

RESPUESTA DE MAÍZ A FERTILIZACIONES DEFINIDAS CON DIFERENTES CRITERIOS DE RECOMENDACIÓN

Perdomo, C.¹; Cardellino, G.²

Recibido: 22/09/05 Aceptado: 26/04/06

RESUMEN

La fertilización de maíz en Uruguay se decide parcialmente en base a datos de análisis de suelo, pero la interpretación de esta información con los diferentes criterios existentes pueden producir una amplia gama de recomendaciones de nutrientes y dosis. La comparación y validación de estos criterios sólo puede efectuarse mediante experimentación de campo en condiciones diversas de suelo, manejo y clima. Durante tres zafras, comprendidas entre los años 1999 y 2002, se instalaron 12 ensayos de fertilización en sitios comerciales de maíz ubicados en el litoral oeste del país. Los tratamientos consistieron en cuatro recomendaciones de fertilización, dos generadas en Uruguay (URU1 y URU2) y dos en Estados Unidos de América (USA1 y USA2). Se incluyó, además, un tratamiento testigo sin fertilizar. En promedio existió una clara respuesta a la fertilización, aunque las diferencias de rendimiento entre los tratamientos fertilizados fueron bajas (menores a 500 kg ha⁻¹). De todas maneras, los tratamientos "USA" rindieron significativamente más que los "URU". En promedio los mayores retornos netos por fertilización se obtuvieron con USA2 (182 U\$ ha⁻¹) y URU1 (160 U\$ ha⁻¹), los tratamientos que recomendaron agregar menos nutrientes y menores dosis. El menor resultado económico fue producido por USA1, el tratamiento que recomendó fertilizar con más nutrientes y mayores dosis (104 U\$ ha⁻¹). Este resultado sugiere que en las condiciones de producción de Uruguay las recomendaciones más conservadoras podrían producir los mejores resultados económicos.

PALABRAS CLAVE: niveles críticos, mantenimiento, relaciones de saturación de cationes, balance de N, análisis de suelo.

SUMMARY

CORN RESPONSE TO FERTILIZATIONS BASED ON DIFFERENT SOIL TESTING PHILOSOPHIES

Corn fertilization in Uruguay is generally based on soil testing, but the existence of various soil testing philosophies could produce a wide range of recommendations of nutrient and rates. The appropriateness of these different approaches can only be assessed by field research covering different soil types and weather conditions. During three crop cycles, comprising from 1999 to 2002, 12 fertilization experiments were established inside commercial corn fields located in the southwest of the country. The treatments consisted of four recommendations of fertilization, two of them originated in Uruguay (URU1 and URU2) and the other two in United States of America (USA1 and USA2). A control treatment without fertilization was also included. The results revealed that in average there was a clear yield response to fertilization. The mean differences among the fertilized treatments, however, were minor (less than 500 kg ha⁻¹), although the "USA" treatments produced a higher mean yield than the "URU" recommendations. The two highest mean net returns to fertilization were obtained with USA2 (182 U\$ ha⁻¹) and URU1 (160 U\$ ha⁻¹), the treatments which recommended fertilizing with fewer nutrients and lower rates. On the contrary, the treatment USA1, that recommended fertilizing with more nutrients and higher rates, produced the lowest net return to fertilization (104 U\$ ha⁻¹). These results suggest that in Uruguayan conditions the most conservative recommendations would tend to produce the best economic results.

KEY WORDS: sufficiency levels, basic cation saturation ratio, N balance, maintenance concept, soil testing.

¹Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Garzón 780, Montevideo, Uruguay, CP12900. Correo electrónico: chperdom@fagro.ed.uy.

²Ing. Agr., Consultor Privado.

INTRODUCCIÓN

La fertilización constituye una parte importante del costo total del cultivo de maíz, por lo que en una primera instancia podría pensarse que las decisiones sobre agregado de nutrientes deberían basarse principalmente en criterios de rentabilidad. La teoría económica indica que en situaciones de capital no limitante la dosis óptima de un nutriente se determina igualando los ingresos marginales a los costos marginales de fertilización (Black, 1993). En la práctica, sin embargo, este concepto no resulta muy útil, ya que tanto la función de producción del cultivo como los precios del producto recién se conocen en el momento de la cosecha. Por consiguiente, las recomendaciones de fertilización no se basan principalmente en criterios económicos, sino que se deciden en base a la disponibilidad de nutrientes en el suelo y a la estimación de rendimiento del cultivo.

La recomendación de nutrientes en base al análisis de suelo no es, sin embargo, una ciencia exacta, y en el ambiente académico existen varias filosofías o criterios de fertilización. Una de ellas, conocida como “relación de saturación de cationes” está fundamentada en el concepto de Bear *et al.* (1945) de que la distribución óptima de los cationes intercambiables calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) e hidrógeno (H) en un suelo ideal debería ser de 65:10:5:20, respectivamente. Estudios más recientes, sin embargo, han demostrado que no existe una relación clara entre los niveles de rendimiento de un cultivo y estas relaciones. Estos trabajos han confirmado además que la ocurrencia de grandes cambios en estas relaciones no se asocia con cambios significativos de rendimiento (Olson *et al.*; 1982; Black, 1993). Pese a que este concepto nunca fue adoptado por los laboratorios de Universidades de Estados Unidos de América (EE.UU.) para realizar recomendaciones, muchos laboratorios privados de ese país todavía lo siguen utilizando (Black, 1993).

Otra criterio de recomendación, conocido como de “subir y mantener”, sostiene que el objetivo de la fertilización es mantener un nivel óptimo de nutrientes en el suelo, y que luego de llegar a ese valor óptimo, la dosis de fertilización se debería estimar de la cantidad de nutriente extraída por el cultivo (Olson *et al.*, 1982). Por lo tanto, se asume que no existen otras vías de pérdidas de nutriente que aquellas causadas por la absorción del cultivo, y que los mecanismos de retención ó fijación de los nutrientes en el suelo están relativamente saturados. Esta metodología, también denominada de “fertilización del suelo”, es utilizada por ejemplo por laboratorios privados y algunas Universidades de EE.UU.

El concepto de mantenimiento se adapta mejor para los nutrientes inmóviles, como fósforo (P) y potasio (K). En el caso del nitrógeno (N) este concepto no es útil, ya que las dosis “de mantenimiento” de N posiblemente no lograrían mantener constante el nivel de N orgánico del suelo pero incrementarían el riesgo de pérdidas. Por consiguiente, el ajuste de la fertilización nitrogenada normalmente se basa en otras metodologías, como la del “balance”, que estima la dosis de N a agregar como la diferencia entre la demanda de N del cultivo y la oferta que realiza el suelo (Standford, 1973). El aporte de N del suelo ha sido estimado de varias maneras, que van desde el otorgamiento de créditos subjetivos según información de cultivo anterior, tipo de suelo, fertilización previa, etc. hasta la cuantificación del N mineral inicial presente en la siembra y del producido por mineralización durante el crecimiento del cultivo (Black, 1993).

Un problema adicional de esta metodología es que para estimar la demanda de N es necesario estimar el rendimiento del cultivo en forma previa ó inmediatamente a la siembra del mismo. Esta estimación constituye frecuentemente una importante fuente de error en las recomendaciones de fertilización, debido tanto a la variación natural del rendimiento entre años como a la tendencia de los usuarios a su sobreestimación. Además, la información experimental ha evidenciado que no existe relación clara entre el nivel de rendimiento de maíz y la dosis óptima de N. Es por esto que actualmente algunas Universidades de EE.UU. han dejado de utilizar esta variable para realizar recomendaciones de N, y utilizan exclusivamente la información de suelo (Blackmer *et al.*, 1997; Mallarino, com. pers.).

