



Foto 1. Vista general del ensayo de Almacelles, Lleida (riego por aspersión).

OPTIMIZACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA DEL MAÍZ TRAS UN CULTIVO DE ALFALFA EN ZONAS SEMIÁRIDAS

Se ha estudiado la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada tras un cultivo de alfalfa en siete experimentos de campo en regadíos semiáridos del Valle del Ebro. Se aplicaron seis dosis de N (de 0 a 300 kg N/ha). La alfalfa proporcionó suficiente N para producir de 10,3 a 16,7 Tm/ha de grano de maíz sin fertilizante nitrogenado. En tres de los ensayos no se necesitó N fertilizante para obtener el máximo rendimiento de maíz. En el resto de los ensayos, la dosis óptima de N fertilizante varió entre 115 y 196 kg N/ha, siendo menor en los ensayos regados por aspersión comparados con los regados por inundación. El máximo retorno económico se obtuvo con dosis entre 0 y 150 kg N/ha. Dosis mayores de 150 kg N/ha aumentaron el riesgo de contaminación ambiental sin aumentar el rendimiento ni el beneficio económico.

MONTSE SALMERÓN (DR. INGENIERO AGRÓNOMO, INVESTIGADOR POSTDOCTORAL, UNIVERSIDAD DE ARKANSAS, EE UU)

SEBASTIÁN CELA (DR. INGENIERO AGRÓNOMO, INVESTIGADOR POSTDOCTORAL, UNIVERSIDAD DE CORNELL, EE UU)

RAMÓN ISLA (DR. INGENIERO AGRÓNOMO, CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA DE ARAGÓN - CITA)

J. LLOVERAS Y F. SANTIVERI (DRES. INGENIEROS AGRÓNOMOS, UNIVERSIDAD DE LLEIDA)

JOSÉ CAVERO (DR. INGENIERO AGRÓNOMO, ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE AULA DEI-CSIC)

Tabla 1: Información de los distintos ensayos.

Lugar	Almacelles	Binéfar	Castejón del Puente	El Tarròs	Gimenells	La Tallada d'Empordà	Zaragoza
Año	2007	2008	2007	2008	2006	2008	2008
Tipo riego	Aspersión	Aspersión	Inundación	Inundación	Inundación	Surcos	Aspersión
Riego (mm)	650	600	1.200	1.000	600	500	870
Frecuencia riego (días)	2-4	1-2	7-14	14	14	7-9	3-4
Textura suelo	Franca	Franca	Franca	Franco limosa	Franca	Franco arenosa	Franco limosa
N inicial en suelo (kg/ha)	197	130	202	187	134	189	67
PSNT (kg/ha)	210	73	160	77	143	154	40
Maíz	PR33P67	PR34N43	PR34N43	Mitic	Helen	PR33B51	PR34N43
Densidad alfalfa (pl/m ²)	60	19		60	39	48	
N raíces alfalfa (g/kg)	24	26		26	23	26	
N raíces alfalfa (kg/ha)	201	54		212	69	71	

PSNT: contenido en N inorgánico del suelo antes de la primera cobertera en el perfil de 0-30 cm.

Introducción

La rotación de alfalfa con maíz es una práctica común en muchas áreas del mundo. Los efectos beneficiosos del cultivo de leguminosas en rotación con cereales se conocen desde hace mucho tiempo (Columella, 70) e incluyen el control de malas hierbas, la interrupción del ciclo de patógenos, la mejora del contenido en materia orgánica del suelo, así como el aporte de cantidades sustanciales de N al cultivo de cereal siguiente (Bullock, 1992; Danso y Papastylianou, 1992). A pesar de ello, a menudo se subestima el N que la alfalfa puede aportar al cultivo siguiente y no se reduce el aporte de N al maíz cuando se cultiva tras alfalfa. Encuestas realizadas en zonas de regadío semiáridas del Valle del Ebro han revelado que muchos agricultores aportan generalmente más de 300 kg N/ha al maíz y que sólo uno de cada cuatro agricultores reducen el aporte de N fertilizante al maíz cuando se cultiva detrás de alfalfa (Alvaro-Fuentes y Lloveras, 2003; Sisquella y col., 2004). Sin embargo, el alto coste de la fertilización nitrogenada en el cultivo del maíz y el aumento de la superficie agrícola declarada como zona vulnerable a la contaminación por nitrato deberían incentivar una adecuada valoración de la contribución de N de un cultivo de alfalfa precedente.

