

BALANCES DE NITRÓGENO EN CULTIVO DE MAÍZ EN REGADÍO EN ARAGÓN

Las dosis de N fertilizante que permiten alcanzar el rendimiento máximo de grano de maíz con sistemas de riego de media-alta eficiencia oscilaron entre 136 y 276 kg N ha⁻¹

R. Isla¹, J. Caveró², R. Yagüe¹ y D. Quílez¹

¹ Unidad de Suelos y Riegos, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Apdo. 727, 50080 Zaragoza.

² Dpto de Genética y Producción Vegetal. Estación Experimental de Aula Dei (CSIC), Apdo. 222,

1. INTRODUCCIÓN

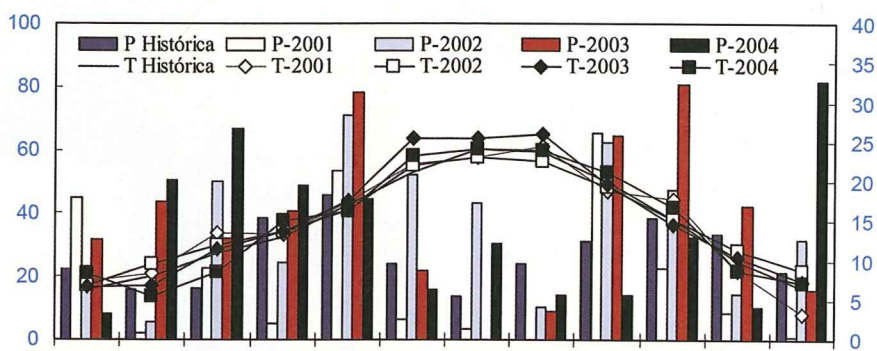
El maíz (*Zea mays* L.) es junto con la alfalfa (*Medicago sativa* L.) el principal cultivo de regadío de Aragón. La superficie sembrada de maíz es de alrededor de 80.000 ha, siendo la producción total de 712.630 toneladas en 2002. El rendimiento medio se sitúa en 9,6 Mg ha⁻¹ pero en las zonas más productivas se obtienen rendimientos de 12 a 15 Mg ha⁻¹. El clima de la zona es semiárido con temperaturas altas durante el verano, bajas precipitaciones (300-450 mm, periodo 1982-2002), una velocidad del viento elevada en algunas zonas y una elevada demanda evaporativa (ET₀ = 1100-1350 mm; FAO Penman-Monteith).

La preocupación surgida en los últimos años relacionada con la contaminación difusa de las aguas por nitratos debido a sus efectos nocivos en el medioambiente y la salud humana (Follet *et al.*, 1991), llevó a la UE a establecer una Directiva (DOCE, 1991) relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura y a incluir los nitratos como un indicador de calidad en la reciente Directiva Marco del Agua (DOCE, 2000).

En Aragón, las zonas vulnerables están ligadas casi exclusivamente a áreas agrícolas de regadío con cultivos especialmente exigentes en N como el maíz. Trabajos de Isidoro (1998) y Causapé (2002) en los polígonos de riego de Violada y Bardenas, respectivamente, señalan que la sobrefertilización de cultivos como el maíz y la baja eficiencia de los riegos por superficie son las principales causas de la contaminación por nitrato en las aguas superficiales de las zonas de regadío.

En este contexto, los objetivos planteados en el presente trabajo fueron: (1) evaluar la magnitud de los distintos com-

Figura 1. Precipitación (P) y temperatura (T) media mensual durante los cuatro años de duración del estudio junto con los valores históricos.



Para las condiciones de la parcela del ensayo de riego por aspersión se observó una aceptable estabilidad interanual del N mineral provisto (N_{min} presiembr + N fertilizante) que permite alcanzar el rendimiento máximo en el maíz, obteniéndose un valor promedio de 244 kg N ha⁻¹, al considerar los datos de cuatro años de forma combinada.

ponentes del balance de N y la eficiencia en el uso del nitrógeno en un cultivo de maíz de regadío en el Valle Medio del Ebro, y (2) obtener las funciones de respuesta del rendimiento de grano a distintas dosis de fertilizante nitrogenado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

* Localización y características de los ensayos

Se realizaron dos ensayos en la Finca Experimental del CITA en Montañana durante cuatro campañas consecutivas (2001-2004). Las características meteorológicas más relevantes registradas durante los cuatro años de estudio junto con las del año medio se presentan en la Fig. 1. Cabe destacar la escasa precipitación durante los meses de verano, lo que obliga a riegos casi continuos debido a la alta demanda evaporativa de la zona.

La parcela donde se ubicó el ensayo está situada >>>

►►► en las terrazas del río Gállego y el suelo se clasifica como Typic Xerofluvent (Soil Survey Staff, 1998), presentándose algunas de sus características en la Tabla 1.

El primer ensayo se realizó en 12 lisímetros de drenaje de 2 m de ancho y 2,6 m de largo con una superficie de 5,2 m². Los lisímetros se rellenaron con suelo de la misma parcela en la que están instalados en el año 1997.

Se utilizó maíz de la variedad Dracma y se sembró (22/05/2001, 15/05/2002, 14/05/2003 y 28/04/2004) a una densidad de 84.600 plantas ha⁻¹, con 4 filas de 11 plantas en cada lisímetro.

El diseño experimental fue en bloques al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en dosis de nitrógeno totales de 0 kg ha⁻¹ (N0), 180 kg ha⁻¹ (N1), 240 kg ha⁻¹ (N2) y 300 kg ha⁻¹ (N3), excepto en el año 2002, en que los tratamientos fueron de 0 kg ha⁻¹ (N0), 120 kg ha⁻¹ (N1), 180 kg ha⁻¹ (N2) y 240 kg ha⁻¹ (N3). En los tratamientos N1, N2 y N3 se aplicaron en presembrado 60, 120 y 180 unidades de N-P2O5-K2O utilizándose un abono compuesto 9-18-27 y la cobertera se fraccionó

en dos aplicaciones iguales de solución nitrogenada N-32 que se aplicaron en el estadio de 6-8 hojas (26 junio de 2001, 8 julio de 2002, 23 de junio de 2003 y 24 de junio de 2004) y penacho (24 de julio de 2001, 8 de agosto de 2002, 24 de julio de 2003 y 27 de julio de 2004) hasta completar la dosis de N indicada para cada tratamiento. En el tratamiento N0 se aplicaron en presembrado 120 y 180 unidades de P-K en forma de superfosfato triple (45% P2O5) y de KCl.

Se utilizó un sistema de riego por goteo con una densidad de goteros suficientemente alta (45 goteros de 2 L h⁻¹ por lisímetro) para que se solaparan en superficie los bulbos húmedos, simulando así unas condiciones semejantes a las

Tabla 1. Características del suelo de la parcela donde están ubicados los ensayos.

| Perfil (cm) | Arena (g kg ⁻¹) | Limo (g kg ⁻¹) | Arcilla (g kg ⁻¹) | Fósforo ¹ (g kg ⁻¹) | Potasio ² (g kg ⁻¹) | Mat. Orgánica (%) |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|--|--|-------------------|
| 0-37 | 542 | 325 | 133 | 0,050 | 0,645 | 2,35 |
| 37-53 | 506 | 365 | 129 | 0,007 | 0,268 | 1,10 |
| 53-120 | 553 | 107 | 340 | 0,001 | 0,061 | 0,67 |

¹ Método Olsen. ² Método del acetato amónico.

