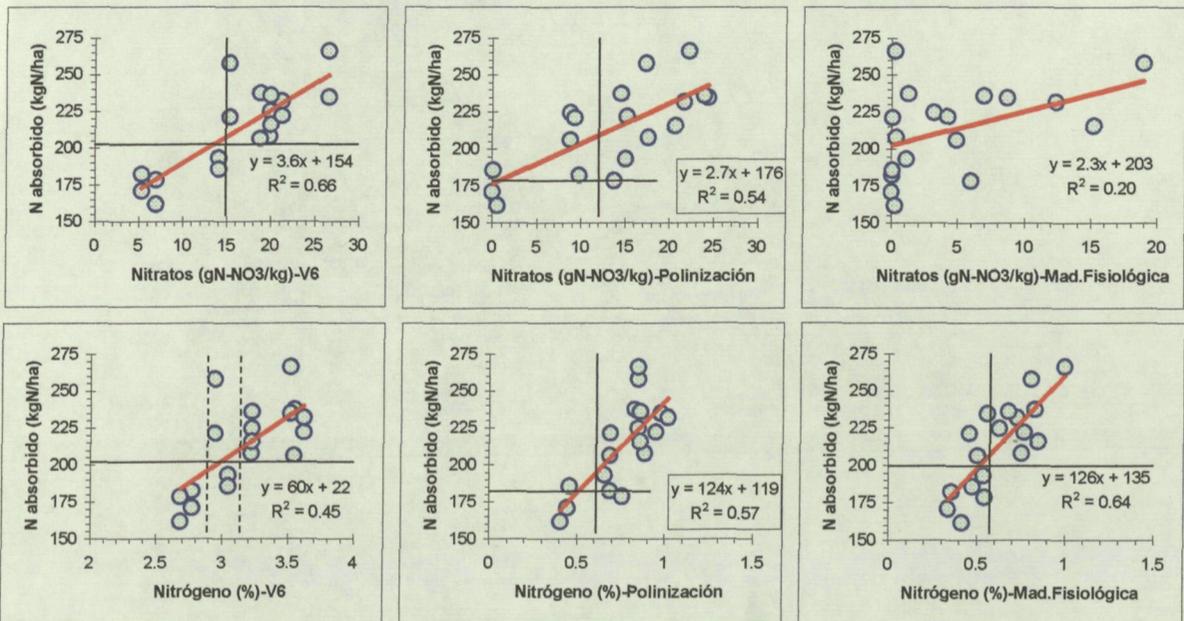


Figura 6. Relaciones entre la concentración de nitrógeno kjeldhal y nitratos en la base de del tallo de maíz en distintos estadios de desarrollo del cultivo con la absorción de nitrógeno del cultivo a final de ciclo.

En el estadio de polinización, si mantenemos los mismos niveles de concentración de

puntos aplicando la técnica de Cate-Nelson para una cantidad de nitrógeno absorbido superior a 180 kg N ha^{-1} .

A final de ciclo, en el estadio de madurez fisiológica, se detecta una elevada correlación entre la concentración de N en la base del tallo y el nitrógeno absorbido por el cultivo a final de ciclo ($R^2=0.64$). Aplicando la técnica de Cate-Nelson se obtiene una concentración crítica de 0.6 % de nitrógeno con una probabilidad del 83%. Dicha concentración es similar a la obtenida al comparar con el nitrógeno disponible en el suelo.

La concentración de nitratos en la base del tallo en madurez fisiológica no presenta ninguna relación con la cantidad de nitrógeno absorbido al final de ciclo.

4.4.7. Estimación del nitrógeno lixiviado

El nitrógeno lixiviado se estimó usando una aproximación del balance de masas de acuerdo con Sexton et al., (1996). Los inputs fueron el contenido de nitratos en el suelo (0-120cm) en el estadio V6, y el nitrógeno aplicado en cobertera. Los outputs fueron el nitrógeno absorbido y los nitratos residuales en el suelo (0-120cm) en el estadio de madurez fisiológica.

La cantidad de nitrógeno lixiviado del sistema se obtiene calculando la diferencia entre los inputs y los outputs. En una primera aproximación el balance es negativo para el tratamiento 0+0 y 125+0. La falta de predicción de la mineralización de la materia orgánica, estimada anteriormente en 50 kgN ha^{-1} en el perfil del suelo durante los dos primeros meses de inicio del ensayo es uno de los factores a tener en cuenta. Si suponemos nulas las pérdidas por lixiviación para el tratamiento 0+0, podemos calcular el porcentaje de pérdidas relativas según el nitrógeno aplicado en cada tratamiento. Para ello se añade al nitrógeno lixiviado en cada caso los 53 kg N ha^{-1} del tratamiento cero. De esta forma, por ejemplo, en el tratamiento 0+125 la relación entre el nitrógeno lixiviado y el nitrógeno aplicado se estimaría añadiendo 53 kg N ha^{-1} a los 33 kg N ha^{-1} obtenidos en el balance y dividido por los 125 kg N ha^{-1} aplicados. El resultado de aplicar esta metodología nos indica que un 69% del nitrógeno aplicado ha sido lixiviado, lo que nos indica una menor eficiencia de las aplicaciones en cobertera.

Así se detectan las mayores pérdidas de lixiviación cuanto más fertilizante se aplica. Con aportaciones de 375 kgN ha^{-1} , aplicadas de forma fraccionada (250+125), se obtienen

pérdidas del 75% del N aplicado. También se han detectado pérdidas muy elevadas para coberteras sobre el testimonio (69%).

Aplicaciones en pre-siembra de 125 kg N ha⁻¹ optimizan el aprovechamiento del nitrógeno, registrándose unas pérdidas relativas de nitrógeno del 5 % (tabla 13).

Esta aproximación nos permite comparar el nitrógeno lixiviado entre los distintos tratamientos. El balance realizado en el testimonio entre pre-siembra y madurez fisiológica aporta un saldo neto de nitrógeno al sistema de 100 kg N ha⁻¹.

Tabla núm. 13. Cálculo de la fracción de nitrógeno lixiviado respecto el N aplicado.

N aplicado kg N ha ⁻¹	PSNT 0-120cm (kgN-NO ₃ ha ⁻¹)	N Aplicado kg N ha ⁻¹	N absorbido kg N ha ⁻¹	N Residual (0-120 cm) kg N-NO ₃ ha ⁻¹	N Lixiviado kg N ha ⁻¹	Estimación del % de N lixiviado/apli cado
0 + 0	175c	0	175c	53b	-53c	-
0+125	175c	125	196bc	71b	33b	69a
125+0	285b	125	234a	98ab	-47c	5c
125+125	285b	250	227ab	121b	62b	46b
250+0	407a	250	240a	102a	65b	47b
250+125	407a	375	232a	71ab	229a	75a

Entre columnas, medias seguidas de la misma letra no tienen diferencias significativas para un nivel de significación de 0.05

4.4.8. Fracción aparente de nitrógeno recuperado (FNR).

La fracción aparente de nitrógeno recuperado se mide por el cociente entre la diferencia de nitrógeno absorbido respecto al testimonio y el nitrógeno aplicado. El mejor aprovechamiento del nitrógeno aplicado se detectó para aportaciones de 125 kg N ha⁻¹ en pre-siembra. En este caso, la eficiencia de la fertilización nitrogenada alcanzó el 47 %. Los tratamientos con menor eficiencia del uso del nitrógeno aplicado fueron para 0+125 y

250+125.