El cuarto criterio, denominado “nivel crítico” ó de “suficiencia,” está respaldado por una profusa investigación que indica que la respuesta de un cultivo al agregado de un nutriente cesa o tiende a decrecer luego de que se sobrepasa cierta concentración de una forma de este nutriente en el suelo (Olson *et al.*, 1982). Este concepto, que se lo conoce también como de “fertilización del cultivo” (Black, 1993), es usado por muchos laboratorios de Universidades de EE.UU. (Olson *et al.*, 1982).

En la actualidad, las recomendaciones de fertilización de muchas Universidades y laboratorios comerciales se basan en combinaciones variadas de los conceptos anteriores. Además, las incertidumbres asociadas al clima, a las pérdidas económicas por subfertilización, y a las variaciones en el precio del producto determinan nuevas diferencias de interpretación. A todo esto se suma las preocupaciones por la posible contaminación ambiental por excesiva fertilización, que incrementan aun más la posibilidad de variaciones de estas recomendaciones.

En Uruguay, existe información sobre niveles críticos de N, P y K que permite formular recomendaciones primarias de fertilización para estos nutrientes utilizando el concepto de “nivel de suficiencia”. Para N se ha encontrado que existe relación entre la concentración de nitrato (NO_3^-) en el suelo (0-20-cm) en el estadio de seis hojas (V6) (Perdomo *et al.*, 1998) y respuesta al agregado de N. Esta información coincide parcialmente con resultados de investigación de E.E.UU. (Blackmer *et al.*, 1989; Fox *et al.*, 1989; Meisinger *et al.*, 1992; Klausner *et al.*, 1993) y Argentina (Melchiori *et al.*, 1996; García *et al.*, 1997; Ferrarri *et al.*, 2000; Sainz Rozas *et al.*, 2000). También se ha propuesto, aunque no validado, una guía de fertilización de N basado en el nivel de NO_3^- a V6 y en información de cultivo anterior, tipo de suelo y método de siembra (Perdomo, 2000). Existe además información de Argentina sobre el nivel crítico de P (Bray I) a la siembra para maíz, y recomendaciones de fertilización asociadas (Echeverría y García, 1998; Ferrarri *et al.*, 2000; Berardo *et al.*, 2001).

Los niveles críticos de K utilizados en Uruguay han sido adaptados de los vigentes en EE.UU. (Cope & Rouse, 1973; Mallarino & Blackmer, 1994). Como la mayoría de los suelos de Uruguay tienen concentraciones de K por encima de estos niveles, generalmente no se considera necesaria la fertilización potásica. Esta interpretación está respaldada por los resultados de algunos ensayos que muestran la no existencia de respuesta a este nutriente (Zamalvide & Hernandez, com. pers.). Esta interpretación, sin embargo, no concuerda con los resultados de un relevamiento de cultivos comerciales de maíz realizado en el país (Morón & Baetghen, 1996). Este estudio revela que la concentración de K en hoja fue en muchos sitios inferior al nivel considerado crítico en otros países, por lo que sería necesario fertilizar frecuentemente con K el maíz en Uruguay.

El laboratorio de la Estación Experimental “La Estanzuela” del INIA de Uruguay (Lab.-EELA INIA) incluye análisis de micronutrientes en suelo, utilizando una metodología analítica y de recomendación similar a la empleada en el Estado de San Pablo, Brasil (Galvão, 2002). Existen sin embargo dudas sobre la validez de estos valores críticos en Uruguay, debido a las diferencias de suelo entre ambas regiones.

En Uruguay, las recomendaciones de fertilización de cultivos comerciales son efectuadas por numerosos agentes, entre ellos por los propios productores, por agrónomos privados, de cooperativas y de servicios de extensión, que interpretan de forma variada la información producida por los centros de investigación del país y del exterior. Por otra parte, los laboratorios comerciales de países desarrollados también ofrecen, junto con el servicio de análisis de suelo, recomendaciones de fertilización. Estos

laboratorios generalmente recomiendan dosis altas para muchos nutrientes, lo que contrasta marcadamente con los resultados de la investigación local e internacional. Algunos productores prefieren seguir estas recomendaciones porque perciben que de este modo “aseguran” un alto rendimiento.

Esta variabilidad de opiniones no implica que todas ellas sean igualmente válidas, ni que las consecuencias económicas y ambientales que surgen de estas recomendaciones sean irrelevantes. Al contrario, existe amplia evidencia experimental sobre las consecuencias negativas, económicas y/o ambientales, de decisiones de fertilización incorrectas. No es posible, sin embargo, identificar la mejor opción solamente en base al debate de opiniones, sino que esta selección debe hacerse en base a información experimental que demuestre los resultados productivos y económicos de diferentes criterios. El objetivo de este trabajo fue comparar distintas recomendaciones de fertilización de maíz existentes en forma explícita o implícita en el país, utilizando como variables principales de comparación el rendimiento de grano y el retorno neto por fertilización. Para incrementar la representatividad de estos resultados, todas las evaluaciones se realizaron dentro de cultivos comerciales de maíz, manejados con una adecuada tecnología de producción

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante las Zafra I (1999-2000), II (2000-2001), y III (2001-2002), se instalaron 12 ensayos de fertilización (cuatro por año) en establecimientos de producción comercial de maíz ubicados en el litoral oeste del país. El término sitio se emplea en adelante para referirse a la combinación de lugar y zafra de cada ensayo. En el Cuadro 1 se presenta información por sitio acerca de la fecha de siembra y cosecha, población de plantas, manejo anterior y textura del suelo.

Previo a la siembra, se recolectaron de cada sitio muestras compuestas de suelo de la profundidad de 0-20 cm, enviándose una submuestra al Lab.-EELA para su análisis químico. Otra submuestra fue enviada a un laboratorio comercial de EE.UU. con representantes en el país. Una tercer submuestra fue enviada al laboratorio de Fertilidad de Suelos de la Facultad de Agronomía (Lab. FSFA), pero solo para el análisis de NO_3^- . En el estadio de seis hojas (V6) se recolectaron de la profundidad de 0-20 cm, muestras de suelo por tratamiento para análisis de NO_3^- , las que también fueron enviadas a este último laboratorio. En todos los casos las muestras estaban identificadas con el nombre del productor, y no se explicitó que las mismas eran parte de un experimento.

Cuadro 1. Información sobre fechas de siembra y cosecha, población de plantas, manejo anterior, y textura del suelo de los distintos sitios.

Zafra	Sitio	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Población (miles de plantas ha ⁻¹)	Cultivo y laboreo previo†	Textura del suelo‡
I	1-I	13/10/00	19/04/01	SD§	SSD	FAr
	2-I	30/09/00	03/04/01	SD	MLab	FAC
	3-I	06/11/00	10/04/01	SD	MLab	FL
	4-I	15/11/00	28/04/01	SD	MLab	FL
II	1-II	25/10/01	30/04/02	75	MLab	FACAr
	2-II	02/11/01	09/04/02	65	SSD	FAC
	3-II	11/12/01	15/07/02	60	MLab	FL
	4-II	05/01/02	09/09/02	55	MLab	FL
III	1-III	30/09/02	15/03/03	60	MLab	FAr
	2-III	28/09/02	15/04/03	65	SSD	FAC
	3-III	17/10/02	09/04/03	60	MLab	FL
	4-III	10/12/02	06/08/03	50	MLab	FL

† SSD = Soja en siembra directa, MLab = maíz con laboreo.

‡ FAr = Franco arenoso, FAC = Franco arcilloso, FrL = Franco limoso, FrAcAr = Franco arcillo arenoso.

§ SD = sin datos.