Tabla 2. Balance de N anual para el ensayo de maíz en lisímetros en Zaragoza durante la campaña 2001-02 (21 mayo 2001 al 15 mayo 2002). Se presenta la media ± error estándar; donde se contaba con un único valor no consta error estándar.

| Dosis aplicada (kg N ha ⁻¹) | 0 | 180 | 240 | 300 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| NMIN presembrado 2001 | 106±13 | 204±110 | 342±94 | 407±91 |
| N mineralizado anual | 218±21 | 218±21 | 218±21 | 218±21 |
| N aportado riego | 30 | 30 | 30 | 30 |
| N aplicado fertilizantes | 0 | 180 | 240 | 300 |
| N total entradas (kg N ha⁻¹) | 354±13 | 633±110 | 831±94 | 955±91 |
| N extraído cultivo | 133±16 | 218±118 | 219±134 | 240±135 |
| NMIN presembrado 2002 | 206±13 | 261±88 | 376±18 | 401±110 |
| N lixiviado | 15±3 | 38±25 | 104±66 | 150±67 |
| N total salidas (kg N ha⁻¹) | 354±11 | 517±52 | 700±81 | 791±228 |
| N no computado (kg N ha⁻¹) | | 116±144 | 131±45 | 164±138 |
| Rendimiento (Mg ms ha⁻¹) | 5,70±0,5 | 7,89±1,2 | 8,86±0,6 | 8,86±1,1 |
| Parámetros (kg N ha⁻¹) | | | | |
| N en planta | 133±16 | 218±118 | 219±134 | 240±135 |
| N en grano | 64±1,6 | 106±12,6 | 115±18,4 | 119±19,1 |
| Eficiencias | | | | |
| Efic. uso fertilizante (EUF) | | 0,47±0,07 | 0,36±0,13 | 0,36±0,10 |
| Efic. utilización del N (kg N Mg ⁻¹ grano) | 20±1,8 | 24±2,0 | 22±2,7 | 24±4,3 |
| Índice de cosecha del N (ICN) | 0,54±0,03 | 0,55±0,03 | 0,59±0,01 | 0,56±0,07 |

de un riego por inundación. La instalación empleada para el riego consta de un depósito de 40 m³, bomba, filtro de anillas, programador, y electroválvulas, además de la red principal que suministra agua a las tuberías portagoteros. Cada lisímetro puede ser regado de forma independiente, aunque siempre se regaban todos simultáneamente utilizando el sistema de forma manual. Los sistemas de riego por inundación presentan una eficiencia de riego variable, dependiendo fundamentalmente de las propiedades físicas del suelo, de la forma y nivelación de las parcelas y de los caudales de riego (Lecina *et al.*, 2005). En este ensayo se simuló un sistema de riego por inundación con una eficiencia media-alta ajustando la fracción ►►►

INABONOS PRESENTA Timac AGRO



Nuevas ideas, nuevos retos. La capacidad de innovación al servicio del agricultor y ganadero ha sido una constante en la trayectoria de Inabonos y del Grupo Roullier.

Ahora, como consecuencia de ese trabajo continuo por ofrecer lo mejor, nace Timac AGRO, una compañía que recoge la experiencia anterior y la proyecta hacia el futuro para seguir ofreciendo soluciones adaptadas a los nuevos tiempos.

Con ilusión. Con inteligencia.



www.timacagro.es

►►► de lavado al 20%. Para ello los volúmenes de agua aplicados se calcularon multiplicando por 1,25 las necesidades de agua estimadas del cultivo. Al inicio de cada riego, y una vez estabilizado el caudal de los mismos, se procedió al aforado de 8 a 10 goteros y se calculaba el caudal medio. El tiempo de riego se estimó a partir del caudal de los goteros, el número de goteros y los volúmenes de agua que era necesario aportar. En cada uno de los riegos se tomaron muestras del agua de riego en las que se determinó la concentración de nitrato.

Simultáneamente al ensayo de los lisímetros, y adyacente al mismo, se ubicó el segundo ensayo en una parcela en riego por aspersión. El diseño estadístico fue en bloques al azar con cinco tratamientos de nitrógeno (0-120-180-240-300 kg N ha⁻¹) y tres repeticiones. El fertilizante nitrogenado se repartió en una aplicación en presembrado y en dos coberturas, de la misma manera que en el ensayo de los lisímetros. Las parcelas elementales fueron de 6 m x 7,5 m y la densidad de plantación fue de 93.000 plantas ha⁻¹. La variedad utilizada fue Dracma, la misma que en el ensayo en lisímetros.

* *N mineral del suelo (NMIN)*

En el ensayo de los lisímetros, cada campaña se realizó un muestreo del suelo antes de sembrar (21 mayo 2001, 15 mayo 2002, 13 mayo 2003 y 28 abril 2004, respectivamente). Además, se realizó un muestreo después de cosechar: el 24 de noviembre de 2003 y el 8 de noviembre 2004. En cada muestreo se tomaron muestras de suelo cada 0,3 m hasta una profundidad de 1,2 m en dos puntos de cada lisímetro utilizándose barrenas Eijkelkamp™ de 4 cm de diámetro. Se hizo una muestra compuesta por cada horizonte y lisímetro que se tamizó en fresco. Una parte de la muestra se secó en estufa a 105°C para determinar el contenido gravimétrico de humedad. Con las muestras de los años 2001, 2002 y 2003 se prepararon dos extractos de relación aproximada

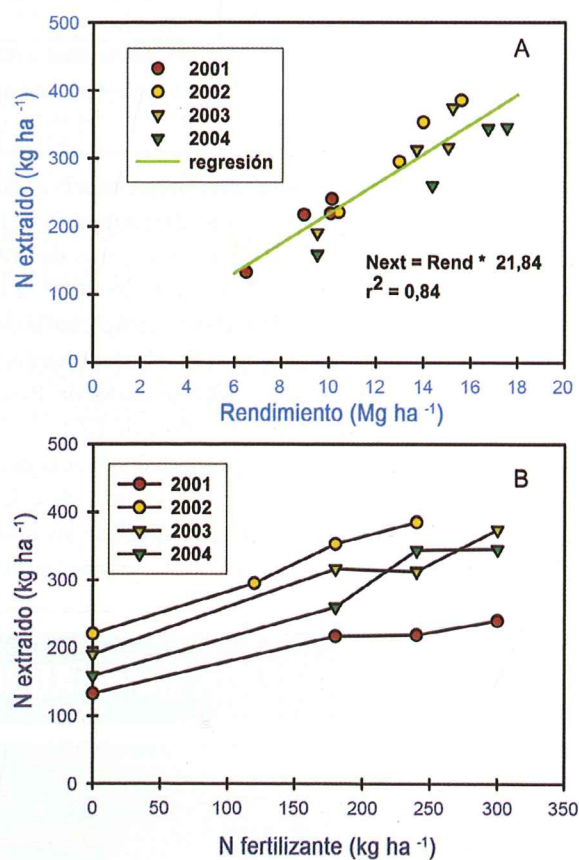
1:3 (10 g de suelo fresco y 30 ml de solución extractante) con KCl 1M para la determinación de N-NH₄⁺, y con solución saturada en CaSO₄²⁻ para la determinación de N-NO₃⁻. El nitrato se determinó por espectrofotometría de absorción y el amonio mediante electroforesis capilar. En el año 2004 se preparó un extracto con aproximadamente 10 g de suelo y 30 ml de solución de KCl 2M, en el que se determinaron las concentraciones de N-NH₄⁺ y N-NO₃ por colorimetría utilizando un autoanizador de flujo continuo segmentado (AA3 de Bran+Luebbe).