Tabla núm. 14. Cálculo de la eficiencia en el uso del nitrógeno y de la fracción de nitrógeno recuperado.

N Tratamiento	N absorbido	EUNi	EUNe	FRN (%)
0 + 0	175 b	53.3a	-	-
0+125	196 b	53.8a	84.4a	17bc
125+0	234 a	46.7b	87.5a	47a
125+125	227 a	46.1b	41.9b	21b
250+0	240 a	47.2b	45.3b	26b
250+125	232 a	45.8b	28.3c	15bc

Entre columnas, medias seguidas de la misma letra no tienen diferencias significativas para un nivel de significación de 0.05

La FRN media indica la progresiva ineficiencia en la utilización del nitrógeno aplicado como fertilizante mineral. En un nivel general, con dosis prácticas normalmente superiores a 300 UF de N y en todo tipo de suelos, el rendimiento productivo de cada kg de nitrógeno es muy bajo en la zona de estudio. Igualmente es destacable la disminución de la FRN de las aplicaciones tardías. Desde una perspectiva de eficiencia energética de la producción de maíz, el abonado nitrogenado debería aplicarse en pre-siembra (tabla 14).

4.4.9. Eficiencia interna en el uso del nitrógeno (EUNi).

Se denomina eficiencia interna en el uso del nitrógeno a la relación entre el rendimiento (kg ha⁻¹) y el nitrógeno absorbido (kg N ha⁻¹). (tabla 14). Los resultados obtenidos son similares y varían entre 45.8 kg grano por kg absorbido en el tratamiento 250+125 y los 53.8 kg grano por kg absorbido en el tratamiento 0+125.

4.4.9. Eficiencia externa en el uso del nitrógeno (EUNe).

Se denomina eficiencia externa en el uso del nitrógeno al cociente entre la producción de maíz grano (kg ha^{-1}) y el nitrógeno aplicado (kg N ha^{-1}). Dicha relación muestra la eficiencia del cultivo en utilizar el nitrógeno aplicado. Al aumentar la dosis de fertilizante aplicado, se observa una menor eficiencia. La mayor eficiencia en el aprovechamiento del nitrógeno se localiza en las aplicaciones de 125 kg N ha^{-1} en pre-siembra.

Los resultados obtenidos muestran indican que las EUNe son más bajas conforme aumenta la cantidad de N aplicado.

4.5. Conclusiones

El estudio realizado, con las precauciones necesarias al tratarse de un ensayo de un año, nos indica que:

- ◆ En las condiciones de la experiencia, las fertilizaciones nitrogenadas comprendidas entre los 125 y los 375 kg N ha⁻¹ no producen diferencias significativas en la producción de maíz en grano. El aporte de nitratos del agua de riego, la mineralización de la materia orgánica y la presencia de agua freática con nitratos a 1.2 m de profundidad, contribuyen de forma importante al suministro de nitrógeno al cultivo. Las aportaciones netas externas a la fertilización se estimaron en 100 kg N ha⁻¹, en esta experiencia.
- ◆ Dosis elevadas de fertilización nitrogenada no incrementaron el contenido de nitratos residuales en el suelo. La lixiviación de nitratos del perfil del suelo producida por los riegos no permitió la acumulación de los excedentes de nitrógeno aplicado.
- ◆ El fraccionamiento de la fertilización nitrogenada no contribuyó a aumentar la producción de maíz-grano en las condiciones del ensayo.
- ◆ La mayor eficiencia en el uso del nitrógeno se obtuvo en las aplicaciones realizadas en pre-siembra.
- ◆ El análisis de nitratos en el suelo antes de la fertilización de pre-siembra (PPNT) se mostró como el método más adecuado para estimar las necesidades de fertilización

nitrogenada al nivel de parcela.

- ◆ El análisis de nitratos en el suelo en el estadio de desarrollo del cultivo de seis hojas (PSNT) se mostró como un buen indicador de la deficiencia o suficiencia de la fertilización nitrogenada realizada.
- ◆ El análisis del tejido vegetal de la base del tallo en los estadios de cultivo de seis hojas y polinización se mostró como una herramienta de especial interés para determinar con anticipación la calidad del maíz (de interés para el maíz para forraje por su contenido proteico).
- ◆ El análisis de la concentración de nitratos y nitrógeno kjeldhal del tejido vegetal en la base del tallo en los estadios de 6 hojas y polinización son un buen test para establecer un diagnóstico acerca de la disponibilidad de nitratos en el suelo para el cultivo.

4.6. Agradecimientos

Al Sr. Antoni Torremadé, agricultor, por su cooperación en el ensayo. Este proyecto ha sido financiado por el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya (codigo de la convocatoria 06.01.94).

4.7. Referencias

- Binford, G.D., Blackmer, A.M., El-Hout, N.M. 1990. Tissue test for excess nitrogen during corn production. *Agron. J.* 82:124-129.
- Binford, G.D., Blackmer, A.M., Cerrato, M.E. 1992. Relationship between corn yields and soil nitrate in late spring. *Agron. J.* 84:53-59.
- Blackmer, A.M., 1992. Nitrogen needs for corn in a sustainable agriculture. 44th annual corn and sorghum research conference.
- Blackmer, T.M., Schepers, J.S., 1994. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25 (9&10), 1791-1800.
- Cate, R.B., Nelson, L.A. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation into two classes. *Soil Sci.Soc.Amer. Proc.* 35:658-660.
- El-Hout, N.M., Blackmer, A.M., 1990. Nitrogen status of corn after alfalfa in 29 Iowa fields. *J. of Soil and Water Cons.* 45, 115-117.
- Ferrer, F., Villar, J.M., Villar, P. Aran, M. 1997. Impacto del nitrógeno presente en el agua de riego en la zona regable del canal d'urgell. XV Congreso Nacional de Riegos. Lleida. DARP. Generalitat de Catalunya. 241-248.

Fox, R.H., Roth, G.W., Iversen, K.V., Piekielek, W.P., 1989. Soil and tissue nitrate test compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agron. J.* 81:971-974.

Frank, K.D., 1989. Residual soil NO₃-N. Variability, sampling, interpretation and effect on corn yield. 1989 North Central Extension Industry Soil Fertility Conference, November 8-9, 1989, pp: 108-121.

Hanway, J. 1982. How a corn plant develops, special report N.48 Iowa State Univ., Ames, Ia., 50011.