Los métodos analíticos utilizados por el Lab.-EELA fueron los usuales. La materia orgánica fue determinada por Walkley-Black (Walkley & Black, 1934) y Plábil por Bray-1 (Bray y Kurtz, 1945). Las bases intercambiables fueron extraídas con acetato de amonio bufereado a pH 7 (Thomas, 1982) y determinado por fotometría de llama (K) o espectrometría de absorción atómica (Ca, Mg y Na). El sulfato (SO₄²⁻) fue extraído con fosfato monocalcico y determinado por turbidimetría (Schulte & Eik, 1988). El Mg, el hierro (Fe) y el zinc (Zn) fueron extraídos con DTPA (Galvão, 2002) y determinados por absorción atómica. El boro (B) fue extraído con agua caliente y determinado por colorimetría usando azomethina-H (Johnson & Fixen, 1990). En el Lab. FSFA, el NO₃⁻ fue analizado por colorimetría previa reducción a NO₂⁻, haciendo percolar el extracto filtrado de suelo por una columna de Cd (Mulvaney, 1996).

Descripción de los tratamientos de fertilización

Los resultados analíticos de las muestras de suelo (Cuadro 2) fueron utilizados para realizar diferentes recomendaciones de fertilización (RDF) con N, P, K, S y micronutrientes. Dos de estas RDF estaban basadas en información de origen local, por lo que fueron denominados URU1 y URU2. Los otros dos estaban basadas en información de EE.UU, y fueron denominadas USA1 y

USA2. Estas cuatro RDF generaban por consiguiente cuatro tratamientos. Se incluyó además un tratamiento testigo, el cual no se fertilizó.

El tratamiento URU1 corresponde a la RDF realizadas por los autores de este trabajo. Esta RDF está basado en el concepto del "nivel de suficiencia" y solamente realiza recomendaciones para N, P y K en base a indicadores de suelo, sin corregir por potencial de rendimiento del cultivo. El ajuste de N se hace en función de características del sitio y del contenido de NO₃⁻ a V6 (Perdomo, 2000). La recomendación de P se basa en una modificación de la calibración el método de Bray-1 realizada en Argentina por Echeverría y García (1998), en la cual se considera un nivel crítico de 15 mg kg⁻¹ de P. El ajuste de la fertilización con K se decide en base a una calibración no publicada (Zamalde & Hernández, com. pers.) de K intercambiable del suelo, cuyo nivel crítico es de 0,30 meq. 100 g⁻¹ para texturas de suelo más finas que franco arenoso y de 0,25 para texturas iguales o más gruesas. Esta RDF tiene el objetivo de recomendar dosis cercanas pero inferiores a las asociadas al rendimiento máximo, evitando desventajas y problemas de contaminación ambiental por sobrefertilización.

El tratamiento URU2 es similar a URU1 pero incluye además recomendaciones de micronutrientes (Mg, Zn, Fe) de acuerdo a la recomendación para el estado de San Pablo (Brasil) de Galvão (2002). Además, el nivel crítico de K

Cuadro 2. Concentraciones de bases, S, micronutrientes, materia orgánica, P y valores de pH en muestras de suelo tomadas pre-siembra; y concentraciones de N en forma de nitrato (N-NO₃⁻) a la siembra (S) y a V6 en los tratamientos testigo (TEST), URU1 y URU2 en los sitios experimentales.

Zafra	Sitio	Ca	Mg	K	MOS†	pH H ₂ O	S	Zn	Fe	Mn	B	P Bray1	N-NO ₃ ⁻			
													S-Test	V6-Test	V6-URU1	V6-URU2
I	1-I	9,66	1,59	0,21	2,2	5,5	7,5	2,1	119,6	19,4	0,41	18	11	13	27	24
	2-I	35,81	3,10	1,05	5,2	6,7	6,0	1,2	66,8	11,1	0,93	8	5	12	13	14
	3-I	9,10	2,38	0,61	3,9	5,9	3,2	3,2	278,5	34,5	0,72	9	9	SD‡	11	13
	4-I	9,20	2,43	0,38	2,8	6,2	4,1	2,7	172,7	24,8	0,91	11	7	SD	11	9
II	1-II	17,51	2,30	0,48	4,7	6,2	7,4	0,8	115,6	19,4	2,83	17	7	4	6	4
	2-II	19,93	2,81	0,84	6,8	5,8	12,2	1,2	85,5	11,1	2,93	7	17	8	10	9
	3-II	12,83	2,54	0,40	4,5	6,1	5,2	3,0	167,7	34,5	0,52	5	9	5	7	7
	4-II	9,35	2,38	0,19	2,3	6,0	15,9	2,3	180,7	24,8	0,90	19	4	4	6	6
III	1-III	8,01	2,03	0,42	2,5	5,9	6,1	1,9	241,1	44,5	0,51	3	25	18	23	24
	2-III	28,22	2,32	1,08	5,5	7,1	8,2	2,1	55,9	23,4	0,56	6	31	15	18	19
	3-III	13,81	2,53	0,73	3,6	6,1	11,5	3,0	167,7	34,5	0,52	7	21	15	19	22
	4-III	12,32	2,43	0,29	2,5	6,0	14,2	2,3	180,7	34,8	1,92	9	28	12	18	19

† MOS = materia orgánica del suelo.

SD=Sin datos.

‡ SD = sin datos.

en el suelo de URU2 es superior al de URU1 (0,50 versus 0,25 meq. 100 g⁻¹), tal como parecen sugerir los resultados del relevamiento de Morón & Baetghen (1996).

El tratamiento USA1 se refiere a las RDF que realiza un laboratorio privado de EE.UU. con presencia en el país, en base a un criterio no explicitado, pero basado probablemente en el concepto de “mantenimiento”. El tratamiento USA2 es el sistema de recomendación de la Universidad de Minnesota (Rhem *et al.*, 2001). Esta RDF combina para P y K los conceptos de “nivel de suficiencia” con los de “subir y mantener” y para N utiliza el de “balance”. Los dos tratamientos “USA” requieren de la especificación de un rendimiento meta, que en este experimento se definió en 12000 kg ha⁻¹.

La recomendación de N de los tratamientos “USA” se basó solamente en información analítica de siembra, mientras que en caso de los “URU” la misma se definió con los datos de V6, aunque a la siembra se aplicó una dosis starter menor o igual a 30 kg ha⁻¹. En el caso de los tratamientos “USA” un tercio de la dosis total de N se aplicó a la siembra, y el resto a V6. La razón de este fraccionamiento fue para evitar pérdidas de N en momentos de poca demanda por el cultivo.

Las RDF de los tratamientos URU1, URU2 y USA2 fueron realizadas por los autores de este trabajo utilizando las pautas respectivas. La RDF de USA1, en cambio, fue realizada directamente por un laboratorio comercial internacional, a partir de las muestras de suelo enviadas al mismo. Este hecho crea una diferencia de metodología con otros trabajos similares, como los de Olson *et al.* (1982) en EE.UU. y de Ewanek en Canadá (citado por Black, 1993), ya que en estos casos la mayoría de las recomendaciones habían sido realizadas por laboratorios privados.

Siembra, fertilización y cosecha

Las tareas de siembra, fertilización y cosecha se realizaron con maquinaria comercial rentada a distintos productores. A la siembra el fertilizante fue incorporado al suelo al costado y debajo de la hilera de semillas, excepto cuando se fertilizó con altas dosis de K. En este caso, el fertilizante fue aplicado presiembra al voleo en toda el área y enterrado con disquera. Los micronutrientes también se aplicaron presiembra mediante aspersión al suelo, previa disolución de los productos que los contenían en agua. En la Zafra 3 no se aplicaron micronutrientes. En V6 el N se aplicó al voleo sin incorporar. Se utilizaron parcelas experimentales de un área muy superior a la de los ensayos tradicionales. El área fertilizada de cada tratamiento fue de 24 filas de ancho (ó 5,6 m) por 200 m de largo, aunque existieron variaciones menores en algunos sitios. El área de cosecha fue de 12 filas por 100 m de largo. El grano cosechado de cada parcela fue depositado en un contenedor de peso conocido, estimándose el rendimiento como la diferencia de peso entre el contenedor con y sin grano, y ajustándose el mismo a 14,5 % de humedad.