El objetivo de este estudio ha sido establecer la dosis óptima de fertilizante nitrogenado en un cultivo de maíz tras un cultivo de alfalfa de 4-5 años en las condiciones de regadío semiárido del Valle del Ebro.

Descripción de los ensayos

Se realizaron siete ensayos de campo entre 2006 y 2008 en diferentes localidades del Valle del Ebro (Almacelles, Binéfar, Castejón del Puente, El Tarròs, Giménells, La Tallada d'Empordà y Zaragoza). El clima en todos estos lugares es, en general, semiárido con bajas precipitaciones en verano y altas temperaturas, por lo que el riego es necesario para el cultivo del maíz (Tabla 1). El maíz se sembró en todos los casos tras un cultivo de alfalfa de 4-5 años, que presentaba una buena densidad de plantas y que fue eliminado mediante laboreo en el otoño anterior. El maíz se sembró entre finales de Marzo y primeros de Mayo a una densidad de 80-87.000 plantas/ha (Tabla 1). Se ensayaron seis dosis de N (0, 50, 100, 150, 200 y 300 kg N/ha) aplicado como nitrato amónico (33,5% N) en dos coberteras iguales (primera con el maíz entre 3 y 6 hojas; segunda con el maíz entre 5 y 12 hojas). El diseño experimental fue de bloques al azar con 3-4 repeticiones. No se aplicó N fertilizante antes de la siembra del maíz. Se aplicó P y K en cantidades suficientes para que no hubiese deficiencias de estos nutrientes. Con excepción del abonado (N, P y K), el manejo del cultivo fue realizado por los agricultores colaboradores de acuerdo con sus prácticas habituales. El sistema de riego varió en los distintos campos (Tabla 1).

El riego (cantidad y frecuencia) fue manejado por los agricultores de acuerdo con la programación típica de la zona. En los campos con riego por aspersión el sistema fue de



Foto 2. Vista general del ensayo de Castejón del Puente, Huesca (riego por inundación).

cobertura total y la dosis de riego aplicada se determinó a partir de la pluviometría del sistema y del número de horas de riego. En los campos regados por inundación o surcos la dosis de riego se determinó midiendo el tiempo de riego y el caudal de riego.

Se determinó el número de raíces de alfalfa en los primeros 30 cm de suelo, su biomasa y su contenido en N. El contenido en N inorgánico del suelo se determinó: 1) antes de la siembra del maíz hasta 90 cm de profundidad en perfiles de 30 cm de espesor, 2) antes de la primera cobertura de fertilizante nitrogenado en el perfil de 0-30 cm (PSNT) y 3) tras la cosecha del maíz hasta 90 cm de profundidad en perfiles de

30 cm de espesor. Se determinó el rendimiento de maíz mediante la cosecha de una muestra de 15-38 m² en las dos líneas centrales de cada parcela elemental. Asimismo, se determinó la biomasa de las plantas de maíz y su contenido en N. Se calculó el retorno neto de la fertilización nitrogenada considerando cuatro escenarios: dos precios del grano de maíz (120 y 240 euros/tonelada) y dos precios del fertilizante nitrogenado (0,65 y 1,30 euros/kg N).

$$\text{Retorno neto (euros/tonelada)} = (\text{Rend } T_i - \text{Rend } T_0) \times \text{precio grano} - (\text{N aplicado } T_i \times \text{precio N})$$

T_i: tratamiento i.

T₀: tratamiento 0 kg N/ha.

Se realizó un balance de N para cada parcela elemental en cada ensayo. La mineralización de N se estimó a partir del tratamiento sin fertilizante nitrogenado (Sexton y col., 1996). Las pérdidas de N durante el período de crecimiento del maíz se calcularon en las parcelas con fertilizante nitrogenado según la siguiente expresión:

$$\text{N perdido} = \text{N suelo tras cosecha} + \text{N maíz} - \text{N suelo antes siembra} - \text{N fertilizante} - \text{N mineralizado}$$