Heckman, JR., Grovindasamy, R., Probst, D.J. Chamberlain, E.A., Hlubik, W.T, Mickel, R.C., Probst, E.P.1996. Corn response to sidedress nitrogen in relation to soil nitrate concentration. *Soil Science and Plant Analysis*, Vol.27.

Herrero, C., Boixadera, J., Danés, R., Villar, J.M. 1993. Mapa de sòls de Catalunya 1:25.000. Full núm.:360-1-2 (65-28) Bellví. 198 pp.

Iversen, K.V., Fox, R.H., Piekielek, W.P. 1985. The relationships of nitrate concentrations in young corn stalks to soil nitrogen availability and grain yields. *Agron. J.* 77:927-932.

Jokela, W.E., Randall, G.W., 1989. Corn yield and residual soil nitrate as affected by time and rate of nitrogen application. *Agron. J.* 81: 720-726.

Liang, B.C., Remillard, M., MacKenzie, A.F. 1991. Influence of fertilizer, irrigation, and non-growing season precipitation on soil nitrate-nitrogen under corn. *J. Environ. Qual.* 20: 123-128.

Magdoff, F.R., Ross, D., Amadon, J. 1984. A soil test for Nitrogen Availability to corn. *Soil Science Soc. Am. J.* 48: 1301-1304.

McClenahan, E.J. Killorn R. 1988. Relationship between basal corn stem nitrate N content at V6 growth stage and grain yield. *J. Prod. Agric.* 1: 322-326.

Magdoff, F., 1991. Understanding the Magdoff Pre-sidedress nitrate test for corn. *J. Prod. Agric.* 4: 297-305.

Mills, H.A., 1980. Nitrogen specific electrodes for soil, plant and water analysis. *J. Assoc. off. Anal. Chem.* 63: 797-801.

Onken, A.B., Mathson, R.L., Nesmith, D.M., 1985. Fertilizer nitrogen and residual nitrate-nitrogen effects on irrigated corn yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:134-139.

Roth, G.W. Fox, R.H. 1990. Soil nitrate accumulations following nitrogen-fertilized corn in Pennsylvania. *J. environ. Qual.* 19:243-248.

Sexton, B.T., Moncrief, J.F., Rosen, C.J., Gupta, S. C., Cheng, H.H. 1996. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil. *J. environ. Qual.* 25:982-992.

Soil Survey Staff. 1992. Keys to soil taxonomy. 6th edition. USDA. 306 pp.

Spellman, D.E., Rongni, A., Westfall, D.G., Waskom, R.M., Soltanpour, P.N. 1996. Pre-sidress nitrate soil testing to manage nitrogen fertility in irrigated corn in semi-arid environment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27. 561-574.

Spellman, D.E., Rongni, A., Westfall, D.G., Waskon, R.M., Soltanpom, P.N. 1996. Pre-sidedress nitrate soil testing to manage nitrogen fertility in irrigated corn in a semi-arid environment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:134-139.

Villar, P., Villar, JM., Stockle, C., Ferrer, F., Arán, M. 1999. Corn stalk concentrations related to N availability in irrigated calcareous soils .

Villar, P., Villar, JM., Stockle, C., Ferrer, F., Arán, M. 1999. A survey of soil and water nitrate content of commercial cornfields on irrigated soils.

5. CAPÍTULO 4. ESTUDIO PROSPECTIVO DE LOS NIVELES DE NITRÓGENO DISPONIBLES EN EL SUELO Y RECOMENDACIÓN DE ABONADO NITROGENADO

5. Estudio prospectivo de los niveles de nitrógeno disponibles en el suelo y recomendación de abonado nitrogenado

5.1. Introducción

En sistemas agrícolas de regadío como el de los Canales de l'Urgell, en la provincia de Lleida, el manejo del abonado nitrogenado constituye uno de los factores clave para maximizar la producción. Sin embargo, este manejo debe ajustarse a los requerimientos de unas buenas prácticas agrícolas que lo hagan compatible con las necesidades de una agricultura sostenible. Se sabe que el exceso de inputs (en nuestro caso fertilizantes nitrogenados) que se utilizan en agricultura y la consecuente contaminación de las aguas es uno de los principales problemas ambientales de la agricultura intensiva (Ferreres. E. 1997). Existen estudios sobre el impacto de la fertilización nitrogenada sobre la calidad de las aguas freáticas superficiales y en las aguas subterráneas de la zona en que se centra este estudio (Candela et al., 1994).

La reducción de la fertilización nitrogenada se ha indicado como una acción o medida encaminada a reducir la contaminación por nitratos. La investigación científica en el campo de la agronomía sobre el comportamiento del nitrógeno en el suelo y en los cultivos es una de las distintas medidas que se han propuesto para reducir de forma objetiva el uso de fertilizantes (Nychas, 1990). La determinación de los niveles de fertilidad del suelo ha de permitir manejar los inputs con una mayor precisión.

En la zona se han realizado diversas experiencias con ensayos de campo para poder establecer pautas de actuación en el caso de la fertilización nitrogenada (Ballesta et al. 1994, Villar et al. 1999, Ferrer et al. 1999).

El estudio prospectivo de los niveles de nitrógeno inorgánico residual (más concretamente de los nitratos presentes en el suelo antes de la siembra) en los cultivos más consumidores de nitrógeno en la zona, maíz y trigo, ha de permitir, por un lado, cuantificar si los niveles residuales en general son lo suficientemente altos como para poder justificar la necesidad de estudios que se basen en el análisis de nitratos en el suelo, para posteriormente ajustar las dosis de fertilizante a aplicar y, por otro lado, conocer el potencial de contaminación que existe en la zona.

El presente estudio tiene dos objetivos: evaluar los niveles de nitratos residuales antes de la siembra del cultivo y establecer una aproximación empírica al uso del método del N min. El método Nmin se refiere a la utilización de los análisis de nitratos en el suelo antes de la siembra. La abreviatura “min” equivale a mineral (inorgánico), y si bien se refiere a nitratos y amonio, esta segunda forma no se determina de forma generalizada en esta metodología. El nitrógeno inorgánico presente en el suelo antes de la siembra de los cultivos permite su utilización como un índice de disponibilidad de nitrógeno para los cultivos que permita mejorar la fertilización nitrogenada. El análisis de nitratos en el suelo (a veces se denomina nitratos residuales) se ha utilizado en algunos países como Canadá o EEUU desde los años 60 y 70 (Dhanke y Johnson, 1990) donde se conocí como PPNT (pre-planting nitrate test).

5.2 ESTUDIO DE LOS NIVELES DE NITRÓGENO DISPONIBLE EN EL SUELO

5.2.1. Introducción.

El presente estudio se ha planteado como consecuencia de la toma de conciencia de esta problemática en la zona y como resultado de trabajos previos ya efectuados o actualmente en curso sobre el uso de fertilizantes nitrogenados y el uso de análisis de nitrógeno. La administración comarcal de la zona denominada “Consell Comarcal de El Pla d’Urgell” ha actuado como organismo impulsor del proyecto que se centra íntegramente en la comarca del Pla d’Urgell.