Estimación de índices de resultado económico

Los precios de fertilizantes utilizados en los cálculos económicos de fertilización fueron los vigentes en fechas cercanas al momento de fertilización (Cuadro 3). Los precios de los productos químicos usados para aplicar micronutrientes fueron los vigentes en droguerías industriales, la única fuente de los mismos en el país. Debido a que estos precios eran demasiado elevados, no fueron considerados para calcular el costo de la fertilización. El precio del maíz fue cercano al vigente en cada zafra, 100 U\$ Mg⁻¹ para la Zafra I y 90 U\$ Mg⁻¹ para las Zafras II y III.

Cuadro 3. Precios de los fertilizantes utilizados en cada zafra para realizar los cálculos económicos.

Fertilizante	Concentraciones de N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-S % ———	Zafra		
		I	II	III
		— Dólares americanos (U\$D) kg ⁻¹ —		
Fosfato Diamónico	18-46-0-0	0.29	0.29	0.37
Superfosfato Común	0-23-0-14	0.13	0.12	0.18
Superfosfato Triple	0-46-0-0	0.24	NA†	NA
Cloruro de Potasio	0-0-60-0	0.24	0.24	0.31
Urea	46-0-0-0	0.25	0.22	0.35

† NA = no aplicado en esa zafra.

El incremento de rendimiento por fertilización se estimó de la diferencia entre el rendimiento de cada tratamiento del testigo, mientras que el ingreso neto por fertilización se obtuvo multiplicando el incremento de rendimiento por el precio del maíz. El costo de las dosis de fertilizante se estimó multiplicando el precio por la dosis; y el costo total de fertilización se obtuvo sumando los costos de todos los fertilizantes aplicados dentro de una combinación de sitio y tratamiento. Finalmente, el retorno neto por fertilización (RNPF) se computó de la diferencia entre el ingreso neto por fertilización y el costo total de la misma. El uso de este índice económico para comparar tratamientos se justifica debido a que la obtención de un mayor rendimiento por fertilización no siempre asegura un mejor resultado económico, ya que el incremento del valor del cultivo obtenido podría ser inferior a los gastos incurridos para lograrlo. El RNPF considera estas variables, tomando un valor positivo cuando el incremento del valor del cultivo por fertilización supera al costo de la misma, y siendo negativo en el caso inverso (Mallarino & Blackmer, 1992).

Análisis estadístico

El rendimiento y el RNPF fueron analizados por Anova usando un diseño de bloques completos al azar, en el cual cada sitio fue considerado como bloque, y cada tratamiento de fertilización y el testigo (para el rendimiento) fueron asignados como tratamientos. El efecto de la zafra no fue considerada en este análisis. La suma de cuadrados de los tratamientos fue particionada en comparaciones de contrastes ortogonales, y además se realizó un contraste no ortogonal entre URU1 y USA2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos analíticos

Los mayores valores de Ca, Mg y K intercambiables correspondieron a sitios ubicados en zonas adyacentes y que pertenecían al mismo productor, identificados todos con el número 2 (2-I, 2-II y 2-III), (Cuadro 2). Los valores de K intercambiable estuvieron en la mayoría de los sitios por encima del nivel crítico del tratamiento URU1, excepto en los sitios 1-I y 4-II (Cuadro 2). Las mayores concentraciones de materia orgánica del suelo también correspondieron a los sitios identificados con el número 2, lo que podría estar relacionado no solo a una mayor fertilidad natural de estos suelos sino también al hecho de que los mismos habían permanecido durante muchos años en siembra directa.

Los sitios 1-I y 1-II y el Sitio 4-II (Cuadro 2) presentaron los valores más elevados de P lábil. Al igual que en los

sitios "2", estos sitios pertenecían a un mismo productor y se localizaban relativamente cercanos entre sí. Los altos valores de P son probablemente consecuencia de la historia de fertilización, pero también de la textura más arenosa y de los menores tenores de materia orgánica de estos sitios, que determinaron un menor poder de fijación del P agregado. Los valores de pH de todos los sitios estuvieron dentro de los rangos considerados normales, y no fueron limitantes para el cultivo de maíz.

En las dos primeras zafras, la concentración de NO_3^- del suelo a la siembra fue media a baja en casi todos los sitios, excepto por el Sitio 2-II, en donde fue mayor aunque no elevada (Cuadro 2). En la última zafra, en cambio, estos valores fueron altos en los cuatro sitios, pese a que la fecha de siembra de los mismos varió desde fines de setiembre hasta mediados de diciembre (Cuadro 1). Estas diferencias entre zafras no son totalmente explicables por diferencias de lluvia (Cuadro 4, ya que la distribución de precipitaciones en los meses de setiembre a noviembre de la segunda y tercer zafra fue similar, y contrariamente a lo esperado, llovió más en diciembre del 2002.

La concentración de NO_3^- del suelo en el tratamiento testigo se incrementó de la siembra a V6 en forma clara solo en el Sitio 2-I, aunque en esta zafra sólo hubo dos sitios con esta información (Cuadro 2). Este incremento coincidió con un período de siembra a V6 húmedo, pero sin excesos hídricos, y con lluvias cercanas a la media histórica (Cuadros 1 y 4). En el sitio 1-I, en cambio, este valor permaneció relativamente constante. En contraste con esto, en las otras dos zafras la concentración de NO_3^- del suelo en el tratamiento testigo disminuyó de la siembra a V6 en todos los sitios (Cuadro 2). Esto coincidió con la ocurrencia de lluvias por encima del promedio histórico en los meses correspondientes, lo que podría haber favorecido la ocurrencia de pérdidas de NO_3^- por lixiviación y desnitrificación. Estos descensos fueron mayores en los sitios con concentraciones elevadas de NO_3^- a la siembra y determinaron que a V6 las diferencias entre sitios disminuyeran.

A pesar de este descenso, la concentración de NO_3^- del suelo a V6 en el tratamiento testigo varió entre zafras, observándose los menores valores en los sitios de la Zafra II y los mayores en los de la Zafra III, aun cuando el volumen de lluvias fue similar en estas dos últimas zafras (Cuadro 2). Esto se explica, en parte, por la ya comentada diferencia en los valores iniciales de siembra de estas dos zafras. Además, en el caso particular del Sitio 1-II el rastrojo se incorporó inmediatamente antes de la siembra de maíz, lo que favoreció la ocurrencia de inmovilización de N.

En el Sitio 1-I y en todos los sitios de la Zafra III, los valores de concentración de NO_3^- del suelo a V6 fueron mayores en las tratamientos fertilizadas que en el testigo, evidenciando que existió residualidad del N aplicado a la siembra (Cuadro 2). En la Zafra II, en cambio, no se observó residualidad en ningún sitio, lo que podría explicarse por pérdidas de NO_3^- durante el período siembra-V6 debido a las intensas lluvias ocurridas (Cuadro 4). Sin embargo, esta misma explicación no resulta válida para la Zafra III, en la que las lluvias también estuvieron por encima del promedio histórico.

Los valores de concentración en el suelo de Zn, Mn y B estuvieron dentro de los rangos reportados para EE.UU (Martens & Lindsay; 1990; Jonson & Fixen, 1990), pero los valores de Fe fueron muy altos en los tres años, lo que probablemente se deba a algún tipo de contaminación (Cuadro 2).

Dosis de nutrientes recomendadas

Existieron importantes diferencias de recomendación entre tratamientos dentro de un sitio, entre sitios de una misma zafra, así como entre zafras (Cuadro 5). Las diferencias existentes entre los tratamientos URU1, URU2 y USA2 dentro de una combinación de sitio-zafra se debieron exclusivamente a las diferencias intrínsecas entre ellos, ya que los datos analíticos no variaron. En USA1, en cambio, los análisis de suelo lo realizó el mismo laboratorio. Sin embargo, la diferencia de resultados analíticos entre laboratorios no fue importante, por lo que este factor no habría contribuido significativamente a las diferencias de reco-

mendación entre USA1 y los demás tratamientos (datos no mostrados).