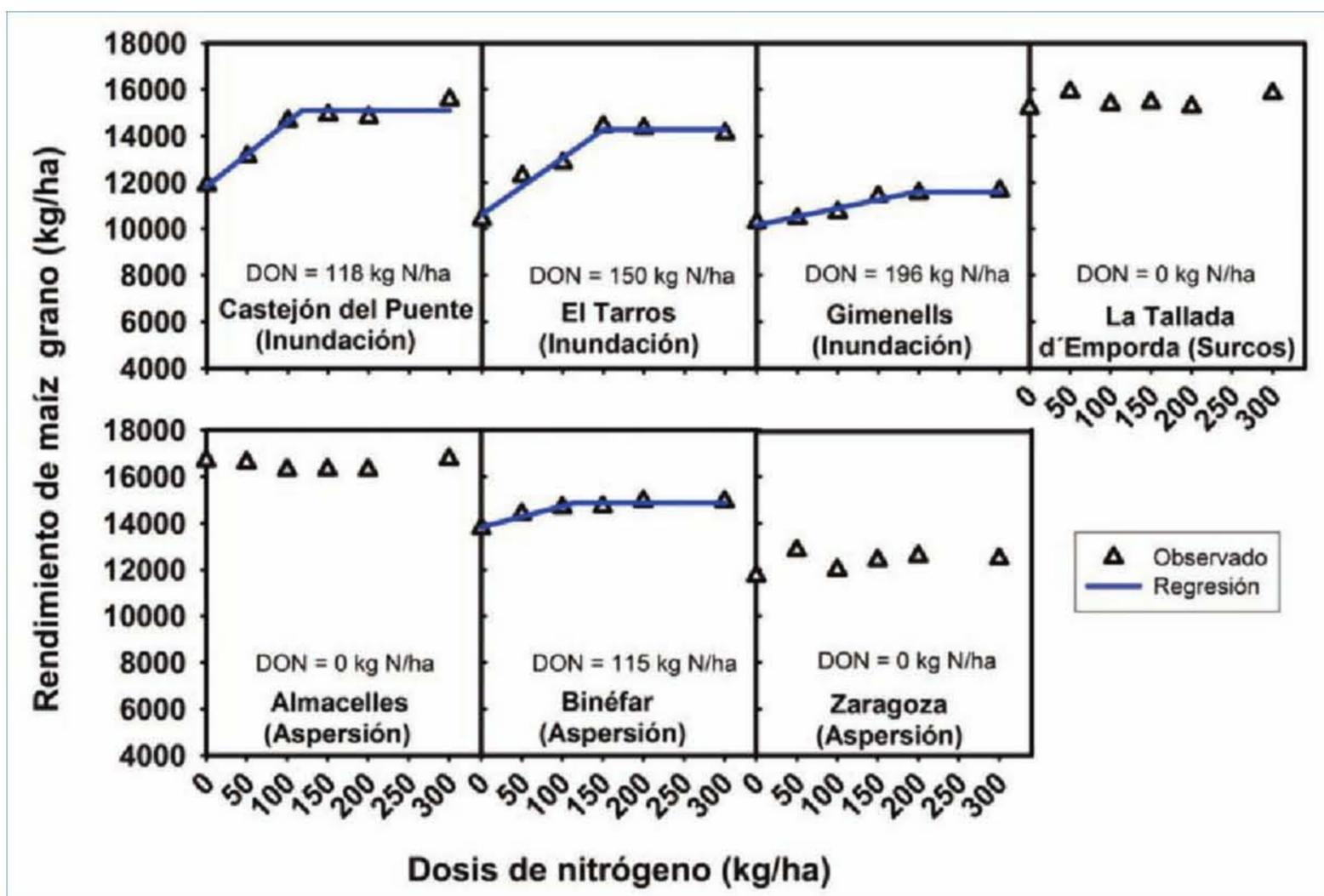
Donde el N en el suelo antes de la siembra y tras la cosecha del maíz fue medido en los primeros 90 cm de suelo. Un valor negativo de N perdido indica pérdidas de N por lavado, volatilización, etc.

Resultados y discusión

Contenido en N de los residuos de alfalfa

El N total contenido en las raíces de alfalfa presentes en el horizonte superficial de 0 a 30 cm de suelo varió entre 54 y

Figura 1. Relación entre el rendimiento en grano del maíz (14% de humedad) y la dosis de nitrógeno fertilizante aplicada en distintos ensayos de maíz tras un cultivo de alfalfa. DON: dosis óptima de nitrógeno por encima de la cual no se observa aumento de rendimiento del maíz.