Los cultivos dominantes en la zona son la alfalfa (*Medicago sativa* L.), el trigo (*Triticum aestivum* L.) y el maíz (*Zea mays* L.). La alfalfa, cultivo que fija de forma simbiótica el nitrógeno atmosférico, no recibe en general nitrógeno, si bien ocasionalmente algunos agricultores aplican residuos orgánicos como los purines. Los cereales, tanto el trigo como el maíz, son los cultivos que reciben mayores cantidades de abono nitrogenado. Las cantidades aplicadas, son altamente variables. No existen sistemas objetivos de recomendación, ni tan solo a nivel probabilístico. Se puede afirmar que en general, las dosis de nitrógeno que se aplican, se ajustan para rendimientos objetivos considerados altos.

Las dosis se sitúan normalmente por encima de las 300 o incluso 400 UF (kg N / ha) de abono nitrogenado en el caso del maíz (Villar et. al., 1999a), y del orden de 150 y 200 UF en el caso del trigo (Ferrer et al., 1999).

Estas aplicaciones en base a criterios subjetivos y no objetivos son en principio superiores a las necesidades reales (Villar et al. 1999c). Además, la zona presenta una gran densidad de ganadería porcina que conlleva una aportación masiva de residuos orgánicos líquidos sobre un porcentaje importante de parcelas de la zona. Adicionalmente las aguas de riego de ciertos sectores incorporan al suelo cantidades significativas de nitrógeno (Villar et al., 1999a).

El presente trabajo se orienta hacia un diagnóstico global de la situación que justifique la necesidad de proceder a pautas agronómicas de abonado nitrogenado en los cultivos de maíz y trigo en la zona.

5.2.2. Metodología de trabajo

5.2.2.1. Descripción de la zona

El estudio se localiza en los términos municipales de Ivars d'Urgell, Barbens, Vila-sana, Castellnou de Seana, Golmés y Vilanova de Bellpuig todos ellos pertenecientes a la Comarca de El Pla d'Urgell. La superficie agraria útil (SAU) objeto principal de estudio es de 7.905 hectáreas (Cens Agrari, 1989). Como dato adicional y de interés para el estudio, cabe mencionar que el número de explotaciones de porcino (principalmente de engorde) en estos municipios del Pla d'Urgell es de 199, con una producción anual de 276.293 m³/año (Consell Comarcal del Pla d'Urgell, 1993). Esto representa como promedio anual 35 m³ por ha, si se supone un reparto equitativo de la carga ganadera, situación que no se produce.

La zona estudiada se considera representativa de los regadíos del Canal d'Urgell con un sistema de riegos superficiales de tipo tradicional por inundación. El sistema de distribución es por turnos. La zona se abastece con aguas procedentes del río Segre, reguladas por el pantano de Oliana. La reciente construcción de la presa de Rialb contribuirá a aumentar las disponibilidades de agua en la zona regable. Las aguas de riego utilizadas provienen directamente del canal o de sus acequias principales y en algunos sectores de riego se alterna con aguas mezcladas con aguas de azarbe (desagüe) y de drenaje en proporciones muy desiguales y muy difíciles de cuantificar, incluso por los propios responsables del riego de la Comunidad General de Regantes de la zona. Una aproximación al impacto del nitrógeno presente en el agua de riego en la zona es el trabajo realizado por Ferrer et al. (1997). El sistema de riego normalmente con una eficiencia, tanto en la red de distribución como en la aplicación a nivel de parcela, de tipo medio y

bajo, los tipos de suelos predominantes (Herrero et al., 1992), así como el tamaño de las parcelas, constituyen unas características muy particulares de este regadío.

5.2.2.2. Características del muestreo de suelos

El muestreo de los suelos se efectuó durante el mes de noviembre de 1997 sobre parcelas con rastrojo de maíz y trigo. Las muestras de seleccionaron tomando como centro de partida la balsa de almacenamiento de purines sita en el término municipal de Castellnou de Seana. A partir de este punto y con un criterio radial a partir de los caminos locales se procedió a la selección de las parcelas. Se disponía de la ortofoto a escala 1:25.000 para la orientación y localización de muestras.

El número total de parcelas evaluadas ha sido de 902, de las cuales 578 lo fueron sobre rastrojo de maíz (64%) y 324 sobre rastrojo de trigo (36%). Teniendo en cuenta que estos cultivos ocupan un 50% de la SAU, la relación resultante ha sido de una muestra cada 8 hectáreas aproximadamente de SAU y de un muestra cada 4-5 hectáreas de cereal de regadío. El resto de cultivos, alfalfa y frutales, tienen un manejo del abonado nitrogenado con dosis muy inferiores a las de los cereales y por este motivo no se han incluido en esta prospección.

La muestra se ha obtenido a una profundidad de 0-30 cm a partir de 15 submuestras obtenidas en un círculo con un radio de 15 m. El uso de esta profundidad se justifica por la necesidad de disponer y calibrar un método de recomendación de abonado nitrogenado que sea operativo al nivel logístico. Si bien el estudio del perfil de nitrógeno inorgánico en toda la profundidad del suelo daría una información de mayor precisión, los tiempos y costes de

dicha metodología harían difícil su implantación operativa para ser utilizada por los laboratorios de suelos y las explotaciones agrícolas. Hay que destacar la buena correlación existente entre el nitrógeno-mineral presente en el horizonte Ap y el nitrógeno presente en horizontes más profundos (Villar et al., 1999b).

5.2.2.3. Análisis de laboratorio

Las muestras fueron transportadas al laboratorio el mismo día de su obtención, para su proceso inmediato. En aquellas ocasiones en las que por diversos motivos no se podía proceder al tratamiento de la muestra en el laboratorio se procedía a su conservación a 4°C. El método de análisis incluye la determinación de la humedad de campo y la extracción en fresco con agua desmineralizada. Este método permite obtener los nitratos presentes en la solución del suelo previa agitación y filtrado. Los nitratos se determinan espectrofotométricamente en autoanalizador de flujo continuo.

La información obtenida se referencia en el laboratorio de forma automatizada asignando a cada referencia de campo un valor numérico correlativo de 6 cifras.

5.2.3. Resultados

Los niveles de nitrógeno inorgánico (que se encuentran en forma de nitratos) en el suelo se expresan en partes por millón (ppm). La cantidad de nitrógeno disponible para la planta en el horizonte superficial de muestreo se calcula a partir del valor de nitratos obtenido. Para realizar el cálculo del nitrógeno disponible se multiplica la concentración de nitratos en el suelo por el peso aproximado del suelo que representa. Para una densidad aparente de 1.5 t

m³ y una profundidad de suelo de 30 cm, el peso es de 4.500 t de suelo por ha. Así cada ppm de nitrógeno-nítrico determinado equivale a 4.5 kgN/ha.