Las dosis promedio de los 12 sitios recomendadas por los distintos tratamientos fueron diferentes (Cuadro 6). De acuerdo a lo esperado, los tratamientos URU1 y URU2 fueron similares en sus recomendaciones de N y P, pero difirieron en K y S (Cuadro 6). El tratamiento USA2 recomendó dosis levemente inferiores de P, intermedias de K, y superiores de N que URU1 y URU2. Debido a que USA2 no recomendó fertilizar con S, este tratamiento fue más similar a URU1 que a URU2. El tratamiento USA1 recomendó las dosis mayores de todos los nutrientes, por lo que de acuerdo a la terminología de Olson *et al.* (1982) sería el menos “conservador” de todos.

Dosis de fertilizantes aplicados

El Cuadro 7 presenta la opción de combinaciones y dosis de fertilizantes aplicadas en cada zafra, sitio y tratamiento para lograr las recomendaciones de N, P y K del cuadro anterior. Los productos usados para lograr las dosis de B, Mg y Zn fueron H_3BO_3 , MgSO_4 , y ZnSO_4 . Los dos últimos productos agregaron también S, y este aporte fue considerado para computar el aporte total cuando el mismo fue significativo. Las dosis de fertilizantes aplicadas fueron obviamente proporcionales a las dosis de nutrientes recomendados por los diferentes tratamientos.

Rendimientos y respuesta a la fertilización

Los incrementos de rendimiento por el agregado de fertilizante, obtenidos para el promedio de todos los tratamientos y para las tres zafras, fueron importantes y

Cuadro 4. Promedios mensuales de lluvia correspondientes a la Estación Meteorológica de la ciudad de Mercedes (Dirección Nacional de Meteorología), para las zafras I (2000-01), II (2001-02) y III (2002-03). El número dentro del paréntesis es la diferencia con respecto a la serie histórica (1960-2003) de dicha Estación.

Mes	Zafra		
	I	II	III
	mm		
Agosto	80 (+18)	156 (+94)	38 (-24)
Setiembre	104 (+27)	104 (+26)	105 (+27)
Octubre	129 (+18)	226 (+115)	218 (+108)
Noviembre	80 (-11)	129 (+37)	121 (+29)
Diciembre	58 (-59)	77 (-39)	171 (+54)
Enero	253 (+143)	145 (+35)	24 (-86)
Febrero	116 (-18)	89 (-45)	257 (+123)
Marzo	178 (+50)	370 (+242)	114 (-14)
Abril	67 (-32)	211 (+112)	140 (+41)

Cuadro 5. Dosis recomendadas de macro y micro nutrientes para cada combinación de zafra, sitio y tratamiento (Trat).

Sitio [†]	Trat	Zafra I (2000-2001)						Zafra II (2001-2002)						Zafra III (2002-2003)											
		NS [‡]	NV6 [‡]	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Mg	Zn	B	NS	NV6	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Mg	Zn	B	NS	NV6	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Mg	Zn	B
1	URU1	25	23	15	50§	0	0	0	0	94	69	37	0	0	0	0	0	20	25	117	0	0	NA¶	NA	NA
	URU2	25	23	15	50	10	0	0	0	50	51	40	50	0	0	1	0	20	50	117	50	40	NA	NA	NA
	USA1	32	130	100	180	17	2	0	1,5	65	135	77	98	0	0	2	1	32	100	160	60	32	NA	NA	NA
	USA2	46	141	15	63	0	0	0	0	51	101	16	0	0	0	0	0	44	100	66	14	0	NA	NA	NA
2	URU1	27	58	70	0	0	0	0	0	34	100#	57	0	0	0	0	0	18	25	89	0	0	NA	NA	NA
	URU2	27	58	70	0	0	0	2	0	16	120#	78	0	0	0	2	0	18	40	89	0	40	NA	NA	NA
	USA1	42	58	120	0	16	10	2	1	68	120#	113	45	0	0	3,5	1	32	70	130	0	32	NA	NA	NA
	USA2	20	108	49	0	0	10	0	0	33	100#	150	0	0	0	0	0	29	89	56	0	0	NA	NA	NA
3	URU1	26	60	60	0	0	0	0	0	36	92	92	0	0	0	0	0	35	25	85	0	0	NA	NA	NA
	URU2	20	60	60	0	40	0	0	0	38	92	138	41	20	0	0	0	35	40	110	0	0	NA	NA	NA
	USA1	32	92	120	0	16	0	0	1,5	50	138	81	108	0	0	0	0	150	50	100	40	40	NA	NA	NA
	USA2	46	184	46	0	0	0	0	0	40	92	50	13	13	0	0	0	50	40	54	0	0	NA	NA	NA
4	URU1	18	92	46	0	0	0	0	0	32	80#	0	120	0	0	0	0	18	0	60	0	0	NA	NA	NA
	URU2	20	92	42	50	28	0	0	0	32	80#	0	60	0	0	0	0	18	0	60	50	0	NA	NA	NA
	USA1	32	92	120	90	16	0	0	1	36	120#	92	120	0	0	0	0	50	50	100	100	40	NA	NA	NA
	USA2	46	184	39	14	0	0	0	0	64	40#	23	60	0	0	0	0	35	25	46	40	0	NA	NA	NA

† Una misma identificación se corresponde con diferentes sitios en las distintas zafra.

‡ NS = N aplicado a la siembra, NV6 = N aplicado a V6

§ URU1 debió haber sido fertilizado con K pero no lo fue.

¶ NA = En esta zafra no se aplicaron micronutrientes.

En estos sitios no se aplicó Urea a V-6, debido a que las lluvias durante el período V-6 a V-8 impidieron entrar a la chacra.

Cuadro 6. Dosis promedio de varios nutrientes de cuatro tratamientos de fertilización para 12 sitios-año, producto de la combinación de 4 sitios y 3 zafras.

Tratamiento	Nutrientes						
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Mg	Zn	B
	kg ha ⁻¹						
URU1	84	61	10	0	0	0	0
URU2	81	68	29	15	0	1	0
USA1	151	109	70	17	2	1	1
USA2	147	51	17	1	1	0	0

estadísticamente significativos (Cuadro 8). Las diferencias entre los tratamientos fertilizados fueron en promedio menores a 500 kg ha⁻¹, aunque los tratamientos “USA” rindieron significativamente más que los “URU”. Sin embargo, el mejor tratamiento (USA2) no difirió significativamente de URU1 (Cuadro 8). Por lo tanto, las recomendaciones de algunos de estos tratamientos podrían haber sido excesivas, ya que con una fertilización menor fue posible obtener un rendimiento similar. Estos resultados son similares a los obtenidos por Olson *et al.* (1982) en EE.UU. y por Ewanek en Canadá (citado por Black, 1993), en un trabajo similar.

En la Zafra I, el incremento de rendimiento por el agregado de fertilizante para el promedio de todos los tratamientos fertilizados fue importante (4113 kg ha⁻¹), pero la diferencia entre ellos fue baja (Cuadro 8). Además, no existieron diferencias de rendimiento prácticas entre el tratamiento USA1, que recomendó las mayores dosis de fertilizante, y el tratamiento URU1, que recomendó las menores (Cuadro 8). En el Sitio 3-I, las condiciones de exceso hídrico del suelo en V6 imposibilitaron entrar a la chacra, por lo que la re-fertilización con N fue pospuesta hasta V9. Sin embargo, la respuesta obtenida con este agregado tardío del N fue importante, ya que el rendimiento fue marcadamente superior al obtenido en un área adyacente que recibió una fertilización de siembra similar, pero que se dejó sin re-fertilizar (datos no mostrados).