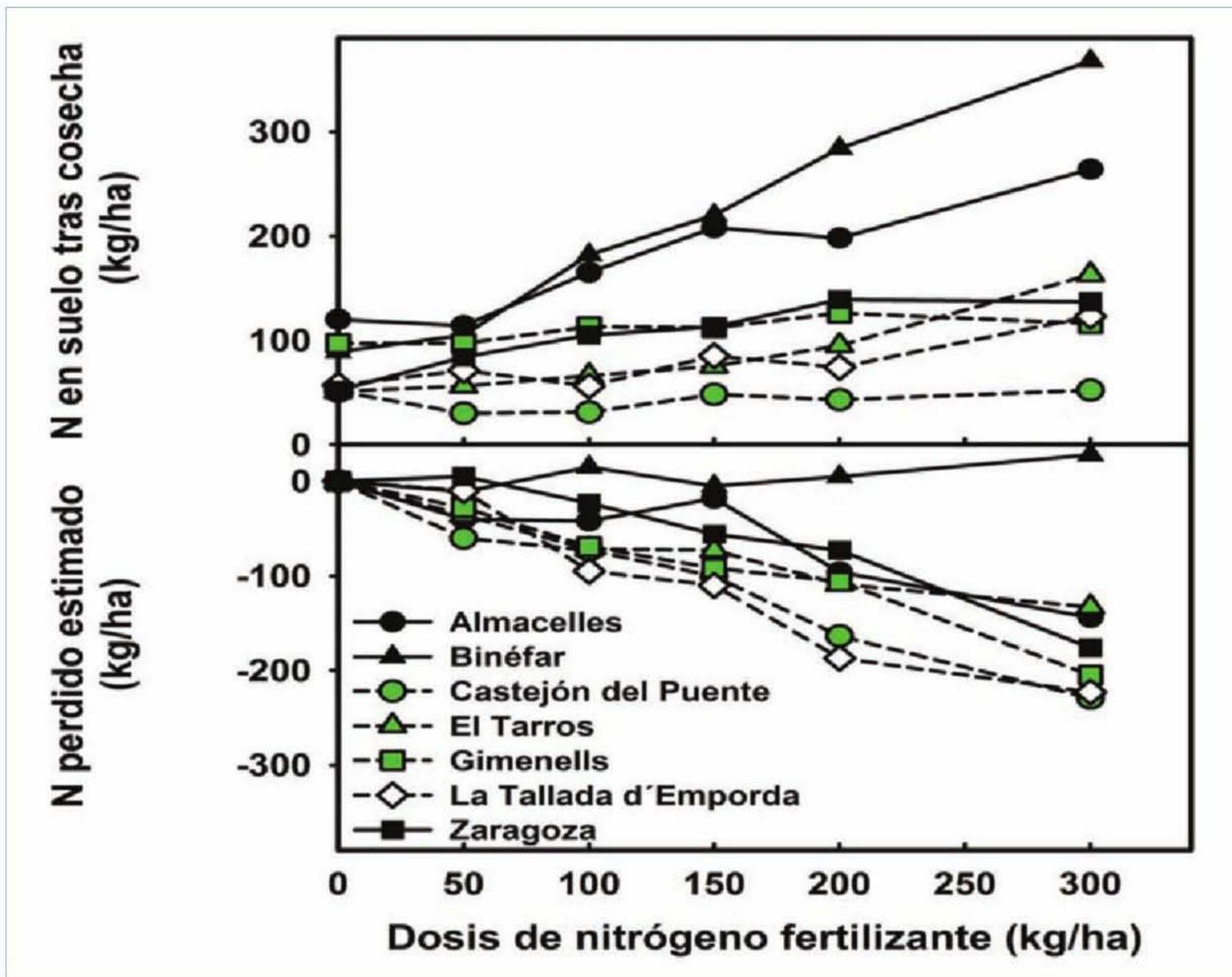


Figura 2. Nitrógeno inorgánico en el suelo tras la cosecha del maíz y nitrógeno perdido estimado en los distintos ensayos y para las distintas dosis de fertilizante nitrogenado aplicadas. Los símbolos en negro corresponden con ensayos regados por aspersión, los símbolos en verde corresponden con ensayos regados por inundación y los símbolos en blanco corresponden con el ensayo regado por surcos.