En la tabla núm. 1 se muestran los resultados obtenidos en función de diferentes intervalos de decisión. En la tabla número 2 se muestra la distribución según el cultivo precedente. El 20 % de las parcelas analizadas presentan concentraciones de nitratos residuales que se consideran bajos (<10 ppm). La mayor parte se registraron en parcelas de maíz. Un 25 % presentan una concentración ligeramente elevada (10-20 ppm) teniendo en cuenta que se trata del nitrógeno residual de la campaña anterior en cultivos con una elevada extracción de nitrógeno. La mayoría también se detectaron en parcelas sobre rastrojo de maíz.

Tabla núm. 1. Distribución porcentual de los valores medidos de nitratos en los horizontes superficiales

Intervalos (ppm)	Frecuencia absoluta	Porcentaje (%)	Porcentaje acumulado
< 10	179	20	20
10-20	225	25	45
20-30	172	19	64
30-60	191	21	85
>60	140	15	100

Tabla núm. 2. Distribución de los nitratos presentes en el suelo (0-30cm) según el cultivo precedente.

Intervalos (ppm)	Maíz (%)	Trigo (%)
< 10	27	6
10-20	31	13
20-30	20	19
30-60	14	34
>60	8	28

El 19% presentan concentraciones entre 20 y 30 ppm, indistintamente del cultivo precedente. Un 21% presentan niveles entre 30 y 60 ppm. La mayoría de dichos niveles se detectaron en parcelas con antecedente trigo. La aportación de residuos de origen ganadero en estas parcelas puede ser el origen de la alta concentración de nitratos. Finalmente un

15% presentan niveles superiores a 60 ppm. La mayoría son parcelas con rastrojo de trigo. Una concentración de nitratos superior a 60 ppm no presenta respuesta a la fertilización para ningún cultivo de la zona. Cabe añadir que las prácticas de fertilización habituales en la zona no suprimen ni reducen la fertilización mineral a pesar de efectuar fertilizaciones orgánicas.

El resumen estadístico de los resultados se expresa en la tabla núm.3

Tabla número 3. Resumen estadístico de los resultados de nitratos.

CULTIVO	VALOR MAXIMO (ppm)	VALOR MÍNIMO (ppm)	VALOR MEDIO (ppm)	MEDIANA (ppm)
Maíz	232	2	24	16
Trigo	411	4	50	36
Global	411	2	34	22

Los valores oscilan entre 2 y 411 ppm con un promedio de 34 ppm y una mediana de 22 ppm.

Los valores reflejan la capacidad de fijación y pérdida de nitrógeno de diversos suelos y la presencia de efectos residuales de la campaña anterior.

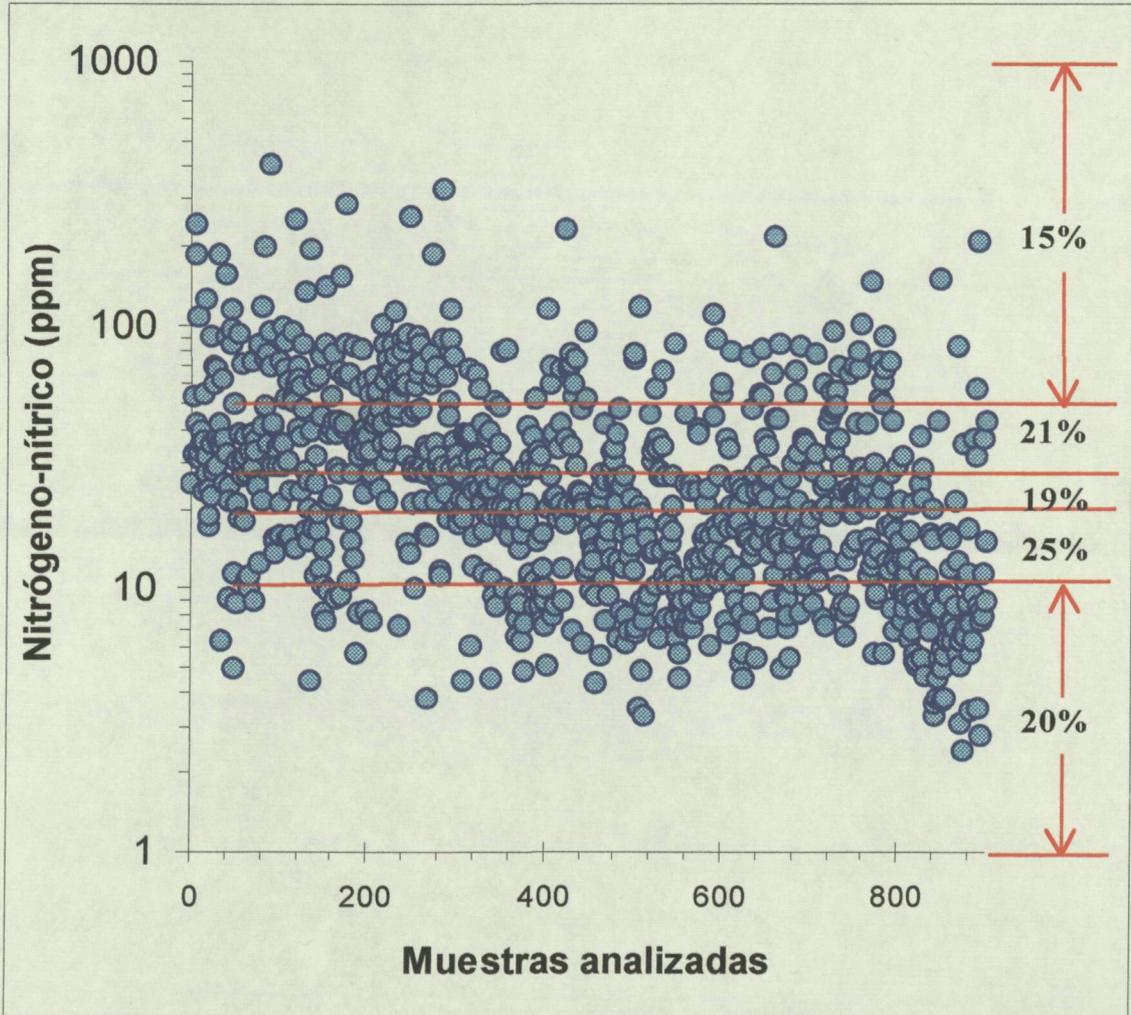


Figura n.1. Niveles de nitratos detectados en la zona.

De forma gráfica los resultados individuales se muestran en la figura núm.1. Para facilitar la visualización de los resultados se presenta el contenido en nitratos en el suelo en escala logarítmica. Se destaca la presencia de parcelas con niveles superiores a 100 ppm en el horizonte superficial.

5.2.4. Discusión de los resultados

La cantidad de nitrógeno disponible por hectárea en la zona es, en promedio, de 150kg en el horizonte superficial. Esta cantidad se considera muy elevada si tenemos en cuenta que se trata del período pre-invernal. Para las parcelas con antecedente trigo se contabilizan un total de 225 kg NO₃-N ha⁻¹ como cifra promedio.