En el ensayo en riego por aspersión se muestreó el suelo hasta 1,2 m de profundidad a intervalos de 0,3 m antes de la

Tabla 4. Balance de N anual para el ensayo de maíz en lisímetros en Zaragoza durante la campaña 2003-04 (13 mayo 2003 al 28 abril 2004). Se presenta la media ± error estándar; donde se contaba con un único valor no consta error estándar.

| Dosis aplicada (kg N ha ⁻¹) | 0 | 180 | 240 | 300 |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| NMIN presembrado 2003 | 170±10 | 198±14 | 224±37 | 230±18 |
| N mineralizado anual | 134±9 | 134±9 | 134±9 | 134±9 |
| N aportado riego | 32 | 32 | 32 | 32 |
| N aplicado fertilizantes | 0 | 180 | 240 | 300 |
| N total entradas (kg N ha⁻¹) | 337±10 | 544±14 | 630±37 | 696±18 |
| N extraído cultivo | 190±15 | 316±25 | 313±22 | 374±15 |
| NMIN presembrado 2004 | 138±16 | 168±29 | 230±82 | 241±75 |
| N lixiviado | 8±1 | 14±6 | 60±62 | 75±36 |
| N total salidas (kg N ha⁻¹) | 337±14 | 499±51 | 603±31 | 690±66 |
| N no computado (kg N ha⁻¹) | | 45±58 | 28±39 | 6±84 |
| Rendimiento (Mg ms ha⁻¹) | 8,33±0,5 | 13,25±1,1 | 12,02±1,8 | 13,33±1,2 |
| Parámetros (kg N ha⁻¹) | | | | |
| N en planta | 190±15 | 316±25 | 313±22 | 374±15 |
| N en grano | 99±9,1 | 186±11,7 | 186±21,2 | 211±18,4 |
| Eficiencias | | | | |
| Efic. uso fertilizante (EUF) | | 0,70±0,17 | 0,51±0,14 | 0,61±0,00 |
| Efic. utilización del N (kg N Mg ⁻¹ grano) | 20±1,1 | 21±0,8 | 23±1,3 | 25±1,1 |
| Índice de cosecha del N (ICN) | 0,59±0,02 | 0,66±0,02 | 0,67±0,03 | 0,63±0,03 |

Figura 2. Relación del N extraído por el cultivo en el ensayo de maíz en lisímetros con A) el rendimiento en grano (Mg ha⁻¹ al 14% de humedad) y B) el N aplicado con el fertilizante.



siembra en los cuatro años de duración del experimento. El procedimiento de muestreo y análisis para dichas muestras fue el mismo que para las muestras tomadas en el ensayo ►►►

►►► de los lisímetros.

* *Material vegetal: biomasa, rendimiento y N extraído por el cultivo*

En el momento de la cosecha (2 octubre 2001, 8 noviembre 2002, 3 noviembre 2003 y 4 octubre 2004) se recolectaron todas las plantas de cada lisímetro. Las plantas, sin mazorcas, se pesaron en fresco en el campo y se tomaron tres plantas seleccionadas al azar, en las que se determinó la humedad por secado en estufa a 60°C hasta peso constante. Todas las mazorcas de cada lisímetro se secaron en estufa y se desgranaron, obteniéndose el rendimiento en grano. Se tomaron muestras de grano, hojas+tallos y zuros secos que se molieron y tamizaron por tamiz de 0,5 mm, determinándose el contenido de nitrógeno total por combustión (LECO FP-528). El N extraído por el cultivo se obtuvo multiplicando la concentración de N en cada una de las partes de la planta por la materia seca producida. Debido a las importantes diferencias encontradas en la bibliografía (Hétier *et al.*, 1986; Crozier y King, 1993; Sainz-Rozas *et al.*, 2004) en el porcentaje de N en las raíces en relación al total extraído por el cultivo de maíz, se utilizó un valor promedio de 12,5% en todos los tratamientos ensayados.

En el ensayo de riego por aspersión, se cosecharon las mazorcas en una superficie de 1,7 m², de los dos surcos centrales de la parcela. El procedimiento posterior fue idéntico al realizado en el ensayo de los lisímetros, si bien en este trabajo solamente se presentan los resultados del rendimiento de grano de cada parcela.

* *Lixiviación de nitrato*

Después de cada riego o lluvia se midió el volumen de drenaje de cada lisímetro en unos depósitos graduados de 50 litros, conectados mediante una manguera a cada uno de los tubos de salida del drenaje de los lisímetros. Además, se tomaron muestras del agua de drenaje en las que

se midió la concentración de nitrato. La masa de nitrato lavada se obtuvo para cada fecha de muestreo como el producto del volumen drenado por la concentración de nitrato. ►►►

Tabla 3. Balance de N anual para el ensayo de maíz en lisímetros en Zaragoza durante la campaña 2002-03 (15 mayo 2002 al 13 mayo 2003). Se presenta la media ± error estándar; donde se contaba con un único valor no consta error estándar.

| Dosis aplicada (kg N ha ⁻¹) | 0 | 180 | 240 | 300 |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| NMIN presiembra 2003 | 170±10 | 198±14 | 224±14 | 230±18 |
| N mineralizado anual | 109±14 | 109±14 | 109±14 | 109±14 |
| N aportado riego | 32 | 32 | 32 | 32 |
| N aplicado fertilizantes | 0 | 180 | 240 | 300 |
| N total entradas (kg N ha⁻¹) | 312±10 | 519±14 | 605±37 | 672±18 |
| N extraído cultivo | 190±15 | 316±25 | 313±22 | 374±15 |
| NMIN postcosechs 2003 | 115±12 | 131±10 | 172±69 | 205±90 |
| Nlixiviado | 7±0 | 13±6 | 49±49 | 58±23 |
| N total salidas (kg N ha⁻¹) | 312±24 | 460±20 | 533±61 | 637±100 |
| N no computado (kg N ha⁻¹) | | 59±20 | 72±26 | 34±92 |
| Rendimiento (Mg ms ha⁻¹) | 8,33±0,5 | 13,25±1,1 | 12,02±1,8 | 13,33±1,2 |
| Parámetros (kg N ha⁻¹) | | | | |
| N provisto | 312±10 | 519±14 | 605±37 | 672±18 |
| N disponible | 305±24 | 447±18 | 485±49 | 579±78 |
| N en planta | 190±15 | 316±25 | 313±22 | 374±15 |
| N en grano | 99±1,1 | 186±11,7 | 186±12,2 | 211±18,4 |
| Eficiencias | | | | |
| Efic. uso fertilizante (EUF) | | 0,70 ±0,17 | 0,51±0,14 | 0,61±0,00 |
| Efic. disponibilidad N provisto | 0,98±0,05 | 0,86±0,04 | 0,80±0,07 | 0,86±0,11 |
| Efic. uso N disponible (kg grano kg ⁻¹ N) | 31±2,4 | 34±1,8 | 28±6,4 | 26±5,2 |
| Efic. utilización del N (kg N Mg ⁻¹ grano) | 20±1,1 | 21±0,8 | 23±1,3 | 25±1,1 |
| Índice de Cosecha del N (ICN) | 0,59±0,02 | 0,66±0,02 | 0,67±0,03 | 0,64±0,03 |