En la Zafra II, los rendimientos promedios de los tratamientos fertilizados fueron menores a los de la zafra anterior, debido sobre todo a la influencia del sitio 4-II, que fue sembrado muy tarde (enero) y cosechado recién en setiembre, debido a la imposibilidad de entrar al sitio debido a exceso hídrico. Otro hecho que limitó el rendimiento fue la imposibilidad de aplicar Urea a V6 en dos de estos sitios (2-II y 4-II). Este menor rendimiento limitó posiblemente la respuesta a la fertilización, ya que el incremento promedio de rendimiento por el agregado de fertilizante (1840 kg ha⁻¹) fue claramente inferior al de la zafra anterior (Cuadro 8). Los rendimientos de los tratamientos fertilizados fueron

nuevamente similares entre sí, no existiendo prácticamente diferencias entre el tratamiento que recomendó las mayores dosis de fertilizante (USA1) y el que recomendó las menores (URU1). El tratamiento que produjo el mayor rendimiento fue USA2, al igual que en la zafra anterior, aunque con una diferencia menor a 250 kg ha⁻¹ con los tratamientos URU1 y USA1 (Cuadro 8).

Cuando se consideraron los sitios individuales, se observó que los menores incrementos por fertilización se produjeron en los Sitios 2-II y 4-II (698 y 332 kg ha⁻¹ respectivamente), donde por condiciones de exceso hídrico no se pudo re-fertilizar con N (Cuadro 8). Es posible que si se hubiera podido aplicar urea a V6 en el Sitio 2-II se hubieran obtenido mayores rendimientos, ya que en este sitio el nivel de NO₃⁻ del suelo era bajo, y además luego ocurrieron lluvias, por lo que la disponibilidad de agua no fue limitante. Algo similar podría haber ocurrido en el Sitio 4-II, ya que el nivel de NO₃⁻ en el suelo fue aún menor, pero la siembra tardía podría haber limitado los rendimientos en este sitio.

En la Zafra III, los incrementos de rendimiento por el agregado de fertilizante fueron similares aunque algo mayores a los de la Zafra II, siendo en promedio de 1955 kg ha⁻¹ (Cuadro 8). Las diferencias de rendimiento entre los tratamientos fertilizados fueron mayores que en las zafras anteriores, obteniéndose una diferencia promedio de 770 kg ha⁻¹ a favor del tratamiento USA1, que recomendó las mayores dosis de fertilizante, con respecto a URU1 que recomendó las menores. A su vez, esta diferencia fue de 1105 kg ha⁻¹ a favor de USA2 (el tratamiento que produjo nuevamente los mayores rendimientos) con respecto a URU1. Además, a diferencia de las zafras anteriores, en todos los sitios de esta zafra el rendimiento de USA2 fue superior al de URU1 (Cuadro 8). Este resultado pudo haber sido la consecuencia del agregado de una dosis subóptima de N a URU1, debido a las relativamente altas concentraciones de NO₃⁻ en V6 en este tratamiento. Estas altas concentraciones no se habrían debido a una alta capacidad de aporte de N del suelo, sino a la residualidad a V6 del N aplicado a la siembra.

Esta residualidad de N determinó una mayor concentración de NO₃⁻ en el suelo a V6 tanto en URU1 como en

Cuadro 7. Dosis de fertilizantes aplicadas en las distintas combinaciones de zafra, sitio y tratamiento para lograr las dosis de N, P₂O₅, K₂O y todo o parte del S. Los fertilizantes utilizados, con sus correspondientes porcentajes de N-P₂O₅-K₂O, fueron: Fosfato Diamónico (FDA)=18-46-0, Cloruro de Potasio (KCl)=0-0-60, Superfosfato Común (SFC)=0-23-0, Superfosfato Triple (SFT)=0-46-0, Urea (U)=46-0-0. El único fertilizante que contenía S (14%) fue el SFC. Excepto por la Urea, que fue aplicada tanto a la siembra como a V-6, el resto de los fertilizantes fue aplicado sólo a la siembra.

Sitio†	Trat	Zafra I (2000-2001)					Zafra II (2001-2002)					Zafra III (2002-2003)									
		FDA	KCl	SFC	SFT	U-S‡	U-S‡	U-V6‡	U-T‡	FDA	KCl	SFC	SFT	U-S‡	U-V6‡	U-T‡	FDA	KCl	SFC	SFT	U-S‡
1	URU1	33	83§	0	0	42	50	92	80	0	0	174	150	324	110	0	340	0	54	54	
	URU2	0	83	71	0	54	50	104	0	83	71	109	220	329	117	80	300	0	108	108	
	USA1	178	300	86	0	0	282	282	167	163	86	76	300	376	200	100	250	0	220	220	
	USA2	33	105	0	0	87	307	394	35	0	0	98	220	318	150	25	0	33	217	250	
2	URU1	152	0	0	0	0	126	126	124	0	0	26	217¶	243	100	0	0	36	54	90	
	URU2	152	0	0	0	0	126	126	92	0	163	0	260¶	260	60	0	300	0	100	100	
	USA1	238	0	50	0	0	126	126	246	75	0	52	260¶	312	145	0	300	0	165	165	
	USA2	107	0	0	0	0	235	235	184	0	327	0	220¶	220	120	0	0	200	200		
3	URU1	130	0	0	0	0	130	130	200	0	0	0	200	200	184	0	0	54	54		
	URU2	0	0	285	0	43	130	173	210	69	178	0	200	200	240	0	0	90	90		
	USA1	0	0	115	209	70	200	270	176	180	0	40	300	340	80	70	300	292	108	400	
	USA2	100	0	0	0	60	400	460	69	21	81	60	200	260	120	0	0	64	86	150	
4	URU1	100	0	0	0	0	200	200	0	200	0	70	243¶	313	130	0	0	0	0	0	
	URU2	0	84	200	0	44	200	244	0	100	0	70	243¶	313	130	90	0	0	0	0	
	USA1	0	150	115	209	70	200	270	200	200	0	0	340¶	340	80	170	300	82	108	190	
	USA2	85	24	0	0	66	400	466	0	100	100	140	226¶	366	100	70	0	46	54	100	

† Una misma identificación corresponde a diferentes sitios en las distintas zafras.

‡ Urea aplicada a la siembra (U-S), a V6 (U-V6) y total (U-T).

§ URU1 debió haber sido fertilizado con K pero no lo fue.

¶ En estos sitios no se aplicó Urea a V-6, debido a que las lluvias durante el período de V-6 a V-8 impidieron entrar a la chacra.

Cuadro 8. Rendimiento de grano de maíz obtenido con cinco tratamientos de fertilización en 12 sitios experimentales.

Zafra	Sitio	Test†	URU1	URU2	USA1	USA2
kg ha ⁻¹						
I	1-I	6028	6915	7504	7834	7904
	2-I	8644	11308	11173	11634	11599
	3-I	4145	10026	8747	11591	12783
	4-I	3399	10031	8527	9070	8025
	Promedio de Zafra I	5554	9570	8988	10032	10078
II	1-II	2727	6061	4267	5325	5996
	2-II‡	6766	7241	6850	7267	7034
	3-II	4112	7202	7750	8094	7979
	4-II‡	2688	3351	3189	3173	3830
	Promedio de Zafra II	4073	5964	5514	5965	6210
III	1-III	7394	8800	9364	9731	9641
	2-III	7959	8451	8896	9423	9359
	3-III	5849	8325	8556	9008	9073
	4-III	4757	5935	6273	6429	7859
	Promedio de Zafra III	7959	8451	8896	9423	9359
Todas	Promedio de todas las Zafras	5862	7995	7799	8473	8549
		Análisis estadístico§				Valor de P
		Tratamientos				0.0001
		Contrastes:				
		Test vs Resto				0.0001
		URU vs USA				0.0393
		URU1 vs URU2				0.6101
		USA1 vs USA2				0.6167
		URU1 vs USA2¶				0.1414

† Test = tratamiento testigo sin fertilización.

‡ En estos sitios no se aplicó Urea a V6, debido a que las lluvias durante V6 a V8 impidieron entrar a la chacra.