Esta cantidad es normalmente superior a las extracciones del cultivo siguiente. Para planes de fertilización no razonados, como son actualmente la mayoría en la zona, la totalidad de nitratos detectados terminarán en el freático. Estos nitratos detectados deberían ser aprovechados durante la campaña siguiente para disminuir el impacto ambiental. Este aprovechamiento solo se puede realizar mediante un plan de fertilización a nivel de parcela. Este plan de fertilización permite ahorrar gastos en fertilizantes, garantizar una máxima producción y minimizar el impacto ambiental.

En general los niveles de nitratos en parcelas analizadas con antecedente trigo son prácticamente el doble que las de maíz. La explicación se encuentra en el tiempo transcurrido desde la cosecha. El trigo se cosecha a inicios de verano, por lo que el agricultor dispone de entre cinco y seis meses más de tiempo para aportar residuos ganaderos. El contenido promedio es superior en 110 kg NO₃-N ha⁻¹, cantidad equivalente a 22 m³ de purín por hectárea.

5.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL N_{min} EN TRIGO Y MAÍZ

5.3.1 Introducción

El método del N_{min} consiste en la medida de nitrógeno presente en el suelo en forma mineral, mayoritariamente en su forma nítrica en los suelos de la zona. A partir de este valor se establece una recomendación de abonado descontando de las necesidades totales el nitrógeno disponible en el suelo (Neteesson, 1995).

Aunque su concepción es simple, su aplicación práctica es logísticamente compleja. Precisa de una determinación del nitrógeno-nítrico del suelo en una fase previa al abonado nitrogenado. La dispersión parcelaria, la variabilidad de suelos por explotación (debida en gran parte a la dispersión parcelaria), la utilización de aguas de diferente origen y las aplicaciones a menudo no cuantificadas de residuos orgánicos, suponen una alta variabilidad en los resultados parcelarios del N_{min}. Este hecho justificaría aún más la necesidad de su implementación, pero su introducción al nivel práctico puede conllevar un período de adaptación importante.

5.3.2 Justificación del estudio

La aplicación del N_{min} a partir de los datos del estudio realizado pretende:

- Evaluar las cantidades de nitrógeno disponible en el horizonte de laboreo
- Estimar las necesidades objetivas de abonado nitrogenado en maíz y trigo.
- Evaluar las ineficiencias del abonado nitrogenado, con la medición de los excesos efectivamente aplicados.

La declaración de la comarca de El Pla d'Urgell, en su totalidad, como "Zona Vulnerable" según el Decreto 283/1998 de 21 de Octubre de la Generalitat de Cataluña referente a la contaminación de nitratos procedentes de fuentes agrarias, supone la aparición de una normativa en el tema que se ha estudiado. En estas zonas es de obligado cumplimiento el Código de Buenas Prácticas Agrarias según Orden de 22 de Octubre de 1998, de la Generalitat de Cataluña.

La aplicación de estas normativas supondrá cambios muy significativos en el manejo de fertilización nitrogenada y residuos orgánicos principalmente. Con el presente trabajo se pretende profundizar en el diagnóstico del tema y contribuir a una promoción entre los agricultores de un mejor uso del abonado nitrogenado.

Los resultados obtenidos en este trabajo pretenden asegurar unos efectos de:

- Preservación del medio natural, en concreto suelos y aguas.
- Mejora de rendimientos por corrección de excesos o deficiencias de nutrición nitrogenada.
- En algunos casos, ahorro de materias primas fertilizantes y aumento de la rentabilidad de los cereales en regadío.

Para realizar un consejo de abonado, suponemos que los agricultores repiten cultivo en la rotación. Es decir, siembran trigo sobre rastrojo de trigo y maíz sobre maíz. A efectos prácticos se trata de un ejercicio teórico de fertilización, donde el objetivo es calcular de forma orientativa el excedente actual de nitrógeno en la zona.

5.3.4 Aplicación del método del Nmin en el cultivo del maíz

Las producciones de maíz en la zona son variables, y en parte dependen de factores impredecibles asociados a las condiciones meteorológicas, a la dotación de agua y al tipo de suelo. Por este motivo las dosis óptimas de fertilizantes basadas en experimentos de campo no pueden ser más que aproximaciones. Por ello la mejor estimación es la basada en la probabilidad estadística que nos proporcionan los experimentos de campo (Colwell, 1994).

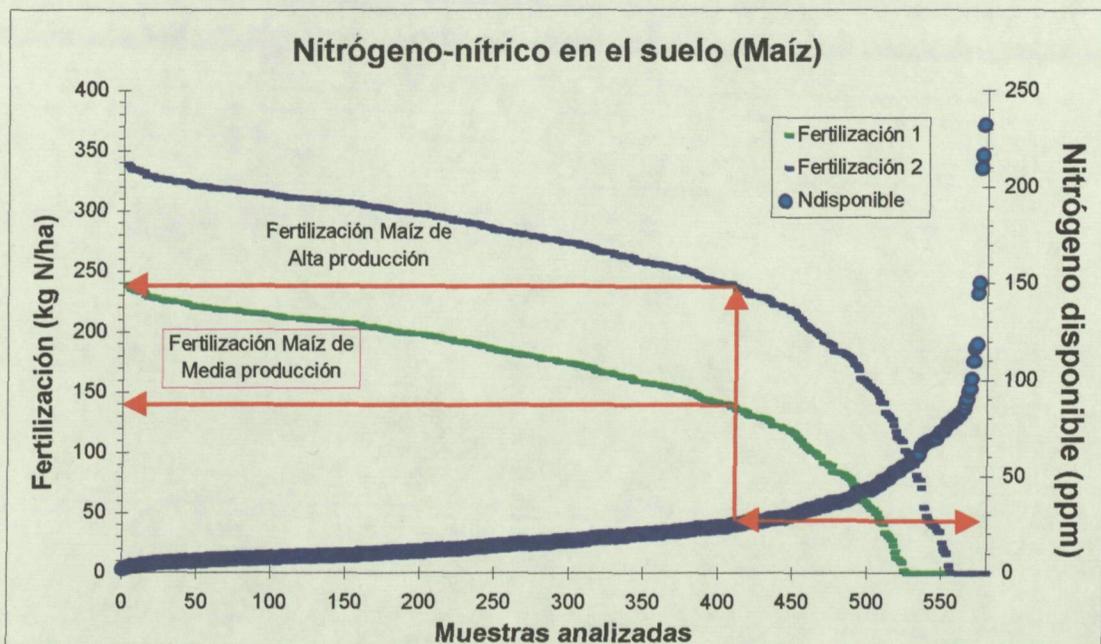


Figura 2. Aplicación del método del Nmin en el cultivo del maíz.

A grandes rasgos podemos distinguir aquellas parcelas más productivas de las que no lo son.