Tabla 4. Balance de N anual para el ensayo de maíz en lisímetros en Zaragoza durante la campaña 2003-04 (13 mayo 2003 al 28 abril 2004). Se presenta la media ± error estándar; donde se contaba con un único valor no consta error estándar.

| Dosis aplicada (kg N ha ⁻¹) | 0 | 180 | 240 | 300 |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| NMIN presiembra 2004 | 138±16 | 168±29 | 230±82 | 241±75 |
| N mineralizado anual | 80±23 | 80±23 | 80±23 | 80±23 |
| N aportado riego | 27 | 27 | 27 | 27 |
| N aplicado fertilizantes | 0 | 180 | 240 | 300 |
| N total entradas (kg N ha⁻¹) | 246±16 | 456±29 | 577±82 | 648±75 |
| N extraído cultivo | 159±24 | 260±28 | 344±22 | 346±13 |
| NMIN postcosechs 2004 | 81±18 | 98±24 | 91±31 | 84±50 |
| Nlixiviado | 6±0,6 | 14±6,8 | 26±10,8 | 30±10,5 |
| N total salidas (kg N ha⁻¹) | 246±7 | 372±36 | 460±35 | 460±46 |
| N no computado (kg N ha⁻¹) | | 84±57 | 117±50 | 189±121 |
| Rendimiento (Mg ms ha⁻¹) | 8,33±1,8 | 12,63±0,9 | 14,65±0,9 | 15,35±0,0 |
| Parámetros (kg N ha⁻¹) | | | | |
| N provisto | 246±16 | 456±29 | 577±82 | 648±75 |
| N disponible | 240±7 | 358±43 | 435±46 | 429±39 |
| N en planta | 159±24 | 260±28 | 344±22 | 346±13 |
| N en grano | 94±18,6 | 164±23,6 | 221±21,1 | 235±4,9 |
| Eficiencias | | | | |
| Efic. uso fertilizante (EUF) | | 0,56±0,16 | 0,77±0,14 | 0,62±0,04 |
| Efic. disponibilidad N provisto (ED Np) | 0,98±0,09 | 0,79±0,13 | 0,75±0,04 | 0,66±0,13 |
| Efic. uso N disponible (kg grano kg ⁻¹ N) | 40±1,2 | 40±1,5 | 39±2,0 | 41±4,0 |
| Efic. utilización del N (kg N Mg ⁻¹ grano) | 17±0,5 | 18±1,0 | 21±0,6 | 20±0,7 |
| Índice de Cosecha del N (ICN) | 0,66±0,03 | 0,71±0,04 | 0,72±0,02 | 0,76±0,02 |

►►► En el ensayo en riego por aspersión no se midió la lixiviación de nitrato.

* *Balace y eficiencias de N*

El balance de nitrógeno se realizó únicamente en el ensayo de los lisímetros, y por años completos, es decir, desde la fecha de siembra de un año hasta la fecha de siembra del año siguiente, para los tres primeros años de duración del experimento. Además, en los años 2003 y 2004, para los que se disponía de datos de contenido de N mineral en suelo después de la cosecha, se realizaron los balances para el período de duración del ciclo de cultivo de maíz, es decir, desde la siembra hasta la recolección. El balance y las eficiencias del N se realizaron siguiendo la metodología descrita en el Capítulo II.

El N mineralizado se calculó aplicando la misma ecuación en las parcelas testigo y considerando nulas las pérdidas de N en esas parcelas. El balance se efectuó individualmente en cada parcela, y en el caso de que las pérdidas de N fueran negativas se consideraron como cero.

* *Curvas de respuesta del cultivo*

Para cada campaña, y tanto para el ensayo de los lisímetros como para el ensayo de dosis de N en aspersión, se representó la curva dosis-rendimiento y se probaron modelos de ajuste cuadrático y lineal-meseta (Cerrato y Blackmer, 1990). Estadísticamente se obtuvo la curva más representativa utilizando procedimientos de regresión no-lineal (SAS Institute, 1988). Se seleccionó el modelo cuyo ajuste presentó un mayor coeficiente de determinación y que permitía obtener un umbral dentro de las dosis ensayadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Balance de N en el ensayo de lisímetros

El NMIN en presiembra osciló entre los 100 y los 400 kg N ha⁻¹, observándose en todos los años un incremento conforme aumentó la dosis de N aplicado (Tablas 2 a 6). En el caso del año 2001, este aumento también se observó ya que el ensayo se inició en 2000. El N mineralizado anualmente fue disminuyendo progresivamente siendo de 218, 166, y 134 kg N ha⁻¹ para los años 2001, 2002, y 2003, respectivamente. La mineralización durante el ciclo de cultivo en 2003 (109 kg N ha⁻¹, Tabla 5) supuso un 81% de la mineralización anual (134 kg N ha⁻¹, Tabla 4), indicando la importancia de las altas temperaturas y la humedad debida al riego en el proceso de mineralización. Estos valores de N mineralizado están en el rango de los observados por otros autores en zonas semiáridas y cultivos de regadío (Cavero *et al.*, 1997; Sánchez *et al.*, 1998). La progresiva disminución observada podría estar relacionada por una parte con el hecho de que los lisímetros fueron rellenados en 1997 con tierra del horizonte 0-30 cm de la parcela original, que tiene un mayor contenido en N que los horizontes más profundos. Cuando un suelo es alterado de forma importante, se suele producir una gran mineralización de N, que va disminuyendo hasta alcanzar un equilibrio que es característico del clima, suelo y rotación de cultivos (Loomis y Connor, 1992). Por otro lado,

Figura 3. Relación entre el N lixiviado en el ensayo de maíz en lisímetros, expresado como A) kg N ha⁻¹ o B) porcentaje sobre las entradas totales de N, con el N aplicado con el fertilizante.

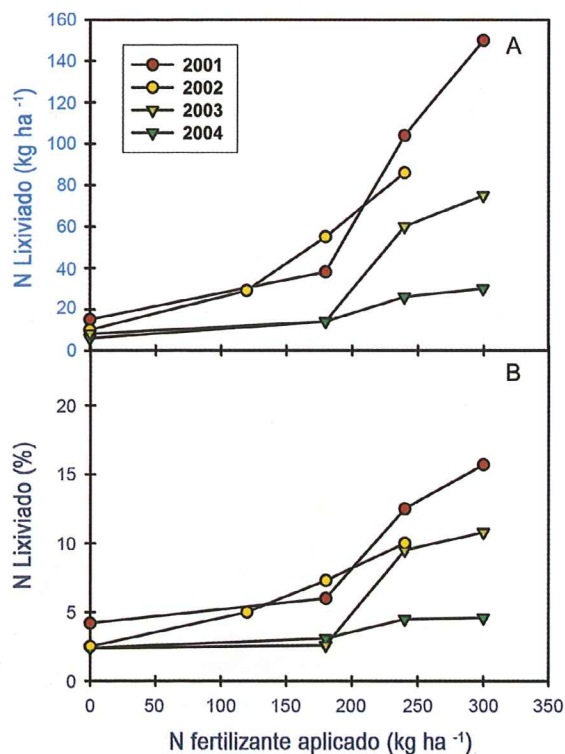
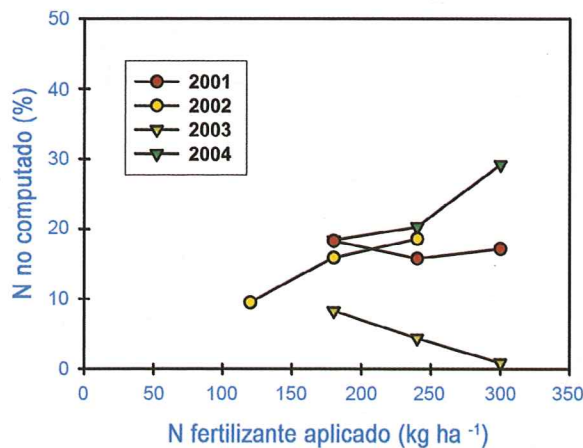