§ En este análisis se utilizó un diseño de bloques al azar, considerándose los sitios como bloques.

¶ Contraste no ortogonal.

URU2 con respecto al testigo, en los cuatro sitios de la zafra III y en el Sitio 1-I (Cuadro 2). A su vez, esta diferencia de concentración entre URU1 y el testigo se relacionó positivamente con la diferencia de rendimiento entre USA2 y URU1 (Fig. 1), lo que parece confirmar la hipótesis de que la concentración de NO₃ sobreestimó en esos sitios la capacidad del aporte de N del suelo, y que esto condujo a un error de recomendación.

Retorno neto por fertilización

El RNPF promedio de los 12 sitios fue afectado significativamente por los tratamientos de fertilización (Cuadro 9). Los resultados de los contrastes realizados muestran que no existieron diferencias significativas de RNPF entre los tratamientos “URU” y USA. Tampoco existieron diferencias dentro de los “URU”. Pero sí entre los “USA”, siendo la media de RNPF de USA2 superior a la de USA1. Este último fue el tratamiento que presentó el menor valor de RNPF de todos. Además, no existieron diferencias sig-

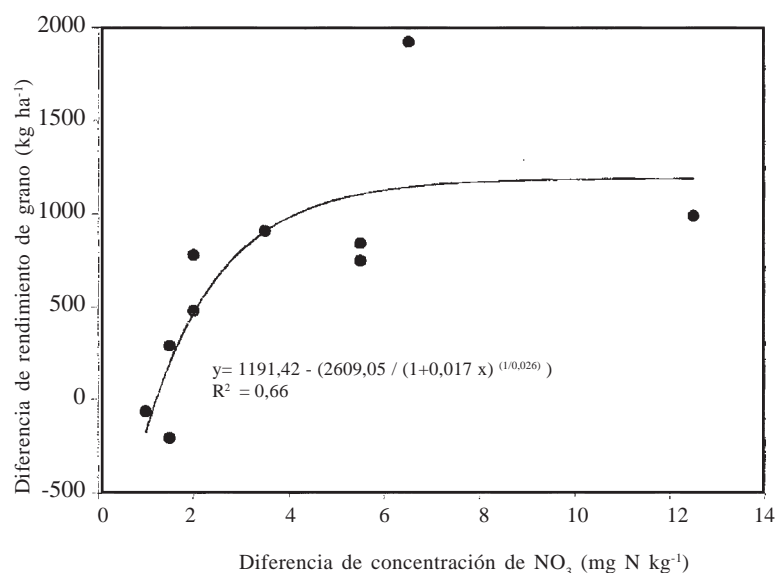


Figura 1. Relación entre la diferencia de rendimiento de grano entre los tratamientos URU1 y USA2 y la diferencia de concentración de NO₃ entre el tratamiento URU1 y el testigo. La concentración de NO₃ fue determinada a V6 a la profundidad de 0-20 cm del suelo.

nificativas entre USA2 y URU1 (contraste no ortogonal), los dos tratamientos que recomendaron las fertilizaciones más conservadoras de todos los nutrientes exceptuando N (Cuadro 8). Este resultado señala la importancia de considerar el incremento de rendimiento y los costos de fertilización para evaluar los resultados de la fertilización, y no solamente el rendimiento.

En la Zafra I, el RNPF promedio fue de 306 U\$ ha⁻¹ (Cuadro 8). Este índice fue mayor en el Sitio 3-I y menor en el Sitio 1-I. En la Zafra II, el RNPF promedio descendió a 71 U\$ ha⁻¹, siendo mayor en el Sitio 3-II y menor en los dos sitios que no pudieron ser re-fertilizados (2-II y 4-II). De acuerdo a lo esperado, el RNPF promedio de los dos sitios que no fueron re-fertilizados a V-6 fue inferior al promedio de los dos sitios que si lo fueron, pero este último promedio estuvo todavía muy por debajo (en casi un 50%) del RNPF promedio de la primera zafra. Esto indica que existieron diferencias reales de resultado económico entre estas dos zafras. En la Zafra III, el RNPF fue aun inferior al obtenido en la Zafra II (47 U\$ ha⁻¹), siendo mayor en el Sitio 3-III y negativo en el Sitio 2-III, evidenciando que pese al alto rendimiento obtenido, en este último sitio habría existido riesgo de pérdida económica por fertilización (Cuadro 8).

Estos resultados, sin embargo, pueden estar subestimando el RNPF esperado para estos tratamientos, ya que dos de los sitios experimentales no fueron re-fertilizados con N a V-6. Por esto, se estimó el RNPF de los distintos tratamientos sin estos dos sitios. En este escenario, el RNPF se incrementó de acuerdo a lo esperado, pero el orden de los tratamientos no varió (Cuadro 8). Se evaluó

también el posible impacto de una situación de “bajo costos”, como los de la Zafra I, pero extendidos a las otras dos zafras. En este escenario, el tratamiento USA1 ascendió del cuarto al tercer lugar, lo que aún no permitiría recomendarlo. El “Escenario 3” considera la situación contraria de “altos costos” de la Zafra III, observándose una disminución del RNPF de todos los tratamientos, y la aproximación de los valores de URU1 y USA2 (Cuadro 8). Esto indicaría que en situaciones de costos altos, la ventaja económica de los tratamientos más conservadores se incrementaría.

Como ya se señaló, el costo de los micronutrientes no fue considerado dentro del costo de la fertilización, pero si esto se hubiera hecho habría afectado favorablemente el resultado económico de URU1, ya que éste fue el único tratamiento que no incluyó estas recomendaciones. Además, en este estudio no fue considerado el costo ambiental de la fertilización, el cual es obviamente de difícil valoración. De todas maneras, resulta claro que la inclusión de este costo hubiera favorecido el resultado económico de las recomendaciones más conservadoras.

El resultado promedio del tratamiento URU1 fue afectado negativamente por los resultados de la Zafra III. Como ya fue comentado, parte del N aplicado a la siembra en esta zafra se encontraba todavía como NO₃ a V6. Esta situación podría haber hecho sobrestimar el valor de este indicador, ya que su valor dependía no solo de la capacidad del suelo de mineralizar N sino también de la dosis de N aplicada a la siembra, lo que podría haber llevado a la recomendación de dosis subóptimas de N. Es posible que esta

Cuadro 9. Retorno neto por fertilización (RNPF) del cultivo de maíz obtenido con cuatro tratamientos de fertilización en 12 sitios experimentales. El RNPF fue estimado para los precios vigentes en cada zafra, y para otros escenarios de precios y sitios.

Zafra	Sitio	Tratamiento			
		URU1	URU2	USA1	USA2
———— Dólares americanos (USD) ha ⁻¹ ————					
I	1-I	56	93	-23	56
	2-I	191	178	192	206
	3-I	518	379	612	721
	4-I	585	406	399	317
	Promedio de Zafra I	338	264	295	325
II	1-II	205	38	54	213
	2-II†	1	-38	-55	-67
	3-II	176	185	190	256
	4-II†	-3	6	-61	37
	Promedio de Zafra II	95	48	32	110
III	1-III	18	20	-17	52
	2-III	-24	-27	-34	12
	3-III	138	124	38	193
	4-III	58	61	-53	186
	Promedio de Zafra III	48	44	-16	111
Todas:	Promedio de todas las Zafras	160	119	104	182
	Promedio de escenario 1‡	192	146	136	221
	Promedio de escenario 2§	214	174	181	256
	Promedio de escenario 3¶	158	109	81	175
		Análisis estadístico #			Valor de P
		Tratamientos			0.0241
		Contrastes:			
		URU vs USA			0.8627
		URU1 vs URU2			0.1376
		USA1 vs USA2			0.0067
		URU1 vs USA2††			0.4236

† En estos sitios no se aplicó Urea en V-6, debido a que las lluvias durante V-6 a V-8 impidieron entrar a la chacra.