Así, se catalogan como parcelas de alto rendimiento, las que producen promedios de 14-15 t/ha de grano al 14% de humedad. De igual modo clasificamos las menos productivas

como las que producen rendimientos promedio de 10-11 t/ha. Las extracciones en el primer caso oscilan entre 300 y 350 kg N/ha y entre 200-250 kg N /ha en el segundo.

El consejo de fertilización se establece aplicando el método del Nmin, consistente en descontar de las necesidades totales el nitrógeno disponible en el suelo.

En la figura núm.2 se muestran los resultados obtenidos en el suelo de forma ordenada de menor a mayor contenido en nitratos y el correspondiente consejo de fertilización nitrogenada. El uso de esa figura permite calcular la dosis de fertilizante a aplicar a partir de un determinado nivel de nitrógeno disponible en el suelo. En la figura se muestra un ejemplo de fertilización para un nivel de partida en el suelo de 25 ppm de nitrógeno en forma de nitratos (línea roja). Así para un maíz de alto rendimiento se propone aportar 240 kgN/ha y para un maíz de bajo rendimiento 140 kgN/ha. La recomendación efectuada puede ajustarse aún más cuando se dispone de información referente a aportaciones extras de nitrógeno provenientes del agua de riego o del freático. Los suelos profundos con niveles importantes de materia orgánica en todo el perfil también aportan una cantidad adicional de nitrógeno. En el caso de no disponer de información suficiente para realizar un consejo ajustado, adaptar las necesidades del cultivo al nitrógeno disponible en el suelo supone un ahorro de más de 100 kgN/ha en promedio. La generalización del método supondría 100 t de unidades fertilizantes de nitrógeno como ahorro por cada 1000 ha de maíz, y ello sin disminuir la producción.

5.3.4. Aplicación del método del Nmin en el cultivo del trigo

De forma análoga a la seguida en el caso del maíz se calcula nuevamente el consejo de fertilización para el trigo. La menor necesidad de nitrógeno de este cultivo y la mayor disponibilidad detectada en el suelo hacen que se justifique aún más la necesidad de analizar el contenido de nitratos en el suelo antes de efectuar un consejo de fertilización.

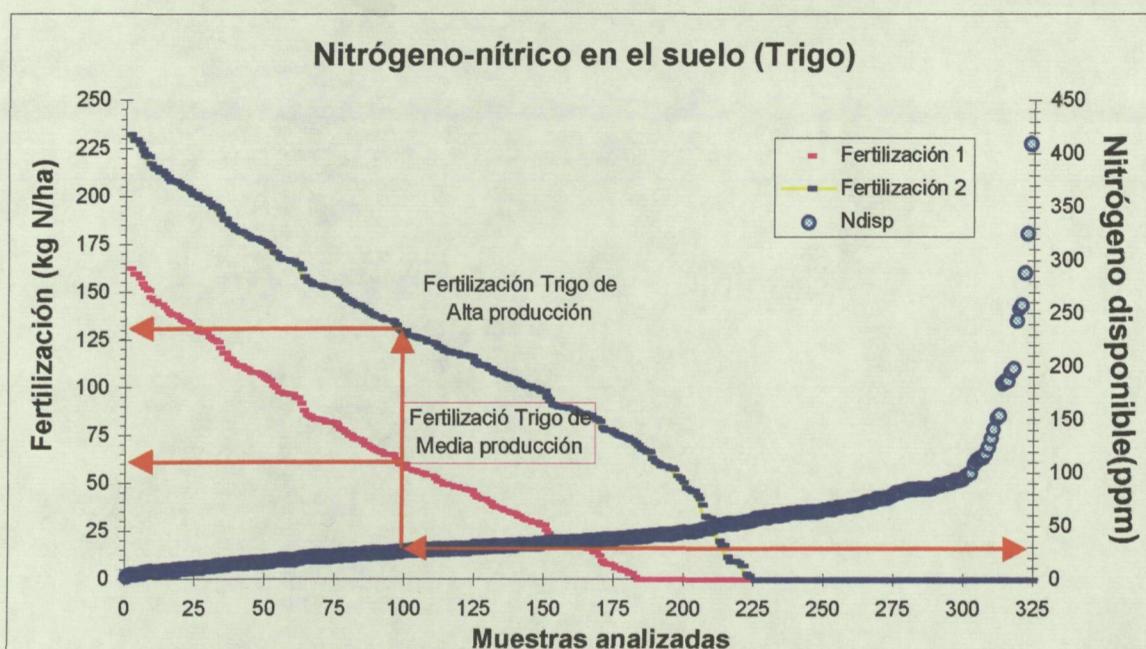


Figura 3. Aplicación del método del Nmin en el cultivo del trigo.

Las extracciones de trigo en la zona oscilan entre los 160 y 230 kg N/ha según producción real de la parcela (7-9 Mg/ha).

Usando la figura núm. 3 a modo de ábaco, podemos calcular la dosis de fertilizante nitrogenado a aplicar a partir de un determinado nivel en el suelo antes de la siembra (PPNT). Así para un nivel de 25 ppm en el suelo, la dosis de fertilizante a aportar

es de 60 kgN/ha para rendimientos potenciales de 7 Mg/ha y de 130 kg N/ha para rendimientos potenciales de 9 Mg/ha.

Para un nivel de 36 ppm en el suelo, valor mediano (Tabla 3), la fertilización propuesta sería de 75 kg N/ha para parcelas de alto rendimiento y no sería necesaria la fertilización para parcelas de rendimiento medio. El ahorro en fertilizante nitrogenado en la zona se estima en más de 100 kg NO₃-N ha⁻¹, equivalentes a 100 t por cada 1000 ha de trigo.

5.3.4. Conclusiones

Los niveles de nitrógeno-nítrico en el suelo de la zona estudiada antes de efectuar la fertilización son muy variables, lo que justifica la realización de análisis de suelos que evalúen las necesidades a partir de las reservas del suelo.

Realizar la fertilización nitrogenada utilizando el método del Nmin, mediante análisis de suelos evitaría el exceso en las aplicaciones de nitratos en un 80% de los casos.

Se detectan niveles más altos de nitratos en parcelas sobre rastrojo de trigo que de maíz, la causa reside en la mayor recepción de residuos orgánicos sobre las parcelas con rastrojo de trigo.

Las prácticas de sobrefertilización orgánica en cultivos extensivos en la zona regable por los Canales de Urgell afecta a un 15% de las parcelas.

El uso del método del Nmin en parcelas comerciales de trigo y maíz, supone un ahorro medio de 100 kgN/ha.

La correcta gestión de los residuos ganaderos en la zona, aumentaría el ahorro de fertilizantes propuesto en el apartado anterior.

5.4 Referencias

Ballesta A., Lloveras, J. 1994. Effects of nitrogen fertilization on maize production and on soil nitrate accumulation in the irrigated areas of Ebro Valley (Spain). 4th Congress. ESA. Veldhoven, Book of abstracts 328-329.