Figura 4. Relación entre el N no computado en el ensayo de maíz en lisímetros, expresado como porcentaje sobre las entradas totales, y el N aplicado con el fertilizante.



también podría contribuir a este hecho el que toda la biomasa aérea del cultivo se exportó de los lisímetros cada año, lo que disminuye la cantidad de N que se incorpora al suelo con los residuos de cultivo.

El N aportado por el agua de riego fue similar en los distintos años y constituyó una baja contribución al balance de N, oscilando entre el 8,5 y el 3,7% de las entradas de N al sistema para los tratamientos N0 y N3, respectivamente (Tablas 2 a 6).

El N extraído por el cultivo varió entre 133 y 385 ►►►

▶▶▶ kg N ha⁻¹ (Tablas 2 a 6). Se observó un aumento lineal y significativo ($P < 0,001$) de las extracciones conforme aumentó el rendimiento (Fig. 2A). El N extraído por cada tonelada de grano de maíz obtenido varió entre 17 y 25 kg de N, observándose un ligero aumento de dicho valor conforme aumentó la dosis de fertilizante aplicada (Tablas 2 a 6). Las diferencias de N extraído entre los distintos años para una misma dosis fertilizante aplicada se mantuvieron, en general, paralelas a las diferencias observadas en el tratamiento sin fertilizante nitrogenado (Fig. 2B).

El N perdido por lavado (Nl) varió entre 6 y 15 kg N ha⁻¹ en el tratamiento no fertilizado (Tablas 2 a 6). Conforme aumentó la dosis de N fertilizante aplicada, aumentó el nitrógeno perdido por lavado (Fig. 3A), lo que está de acuerdo con lo encontrado en otros trabajos (Broadbent y Rauschkolb, 1977). Esto ocurrió tanto en términos absolutos (kg ha⁻¹) como en relativos (porcentaje respecto del total de entradas) (Fig. 3B). Para una dosis de N fertilizante aplicada se observó una progresiva disminución del N lixiviado con el paso de los años (Fig. 3A), si bien en el N mineralizado en 2004 tan solo se computó la mineralización hasta noviembre. Esta tendencia coincide con la disminución progresiva observada del N mineralizado a lo largo de los años del ensayo.

El N no computado en el balance fue siempre positivo, lo cual indica que existen salidas netas del sistema no computadas como pueden ser emisiones gaseosas o inmovilización de N en la materia orgánica del suelo.

Se observó un aumento del N no computado conforme aumentó la dosis de fertilizante (Tablas 2 a 5), aunque cuando se consideró el porcentaje del N no computado frente a las entradas de cada año, no se observó una clara relación

Tabla 5. Balance de N para el ciclo de cultivo de maíz en lisímetros durante la campaña 2003 (13 mayo al 24 noviembre). Se presenta la media ± error estándar; donde se contaba con un único valor no consta error estándar.

| Dosis aplicada (kg N ha ⁻¹) | 0 | 180 | 240 | 300 |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| NMIN presiembra 2003 | 170±10 | 198±14 | 224±14 | 230±18 |
| N mineralizado anual | 109±14 | 109±14 | 109±14 | 109±14 |
| N aportado riego | 32 | 32 | 32 | 32 |
| N aplicado fertilizantes | 0 | 180 | 240 | 300 |
| N total entradas (kg N ha⁻¹) | 312±10 | 519±14 | 605±37 | 672±18 |
| N extraído cultivo | 190±15 | 316±25 | 313±22 | 374±15 |
| NMIN postcosechs 2003 | 115±12 | 131±10 | 172±69 | 205±90 |
| N lixiviado | 7±0 | 13±6 | 49±49 | 58±23 |
| N total salidas (kg N ha⁻¹) | 312±24 | 460±20 | 533±61 | 637±100 |
| N no computado (kg N ha⁻¹) | | 59±20 | 72±26 | 34±92 |
| Rendimiento (Mg ms ha⁻¹) | 8,33±0,5 | 13,25±1,1 | 12,02±1,8 | 13,33±1,2 |
| Parámetros (kg N ha⁻¹) | | | | |
| N provisto | 312±10 | 519±14 | 605±37 | 672±18 |
| N disponible | 305±24 | 447±18 | 485±49 | 579±78 |
| N en planta | 190±15 | 316±25 | 313±22 | 374±15 |
| N en grano | 99±9,1 | 186±11,7 | 186±21,2 | 211±18,4 |
| Eficiencias | | | | |
| Efic. uso fertilizante (EUF) | | 0,70 ±0,17 | 0,51±0,14 | 0,61±0,00 |
| Efic. disponibilidad N provisto | 0,98±0,05 | 0,86±0,04 | 0,80±0,07 | 0,86±0,11 |
| Efic. uso N disponible (kg grano kg ⁻¹ N) | 31±2,4 | 34±1,8 | 28±6,4 | 26±5,2 |
| Efic. utilización del N (kg N Mg ⁻¹ grano) | 20±1,1 | 21±0,8 | 23±1,3 | 25±1,1 |
| Índice de Cosecha del N (ICN) | 0,59±0,02 | 0,66±0,02 | 0,67±0,03 | 0,64±0,03 |

Tabla 6. Balance de N para el ciclo de cultivo del ensayo de maíz en lisímetros en Zaragoza durante la campaña 2004 (28 abril al 8 noviembre). Se presenta la media ± error estándar; donde se contaba con un único valor no consta error estándar.