212 kg N/ha (Tabla 1), siendo la variación debida a diferencias en el número de plantas de alfalfa y no a su concentración en N (Tabla 1). Evidentemente, estos valores no tienen en cuenta el N contenido en las raíces más profundas por lo que deben considerarse como unos valores mínimos del N contenido en los residuos de un cultivo de alfalfa de 4-5 años.

Respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada después de un cultivo de alfalfa

En tres ensayos (Almacelles, Zaragoza y La Tallada d'Empordà) la aplicación de N no incrementó el rendimiento en grano del maíz (Figura 1). Sin embargo, en los otros cuatro (Binéfar, Castejón del Puente, El Tarròs y Giménells) el rendimiento del maíz aumentó hasta una dosis óptima de fertilizante que varió entre 115 y 196 kg N/ha (Figura 1). Dependiendo de los ensayos, el cultivo precedente de alfalfa aportó suficiente N para obtener entre 10,3 y 16,7 Tm/ha de maíz sin necesidad de aportar fertilizante nitrogenado. Estos altos rendimientos observados en los tratamientos sin aporte de N fertilizante son debidos principalmente a la mineralización del N orgánico contenido en los residuos de alfalfa, que durante el año posterior al cultivo de alfalfa

puede ser de un 70% del N contenido en los residuos (Fox y Piekielek, 1988). La mejora de la estructura del suelo durante el cultivo de alfalfa también pueden contribuir a conseguir altos rendimientos del cultivo siguiente.

El sistema de riego parece afectar a la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada tras un cultivo de alfalfa. Así, para obtener el máximo rendimiento de maíz se necesitó aplicar N fertilizante en todos los ensayos regados por inundación pero solamente en uno de los tres regados por aspersión la aplicación de N aumentó ligeramente la producción de maíz (Figura 1). En el ensayo regado por surcos tampoco hubo respuesta a la aplicación de nitrógeno fertilizante (Figura 1). La dosis óptima de N fertilizante que produjo los mayores rendimientos fue mayor en los ensayos de riego por inundación (118 a 196 kg N/ha) que en los ensayos de riego por aspersión (0 a 115 kg N/ha).

Efecto de la fertilización nitrogenada sobre las pérdidas de N

El contenido en nitrógeno del suelo antes de la siembra del maíz varió en los distintos ensayos entre 67 y 202 kg N/ha, siendo el valor medio ligeramente inferior en los ensayos regados por aspersión (131 kg N/ha) en comparación con

Foto 3. Recolección del maíz para determinar el rendimiento.



los regados por inundación (174 kg N/ha) (Tabla 1). El contenido en nitrógeno del suelo antes de la primera cobertura de nitrógeno (PSNT) varió en los distintos ensayos entre 40 y 210 kg N/ha, siendo similar en los ensayos regados por aspersión e inundación (Tabla 1). El contenido en N residual en el suelo tras la cosecha del maíz aumentó al aumentar

la dosis de N fertilizante aplicada en cinco de los siete ensayos (Figura 2). Los dos ensayos en los que no aumentó la producción fueron regados por inundación. En general, el N perdido estimado durante el cultivo de maíz aumentó al aumentar la fertilización nitrogenada aplicada en todos los ensayos excepto en el de Binéfar (Figura 2). En los ensayos