Candela L., Pascual J.M., Perera A., Blanco A. 1994. Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de la mitad norte del acuífero aluvial del área de riegos de l'Urgell (Lleida). Curso Internacional de Hidrología Subterránea.

Colwell, J.D., 1994. Estimating fertilizer requirements. A quantitative approach. CAB international. 262pp.

Dahnke, W.C., Johnson, G.V., 1990. Testing soil for Available Nitrogen. In Soil Testing and Plant analysis. 3rd edition (Westerman, R.L.).

Fereres, E. 1997. Els reptes de l'agricultura sostenible. Medi ambient. 18. Departament de medi ambient. Generalitat de Catalunya.

Ferrer F., Villar J.M., Villar P., Aran M. 1997. Impacto del nitrógeno presente en el agua de riego en la zona regable del canal d'urgell. XV Congreso Nacional de Riegos. Comunicaciones. DARP. Generalitat de Catalunya. 241-248.

Ferrer F., Villar J.M., Stockle C.O., Villar P., Aran M. 1999. Field evaluation of a Pre-sidedress Soil Nitrate Test for irrigated corn on calcareous soils. In Press.

Neteeson, J.J.1995. Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. In: Nitrogen Fertilization on the Environment. Ed: PE. Bacon.

Nychas, A. 1990. Fertilization and the environment. Legislative Aspects in the EEC. In Fertilization and the Environment (ed. by Merckx, R., Vereecken, H., Vlassak, K.) Leuven university press.

Soil Survey Staff. 1992. Keys to soil taxonomy. 6th edition. USDA. 306 pp.

Villar, P., Villar, J.M., Stockle, C., Ferrer, F., Arán, M., 1999a A survey of soil and water nitrate content of commercial cornfields on irrigated soils. Capítulo 1. Tesis doctoral Pere Villar. UdL.

Villar, P., Villar, J.M., Stockle, C., Ferrer, F., Arán, M., 1999b. Corn stalk concentrations related to N availability in irrigated calcareous soils . Capítulo 2. . Tesis doctoral Pere Villar. UdL.

Villar, P., Villar, J.M., Stockle, C., Ferrer, F., Arán, M., 1999c. Optimización de la fertilización nitrogenada en maíz en suelos calcáreos en el área regable por los Canales de Urgell. . Capítulo 3. Tesis doctoral Pere Villar. UdL.

6. CONCLUSIONES GENERALES.

6. Conclusiones generales.

- El contenido de nitratos presente en las aguas superficiales y en las aguas freáticas asociadas al riego, confirma el impacto ambiental de una aplicación en exceso de nitrógeno en la zona.
- El seguimiento realizado durante dos años en parcelas comerciales de maíz, pone de manifiesto que factores como las características de los suelos, las condiciones meteorológicas y los riegos condicionan la productividad del maíz y que el nitrógeno no ejerce como factor limitante en las condiciones actuales.
- No se han observado diferencias de producción de maíz grano entre parcelas para distintos niveles de abonado nitrogenado y de disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Una disponibilidad mínima de nitrógeno en el suelo (PPNT + Nitrógeno aplicado) de 373 kg N ha^{-1} fue suficiente para obtener la máxima producción (14.97 Mg ha^{-1}).
- En los suelos y condiciones como en los que se ha efectuado el ensayo, fertilizaciones nitrogenadas comprendidas entre 125 y 375 kg N ha^{-1} no producen diferencias significativas en la producción de maíz en grano para rendimientos medios de 10.9 Mg ha^{-1} . El aporte de nitratos del agua de riego, la mineralización de la materia orgánica y la presencia de un freático con nitratos a 1.2 m de profundidad contribuyen de forma importante a la fertilización del cultivo. Las aportaciones netas externas necesarias a la fertilización en este ensayo se estiman en 100 kg N ha^{-1} .
- El fraccionamiento de la fertilización nitrogenada contribuye a aumentar la producción de maíz-grano cuando los niveles de nitrógeno disponible en el suelo son inferiores a

31 ppm, en las condiciones del ensayo. La mayor eficiencia del uso del nitrógeno se obtiene con las aplicaciones realizadas en pre-siembra.

- El análisis de nitratos en el suelo en el estadio de desarrollo del cultivo de seis hojas (PSNT) es un buen indicador de la deficiencia o suficiencia de la fertilización nitrogenada realizada.
- Los análisis de nitratos y nitrógeno en la base del tallo del maíz en los estadios de desarrollo del cultivo de seis hojas y polinización son buenos indicadores de la disponibilidad de nitrógeno-nítrico en el suelo para el desarrollo del cultivo, de la producción de maíz grano y de la absorción de nitrógeno al final del ciclo del cultivo. Se han obtenido mayores correlaciones para la concentración de nitratos que de nitrógeno en la base del tallo del maíz. Una concentración de nitratos en la base del tallo en el estadio V6 entre 15 y 28 g N-NO₃ kg⁻¹ es suficiente para obtener la máxima producción y absorción de nitrógeno. El valor de 15 se aplicaría en parcelas de productividad media y el valor de 28 en las de alta producción. En el estadio de polinización el nivel crítico de suficiencia se sitúa en una concentración de nitratos de 8 g N-NO₃ kg⁻¹.
- La concentración de nitratos en la base del tallo en el estadio de madurez fisiológica no permite evaluar el exceso de nitrógeno disponible en el suelo durante el período de crecimiento del cultivo. Las parcelas de alto rendimiento agotan los nitratos absorbidos en las primeras fases y en condiciones de regadío el exceso de nitrógeno disponible es lixiviado. Dosis elevadas de fertilización nitrogenada no siempre incrementan el contenido de nitratos residuales en el suelo. La lixiviación de nitratos del perfil del

suelo producida por los riegos y lluvias, no permite acumular los excedentes de nitrógeno aplicado.

- Para optimizar la fertilización nitrogenada a nivel de unidad de gestión es necesario:
 - estimar el potencial productivo de la parcela (serie histórica de producciones)
 - evaluar la capacidad de mineralización del suelo y la presencia del nivel freático
 - evaluar las aportaciones de nitrógeno del agua de riego
 - evaluar el nitrógeno mineral hasta la profundidad de 120 cm.

- Los niveles de nitrógeno-nítrico en el suelo de la zona estudiada antes de efectuar la fertilización son muy variables, lo que justifica la realización de análisis de suelos que evalúen las necesidades a partir de las reservas (niveles residuales) del suelo.

- Realizar la fertilización nitrogenada utilizando el método del Nmin, mediante análisis de suelos evitaría el exceso de las aplicaciones de nitrógeno en un 80% de los casos en la zona.

- El método de control de los nitratos en el suelo en superficie, antes de la siembra (PPNT), y en las condiciones de la zona, es un procedimiento fiable, rápido y operativo de evaluación de las necesidades de fertilizante nitrogenado en el cultivo del maíz.

EXCLÒS DE PRÉSTEC