| Dosis aplicada (kg N ha ⁻¹) | 0 | 180 | 240 | 300 |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| NMIN presiembra 2004 | 138±16 | 168±29 | 230±82 | 241±75 |
| N mineralizado anual | 80±23 | 80±23 | 80±23 | 80±23 |
| N aportado riego | 27 | 27 | 27 | 27 |
| N aplicado fertilizantes | 0 | 180 | 240 | 300 |
| N total entradas (kg N ha⁻¹) | 246±16 | 456±29 | 577±82 | 648±75 |
| N extraído cultivo | 159±24 | 260±28 | 344±22 | 346±13 |
| NMIN postcosechs 2004 | 81±18 | 98±24 | 91±31 | 84±50 |
| N lixiviado | 6±0,6 | 14±6,8 | 26±10,8 | 30±10,5 |
| N total salidas (kg N ha⁻¹) | 246±7 | 372±36 | 460±35 | 460±46 |
| N no computado (kg N ha⁻¹) | | 84±57 | 117±50 | 189±121 |
| Rendimiento (Mg ms ha⁻¹) | 8,33±1,8 | 12,63±0,9 | 14,65±0,9 | 15,35±0,0 |
| Parámetros (kg N ha⁻¹) | | | | |
| N provisto | 246±16 | 456±29 | 577±82 | 648±75 |
| N disponible | 240±7 | 358±43 | 435±46 | 429±39 |
| N en planta | 159±24 | 260±28 | 344±22 | 346±13 |
| N en grano | 94±18,6 | 164±23,6 | 221±21,1 | 235±14,9 |
| Eficiencias | | | | |
| Efic. uso fertilizante (EUF) | | 0,56±0,16 | 0,77±0,14 | 0,62±0,04 |
| Efic. disponibilidad N provisto (ED Np) | 0,98±0,09 | 0,79±0,13 | 0,75±0,04 | 0,66±0,13 |
| Efic. uso N disponible (kg grano kg ⁻¹ N) | 40±6,2 | 40±2,5 | 39±2,0 | 41±4,0 |
| Efic. utilización del N (kg N Mg ⁻¹ grano) | 17±0,5 | 18±1,0 | 21±0,6 | 20±0,7 |
| Índice de Cosecha del N (ICN) | 0,66±0,03 | 0,71±0,04 | 0,72±0,02 | 0,76±0,02 |

con la dosis fertilizante aplicada (Fig. 4).

La EUF varió entre 0,36 y 0,77, no observándose una tendencia clara respecto de la dosis de N fertilizante aplicado (Tablas 2 a 6). El primer año los valores fueron ▶▶▶

►►► bajos debidos a los menores rendimientos atribuibles a un fuerte ataque de taladro (*Sesamia nonagrioides* L.), pero en los años siguientes los valores estuvieron generalmente por encima de 0,6. La eficiencia del uso del N mineral en el tratamiento sin fertilización nitrogenada fue ligeramente superior a 1, lo que indica que el maíz no fertilizado utilizó parte del N procedente de la mineralización y del N aportado por el agua de riego.

La eficiencia en la disponibilidad del N provisto (ED Nprov) para el tratamiento testigo fue próximo a 1 para los dos años analizados (Tablas 5 y 6) indicando que el tratamiento testigo es muy eficiente absorbiendo el N. En general, esta eficiencia disminuyó ligeramente al aumentar la dosis de N fertilizante aplicada, manteniéndose por encima de 0,7. Para la dosis óptima de 240 kg N ha⁻¹ establecida para los años 2003 y 2004 la ED Nprov fue de 0,8 y 0,75, respectivamente.

En cuanto a la eficiencia en el uso del N disponible (EU Ndisp), o rendimiento en grano obtenido por cada unidad de N retenida por el sistema suelo-planta, varió entre 26 y 41 kg grano kg⁻¹N siendo más alta en 2003 que en 2004 porque los rendimientos del año 2004 fueron más elevados.

El ICN expresa la proporción de N traslocado al grano frente al N absorbido por el maíz y se mantuvo estable los primeros tres años de duración del ensayo (0,54-0,67) siendo siempre más bajo para el tratamiento testigo, es decir, hay proporcionalmente menos N que se trasloca al grano cuando el maíz no se fertiliza. En el último año este índice aumentó considerablemente (0,66-0,76). Como se ha comentado anteriormente los rendimientos fueron muy altos este año, lo que pudo estar propiciado por una mayor traslocación del N hacia el grano.

3.2. Curvas de respuesta

* Ensayo de lisímetros

La Fig. 5 presenta el efecto del aumento de las dosis de nitrógeno aplicado mediante fertilizante mineral sobre la producción de grano en el ensayo de los lisímetros. Para cada año se realizó un ajuste, utilizando el modelo lineal-meseta (L-M) propuesto por Cerrato y Blackmer (1990) para obtener las funciones de respuesta al nitrógeno aplicado. Los R² ajustados oscilaron entre 0,80 y 0,99, lo que indica un ajuste bastante bueno del modelo a los datos disponibles, aunque tal como indican Cerrato y Blackmer (1990) la capacidad de dichos modelos para predecir la respuesta del cultivo de forma adecuada aumenta con el número de tratamientos disponibles. La elección del modelo L-M en lugar del modelo cuadrático fue debida a que este último tiende a sobreestimar el valor de nitrógeno umbral, especialmente cuando se dispone de pocas dosis de nitrógeno. El ajuste de los datos del ensayo en los lisímetros mediante el modelo cuadrático (gráfica no mostrada) proporcionó valores totalmente incorrectos al localizar el máximo técnico para dos de los cuatro años ensayados (2002: -916 kg N ha⁻¹; 2004: 1257 kg N ha⁻¹). Hay que señalar que los R² obtenidos son muy elevados (oscilaron entre 0,90 y ►►►



EXPOBIOENERGIA.08

16.17.18. OCTUBRE 2008.
VALLADOLID. ESPAÑA

12.000 VISITANTES PROFESIONALES

de Europa y América Latina
buscarán
soluciones tecnológicas.

RESERVE SU
STAND
FIN DE INSCRIPCIÓN
23 DE MAYO

www.expobioenergia.com
t. 0034 975 239 670

PATROCINA



COLABORA



ORGANIZA



SOCIO DE



MAÍZ 2008

►►► 0,99) para dicho modelo cuadrático, lo que ilustra riesgo de seleccionar un modelo en función exclusivamente de la bondad del ajuste.

Se observó una escasa variabilidad en el valor de Numbral (dosis de N para alcanzar la producción máxima) entre los distintos años, lo que posiblemente es debido a que los lisímetros se rellenaron con tierra del horizonte superficial, por lo que la cantidad de nitrógeno inicial en todo el perfil del suelo al comienzo del experimento (año 2001) fue alta. Como se ha indicado, las bajas producciones del año 2001 son atribuibles a un fuerte ataque de taladro en etapas tardías del cultivo, lo que afectó de forma importante a la producción de grano.

** Ensayo de dosis de N en riego por aspersión*

La Fig. 6 presenta el efecto del aumento de las dosis de nitrógeno aplicado sobre la producción de grano en el ensayo de la parcela de riego por aspersión para cada uno de los cuatro años que duró el ensayo. Se presenta en la Fig. 6A el ajuste mediante el modelo L-M y en la Fig. 6B el ajuste mediante el modelo cuadrático. Los valores umbral obtenidos a partir del modelo LM presentaron mayor variabilidad que en el ensayo de los lisímetros (Fig. 5), oscilando entre 136 kg N ha⁻¹ de 2004 hasta 253 kg N ha⁻¹ para el año 2001.

Estos valores son similares a los encontrados por De Juan *et al.* (2005) en las condiciones semiáridas de los regadíos de Castilla-La Mancha. Los valores umbral obtenidos a partir del modelo cuadrático (Fig. 6B) resultaron ser entre un 38 y un 69 % más elevados que los obtenidos a partir del modelo L-M. Se observa claramente el efecto de la no aplicación de fertilizante nitrogenado (tratamiento N0, 0 kg N ha⁻¹) durante cuatro años consecutivos, ya que el rendimiento de grano descendió de forma progresiva desde el año 2001 al 2004. Un aspecto importante a destacar es la ausencia de una correlación significativa ($P > 0,05$) entre el rendimiento máximo obtenido cada año y el valor umbral obtenido, lo que implica que para un mismo suelo los años de mayor rendimiento no requirieron las dosis más altas de fertilizante nitrogenado.