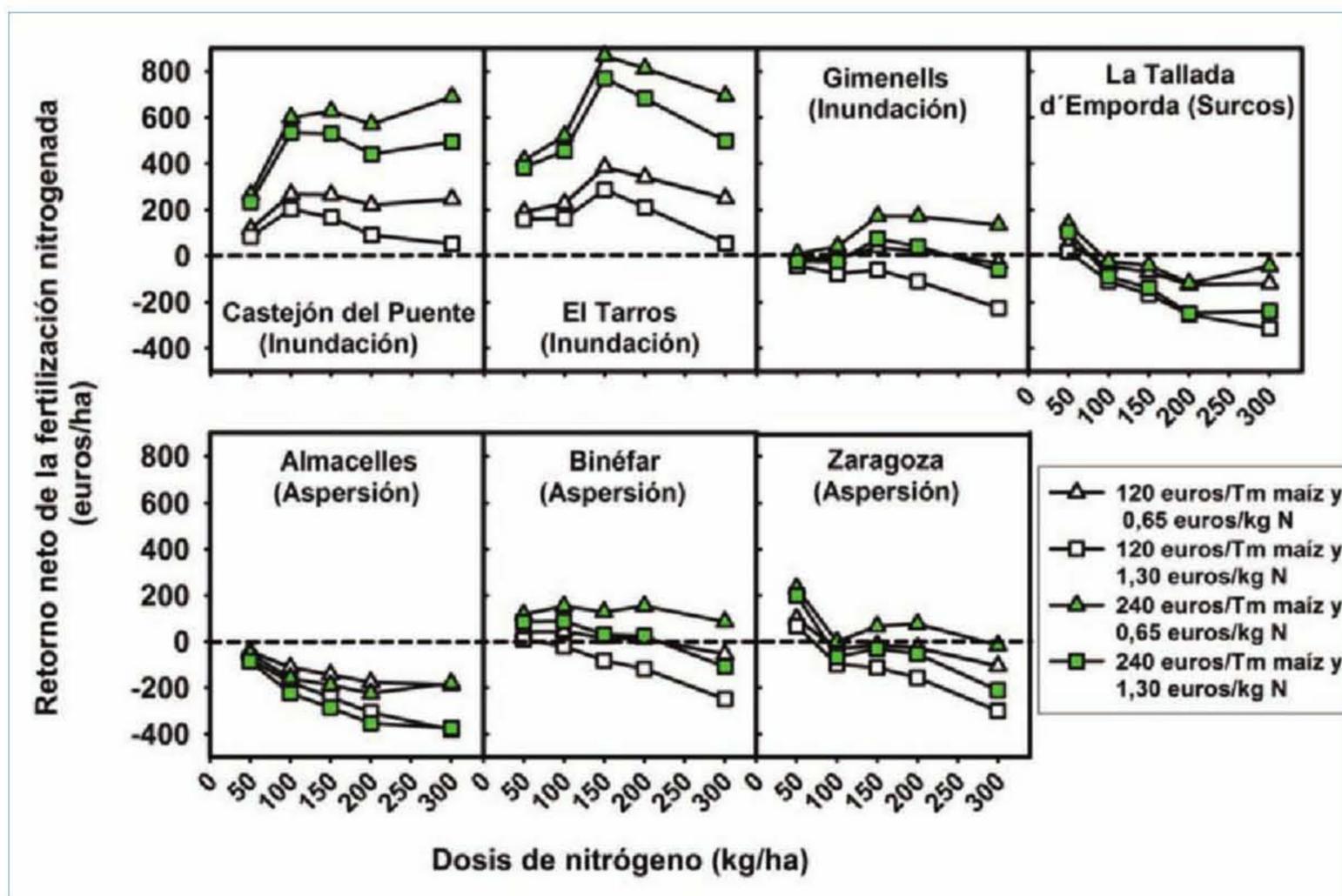


Figura 3. Retorno neto de la fertilización nitrogenada del maíz tras un cultivo de alfalfa en los diferentes ensayos y para las distintas dosis de N estudiadas. Se han considerado dos escenarios de precios del grano del maíz (bajo: 120 euros/Tm; alto: 240 euros/Tm) y dos escenarios de precios del fertilizante nitrogenado (bajo: 0,65 euros/kg N; alto: 1,30 euros/kg N).

regados por aspersión las pérdidas de N estimadas fueron despreciables para dosis de N fertilizante menores de 150 kg N/ha. Además del N perdido durante el período de cultivo del maíz, es necesario tener en cuenta que valores altos de N residual tras la cosecha puede dar lugar posteriormente a pérdidas de N importantes si se producen lluvias intensas durante el otoño-invierno.

La mayor respuesta a la fertilización nitrogenada en los ensayos regados por inundación, en comparación con los regados por aspersión, puede ser explicada por las mayores pérdidas de N estimadas en los ensayos regados por inundación, especialmente a las menores dosis de N fertilizante aplicadas (50-100 kg N/ha) (Figura 2). En el riego por inundación la dosis de agua aplicada en cada riego es mucho mayor que en el riego por aspersión, lo que explica las mayores pérdidas de N en riego por inundación. Así, diversos estudios han encontrado mayores pérdidas de N con riego por inundación en comparación con riego por aspersión (Po-

wer y col., 2000; Cavero y col., 2003; Causapé y col., 2006). La mayor eficiencia en el riego conduce a una mayor eficiencia de la fertilización nitrogenada.