La media de la producción máxima de grano (2001 al 2004) estimada a partir del modelo LM en los lisímetros (15,9 Mg ha⁻¹, excluyendo el 2001 por el fuerte ataque de taladro) fue tan solo un 8% superior a la media de la producción media de grano en el ensayo con riego por aspersión (14,7 Mg ha⁻¹). Sin embargo, la media de los valores de N-umbral obtenidos en los lisímetros (modelo L-M) fue un 20% superior al de los ensayos con riego por aspersión. Estas mayores necesidades de fertilizante nitrogenado en el ensayo de los lisímetros para alcanzar el rendimiento máximo se pueden atribuir a unas mayores pérdidas de N por lixiviación en un sistema de riego por inundación frente al sistema de riego por aspersión.

La Figura 7 presenta la relación entre los valores de N umbral obtenidos (a partir del modelo L-M) y el contenido en nitrato en el suelo antes de la siembra (promedio de todas las parcelas). Se observa una relación lineal significativa

Figura 5. Funciones de respuesta del rendimiento en grano (Mg ha⁻¹ al 14% de humedad) a la dosis de N aplicado con el fertilizante en el ensayo de maíz en lisímetros (2001 al 2004). Se presenta el modelo de ajuste lineal-meseta, indicando para cada año el valor umbral obtenido (kg N aplicados para alcanzar el máximo de producción).

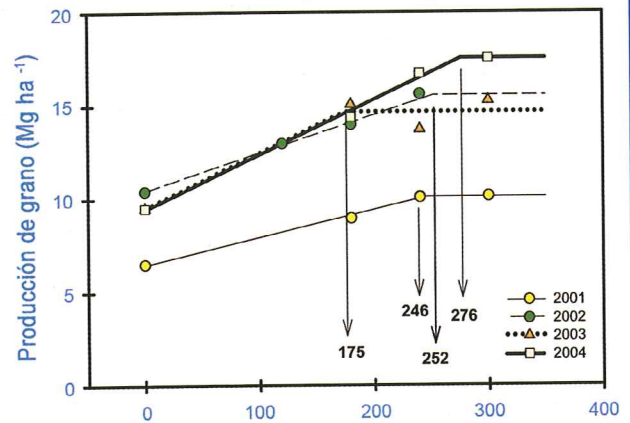
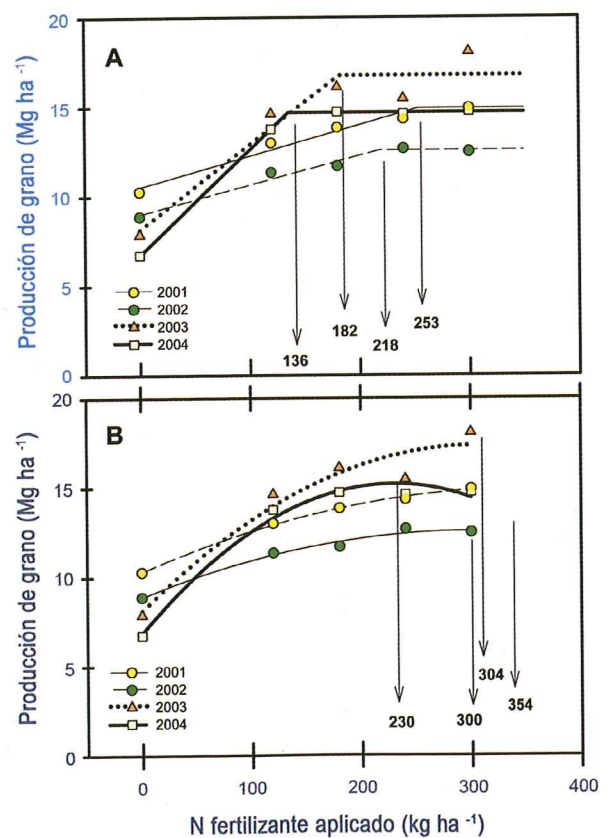


Figura 6. Funciones de respuesta del rendimiento en grano (Mg ha⁻¹ al 14% de humedad) a la dosis de N aplicado con el fertilizante en el ensayo de dosis de N en maíz con riego por aspersión (2001 al 2004). Se presentan los modelos de ajuste lineal-meseta (A) y cuadrático (B) a los datos de los cuatro años. Se indica el valor umbral obtenido (kg N aplicado para alcanzar el máximo de producción) para cada año y en ambos modelos.

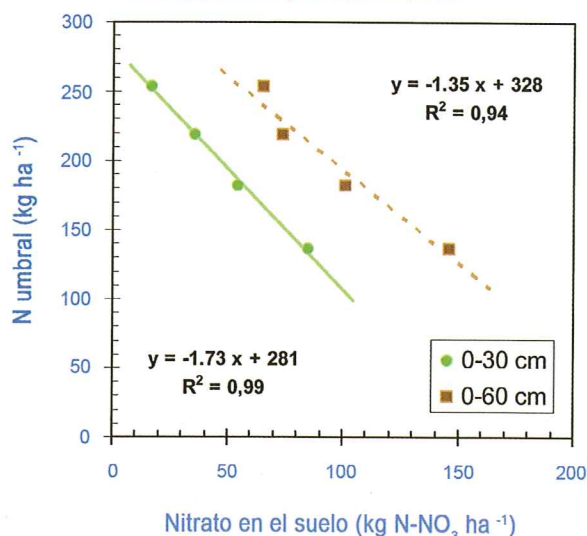


($P < 0,01$) indicando que cuando los contenidos de nitrato al inicio de la campaña son más bajos es preciso unas mayores aplicaciones de fertilizantes nitrogenados durante ►►►

►►► el ciclo del cultivo para alcanzar el rendimiento máximo. Se obtuvo una relación significativa tanto para el contenido de nitrato en la parte superficial del suelo (0-30 cm) como para una parte más importante del perfil (0-60 cm), lo que implica que puede ser suficiente con conocer la cantidad de nitrato en el horizonte más superficial. Dicha correlación indica la posibilidad de utilizar el contenido de nitrato antes de la siembra (o en etapas tempranas del cultivo del maíz) para ajustar la dosis de fertilizante nitrogenado, tal como propusieron Magdoff *et al.* (1984) en las condiciones del cinturón del maíz de EEUU. Dicha herramienta de ajuste ha recibido mucha atención en las condiciones de cultivo del medio oeste de EEUU, y está siendo utilizado por muchos agricultores, ya que disponen de valores muy ajustados (Blackmer *et al.*, 1989) del contenido de nitrato en el suelo a partir del cual no precisan realizar aportaciones de fertilizante o de cuanto deben aportar en función del contenido de nitrato del suelo.

A la vista de los resultados obtenidos parece interesante obtener para las distintas condiciones edáficas y de manejo (incluyendo el sistema de riego) en los regadíos del Valle Medio del Ebro la relación entre el contenido de nitrato en el suelo antes de la siembra (o bien antes de la aplicación de la cobertera) y la dosis óptima de fertilizante nitrogenado para llegar al máximo de producción. Esta es la base de los métodos de Nmin y del "pre-sidedress N test" ya amplia-

Figura 7. Relación entre el N umbral obtenido en el modelo de ajuste lineal-meseta y la cantidad total de nitrato en el suelo antes de la siembra en el ensayo de dosis de N en maíz con riego por aspersión (2001 al 2004). Se presenta la relación para el contenido de nitrato a dos profundidades.



mente utilizados para la fertilización nitrogenada en trigo y maíz en EEUU.

El importante efecto del nitrógeno disponible en el suelo, antes de la siembra, para estimar las necesidades de ►►►



INTERGAL
fertilizantes convencionales y específicos



INTERGAL fue fundada en 1980, en la actualidad cuenta con una plantilla de más de 30 personas, generando un volumen de negocio de más de 70 millones de €.

Su accionista CUF-ADUBOS DE PORTUGAL, a través de sus tres fábricas en Setubal, Alverca y Lavradio, produce Urea, Superfosfatos, Nitrogenados y Abonos Complejos, tanto Convencionales como Específicos, con una producción anual de 1 millón de toneladas.

Fertilización Equilibrada.
Garantía de Éxito.

C/ Capitán Haya 49, 11ºB 28020 MADRID
Teléfono: 91 571 88 35 Fax: 91 571 82 96
email: info@intergal.es

►►► nitrógeno del maíz queda corroborado también por la Fig. 8A en la que se presentan las funciones de respuesta del rendimiento de grano al Nmin en presiembra (0-30 cm) más el N aplicado con el fertilizante en los cuatro años del ensayo de aspersión.

Para los cuatro años, los ajustes al modelo L-M fueron razonablemente aceptables (R^2 oscilaron entre 0,55 y 0,76) y las estimas del error estándar de los valores de N umbral obtenidos bajos (oscilaron entre 29 y 62 kg ha⁻¹). Comparando los resultados de la Fig. 8A con los presentados en la Fig. 6A, se observa una menor diferencia entre los valores N umbral obtenidos entre los distintos años para una misma parcela de cultivo, lo que demuestra bastante estabilidad en las necesidades de nitrógeno en el maíz para unas mismas condiciones de manejo del cultivo (sistema de riego, tipo de suelo, etc.).

Las diferencias entre años podrían estar asociadas a diferencias interanuales en el nitrógeno mineralizable. De hecho, realizando el ajuste de los datos de rendimiento de grano en términos relativos (al máximo obtenido cada año, según el modelo L-M), es posible obtener un valor de Nmin provisto "óptimo" de 244 kg N ha⁻¹ que podría considerarse como una buena guía para la decisión de la dosis de fertilizante a aplicar siempre que se mantenga el tipo de suelo y las condiciones de cultivo. Obviamente, se hace preciso estimar de la forma más precisa posible el Nmin en la parte superior del perfil del suelo en presiembra (0-30 cm) para poder calcular la dosis óptima de fertilizante nitrogenado a aplicar.

4. CONCLUSIONES

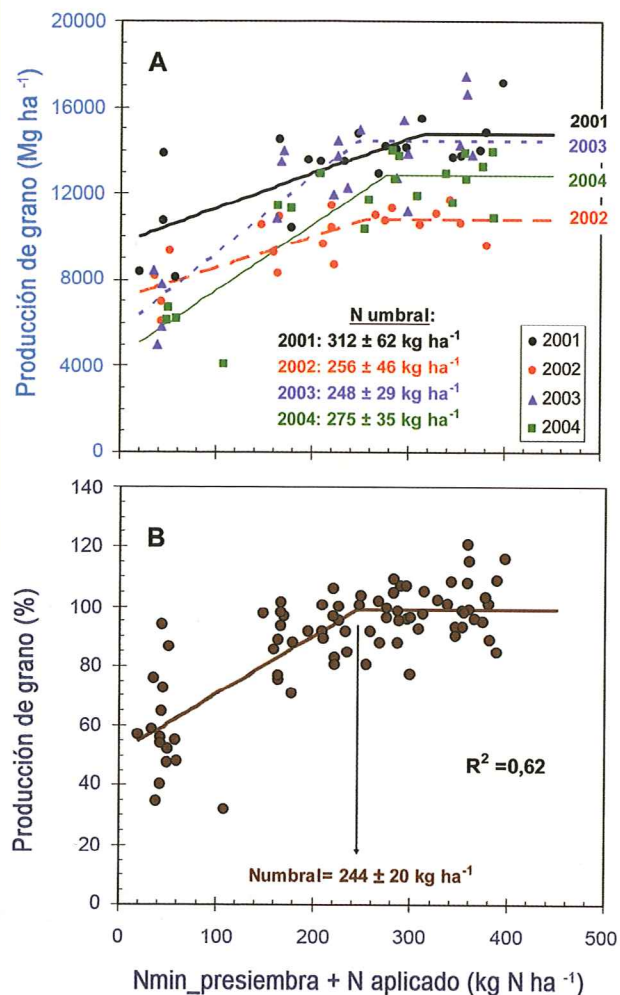
Se observó un aumento lineal de las extracciones de N por el cultivo conforme aumentó el rendimiento, así como un ligero aumento de las extracciones de N por kg de grano de maíz conforme aumentó la dosis de fertilizante aplicada. Asimismo, conforme aumentó la dosis de N fertilizante aplicada, aumentó el nitrógeno perdido por lavado. El N no computado en el balance fue siempre positivo, lo cual indica que existen salidas del sistema no computadas como pueden ser emisiones gaseosas o inmovilización de N en la materia orgánica del suelo. La eficiencia del uso del fertilizante varió entre 0,36 y 0,77, no observándose una tendencia clara respecto de la dosis de N fertilizante aplicado, lo que contrasta con la tendencia general observada en muchos trabajos de disminuir la eficiencia al aumentar la dosis de N.

Las dosis de N fertilizante que permiten alcanzar el rendimiento máximo de grano de maíz con sistemas de riego de media-alta eficiencia oscilaron entre 136 y 276 kg N ha⁻¹.

Para las condiciones de la parcela del ensayo de riego por aspersión se observó una aceptable estabilidad interanual del N mineral provisto (Nmin presiembra + N fertilizante) que permite alcanzar el rendimiento máximo en el maíz, obteniéndose un valor promedio de 244 kg N ha⁻¹, al considerar los datos de cuatro años de forma combinada.

El contenido de nitrato en el suelo en el horizonte su-

Figura 8. Relación entre el N mineral en presiembra (0-30 cm) más el N aplicado en el ensayo de dosis de N en maíz con riego por aspersión (2001 al 2004) y: (A) la producción de grano (Mg ha⁻¹ al 14% de humedad) y (B) la producción de grano relativa (%), agrupando los datos de los 4 años. Se presentan los modelos de ajuste lineal-meseta y los valores de N umbral obtenidos en cada caso.



perficial antes de la siembra del cultivo se mostró como una herramienta muy precisa para guiar la fertilización nitrogenada de maíz en condiciones de regadío aunque es preciso conocer la relación N-suelo / N-umbral para las distintas condiciones edáficas y de sistema de riego.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de forma especial a J.Gaudo, M. Guillén, M. Izquierdo, J.L. Jiménez, T. Molina, y Lola Naval por su estimable trabajo tanto en campo como en el laboratorio.

6. REFERENCIAS

Dada la extensión de las referencias incluidas por los autores se omite su publicación con este reportaje, pero quién esté interesado en recibirlas puede solicitarlas a través del correo electrónico redaccion@tierras-digital.com