Retorno económico de la aplicación de fertilizante nitrogenado en maíz tras un cultivo de alfalfa

El retorno económico de la aplicación de N fertilizante varió dependiendo del ensayo y de los escenarios de precio de grano-precio de N fertilizante (Figura 3). El máximo retorno económico se obtuvo con dosis de N que oscilaron entre 0 y 150 kg N/ha, independientemente de los escenarios de precios. En los ensayos realizados con riego por aspersión las dosis de fertilizante mayores de 50 kg N/ha produjeron pérdidas económicas, excepto en el escenario de alto precio del maíz y bajo precio del N fertilizante en Binéfar y Zaragoza (Figura 3). Sin embargo, en los tres ensayos regados por inundación la dosis de N que produjo el mayor retorno económico varió entre 100 y 150 kg N/ha. /

Conclusiones

El contenido de N en las raíces de alfalfa de 4-5 años en el horizonte de 0-30 cm del suelo varió entre 54 y 212 kg N/ha.

El cultivo previo de alfalfa proporcionó suficiente N al cultivo siguiente de maíz para producir entre 10,3 y 16,7 Tm/ha de grano sin necesidad de aplicar fertilizante nitrogenado.

En tres de los siete ensayos el rendimiento máximo del maíz se obtuvo sin necesidad de aplicar N fertilizante. En los otros cuatro, la dosis de N fertilizante que optimizó el rendimiento del maíz varió entre 115 y 196 kg N/ha.

El sistema de riego parece influir en la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada tras un cultivo de alfalfa dado que la dosis óptima de N fertilizante fue menor en riego por aspersión (0-115 kg N/ha) que en riego por inundación (118-196 kg N/ha).

La aplicación de dosis de N fertilizante excesivas tras un cultivo de alfalfa incrementa las pérdidas de N durante el periodo de cultivo y aumenta el riesgo de que se produzcan pérdidas de N tras la cosecha del maíz.

El retorno económico neto de la fertilización nitrogenada del maíz tras un cultivo de alfalfa fue máximo con dosis de N fertilizante comprendidas entre 0 y 150 kg N/ha, independientemente de los precios del maíz y del fertilizante nitrogenado.

Dado que muchos agricultores aplican más de 300 kg N/ha al maíz, este estudio demuestra que es posible reducir de forma muy importante la dosis de N fertilizante tras un cultivo de alfalfa, especialmente cuando el campo es regado por aspersión.

Referencias bibliográficas

- Álvaro-Fuentes, J.; Lloveras, J. (2003). Metodología de la producción de alfalfa en España. Asoc. Interprofesional de Forrajes Españoles, Lérida. España.
- Bullock, D.G. (1992). Crop rotation. *Crit. Rev. Plant Sci.* 11:309-326.
- Causapé J.D.; Quílez, D.; Aragüés, R. (2006). Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River Basin: An overview. *Environ. Monit. Assess.* 117:451-461.
- Cavero, J.; Beltrán, A.; Aragüés, R. (2003). Nitrate exported in drainage waters of two sprinkler-irrigated watersheds. *J. Environ. Qual.* 32:916-926.
- Columella, L.(70). Los doce libros de la agricultura (The twelve books of agriculture). Traducción C.J. Castro. 1959. Ed. Iberia, Barcelona, España.
- Danso, S.K.A.; Papastylianou, I. (1992). Evaluation of the nitrogen contribution of legumes to subsequent cereals. *J. Agric. Sci.* 119:13-8.
- Fox, R.H.; Piekielek, W.P. (1988). Fertilizer N equivalence of alfalfa, birdsfoot trefoil, and red clover for succeeding corn crops. *J. Prod. Agric.* 1:313-317.
- Power, J.F.; Wiese, R.; Flowerday, D. (2000). Managing nitrogen for water quality-Lessons from management systems evaluation area. *J. Environ. Qual.* 29:355-366.
- 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.
- Sisquella, M.; Lloveras, J.; Santiveri, P.; Alvaro, J.; Cantero, C. (2004). Técnicas de cultivo para la producción de maíz, trigo y alfalfa en regadíos del valle del Ebro. Proyecto TRAMA-LIFE. Fundación Catalana de Cooperación, Lérida, España.