‡ Escenario 1= sin los sitios 2-II y 4-II, y con los costos de fertilizantes de las zafras correspondientes.

§ Escenario 2= los sitios de escenario 1, pero con los "costos bajos" de fertilizantes de la zafra I.

¶ Escenario 3= los sitios de escenario 1, pero con los costos "altos" de fertilizantes de la zafra 2002-03.

Este análisis se realizó sobre los valores de RNPF obtenidos con los precios de cada zafra; se utilizó un diseño de bloques al azar y se consideraron los sitios como bloques.

†† Contraste no ortogonal.

sobreestimación hubiera estado asociada a un muestreo de suelo a V6 muy cerca de la línea de plantación, la zona donde se aplicó el fertilizante a la siembra. En este trabajo no hay constancia de que esto hubiera ocurrido, pero si así fuera, este efecto se podría evitar extrayendo las muestras de suelo del centro de la entrefila, la zona más alejada del área que recibió la fertilización.

Resulta importante destacar que el superior resultado económico de USA2 se obtuvo con un nivel de rendimiento similar o mayor al de los tratamientos que recomendaron la aplicación de dosis mayores de nutrientes. Este resultado es importante, ya que frecuentemente se asume que las recomendaciones más conservadoras son más eficientes en términos económicos porque recomiendan dosis de nutrientes en la zona de mayor respuesta física, aunque resultan en rendimientos inferiores. Obviamente, este concepto no es aplicable a estos resultados. Una comparación similar entre URU1 y USA1 revela que URU1 produjo un mayor RNPF a un nivel similar de rendimiento, ya que la diferencia entre ambos tratamientos fue baja.

Balance entre el aporte y la extracción de nutrientes

Se ha señalado que los análisis económicos basados en RNPF pueden ocultar el costo de reposición de los nutrientes extraídos por el cultivo (Flores & Sarandón, 2002). Por lo tanto, aunque en el corto plazo las fertilizaciones bajas sean más rentables podrían llevar en el largo plazo a la pérdida de fertilidad de los suelos. Aunque este trabajo no tuvo el objetivo de estudiar estos efectos de largo plazo, igualmente se utilizó el rendimiento promedio de los 12 sitios para estimar la extracción esperada de N, P y K de cada tratamiento, utilizando los parámetros de extracción propuestos por Inpofos (1999). Luego se estimó para cada tratamiento el balance aporte-extracción, es decir la diferencia entre la dosis promedio de N, P y K aplicada y los correspondientes valores de extracción.

Se observó que para N, el balance de los tratamientos "URU" fue negativo en aproximadamente 30 kg ha⁻¹, mientras que el de los "USA" fue positivo en una cantidad similar. El balance de P, en cambio, fue positivo para casi todos los tratamientos, excepto para USA2, donde fue deficitario en solo 3 kg ha⁻¹. En el caso del K todos los tratamientos tuvieron un balance negativo, excepto para USA1, en el que fue positivo en 24 kg ha⁻¹. Con respecto a estos resultados, cabe señalar que no se justificaría fertilizar con dosis mayores de N para reponer lo extraído, debido al inherente riesgo de pérdida de este nutriente. Al menos en Uruguay, la rotación de cultivos y pasturas parece ser un modo más sustentable de mantener el contenido de N or-

gánico del suelo en un nivel adecuado. Por otra parte, la existencia de un balance negativo de K no debería preocupar todavía, ya que los contenidos de este nutriente en los suelos agrícolas del Uruguay están aún muy por encima del nivel crítico, y de acuerdo a Mallarino (2005), en estas situaciones no debería emplearse el concepto de mantenimiento. El balance de P, en cambio, fue mayormente positivo, pero eventuales caídas entre dos años seguidos tampoco debería alarmar, ya que los análisis de suelo del segundo año inducirían a fertilizar con este nutriente si el valor de P fuera inferior al "nivel de suficiencia".

CONCLUSIONES

Existió una importante respuesta promedio a la fertilización, pero las diferencias de rendimiento entre los tratamientos con distintas RDF no fueron muy importantes. Resultados similares fueron obtenidos por Olson *et al.* (1982) en EE.UU. y Ewanek en Canadá (citado por Black, 1993).

El mayor rendimiento promedio y el mayor RNPF se obtuvo con USA2, mientras que el segundo mejor rendimiento se obtuvo con USA1, el tratamiento que recomendó las mayores dosis. El segundo mayor RNPF, en cambio, se obtuvo con URU1. Además, la diferencia de RNPF entre USA2 y URU1 fue menor a 25 U\$ ha⁻¹, pero USA2 fue superior a USA1 en 60 U\$ ha⁻¹. Este resultado refleja la importancia de considerar los costos de fertilización y el incremento de rendimiento para evaluar recomendaciones, y no exclusivamente el rendimiento.

Estos hallazgos contradicen parcialmente las conclusiones de Olson *et al.* (1981) y de Ewanek (citado por Black, 1993), de que las recomendaciones basadas en el "nivel de suficiencia" producen los mejores resultados económicos. En este estudio los mayores RNPF se obtuvieron con USA2, RDF que combina los conceptos de "nivel de suficiencia" y de "subir y mantener". Esta diferencia se puede deber a que las recomendaciones de USA2 fueron formuladas en un ámbito universitario y no comercial, y que además en este estudio se utilizó un rendimiento meta realista.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los Servicios Agropecuarios del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, dentro del llamado a Proyectos de Validación Tecnológica.

Se agradece además a la Empresa Agrotierra S.A. y muy especialmente a los productores Carlos Chambón, Miguel Carballal, José Pedro Cristina y Walter y Arturo Brhem, en cuyos predios se realizaron estos ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

- BEAR, F. E. & PRINCE, A.L.. 1945. Cation-equivalent constancy in alfalfa. *Journal of the American Society of Agronomy* 37:217-222.
- BERARDO, A.; EHRT, S.; GRATTONE, F. & GARCÍA, F. 2001. Corn yield response to phosphorus fertilization in the southeastern Pampas. *Better Crops International* 15 (1):3-5.
- BLACK., C. A. 1993. Soil fertility evaluation and control. Lewis Publisher. Boca Raton, FL, USA.
- BLACKMER, A.M.; POTTKER, D.; CERRATO, M.E. & WEBB, J. 1989. Correlations between soil nitrate concentrations in late spring and corn yields in Iowa. *J. Prod. Agric.* 2:103-109.
- BLACKMER, A.M.; VOSS, R. D. & MALLARINO, A.P. 1997. Nitrogen fertilizer recommendations for Corn in Iowa. Pm-1714. Iowa State University, University Extension, Ames. Iowa. [Online] Disponible en <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1714.pdf> (verificado 8 de setiembre de 2005).
- BRAY, R.H. & KURTZ, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- COPE, J.T. & ROUSE, R.D. 1973. Interpretation of soil test results. p. 35-54. *En* L.M. Walsh and J.D. Beaton (eds.) *Soil Testing and Plant Analysis*. SSSA, Madison, WI.
- ECHEVERRÍA, H. & GARCÍA, F. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico* No. 149. EEA INTA Balcarce.
- FERRARI, M.; OSTOJIC, J.; VENTIMIGLIA, L.; CARTA, H.; FERRARIS, G.; RILLO, S.; GALETTO, M. & RIMATORI, F. 2000. Fertilización de maíz: Buscando una mayor eficiencia en el manejo de nitrógeno y fósforo. *Actas Jornadas de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2000"*. Rosario, 28 de abril de 2000. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires.
- FLORES C.C. & SARANDÓN, S.J. 2002. ¿Racionalidad económica versus sustentabilidad ecológica? El ejemplo del costo oculto de la pérdida de fertilidad del suelo durante el proceso de agriculturización en la región pampeana Argentina. *Rev. Fac. Agron. La Plata.* 105(1):52-67.
- FOX, R.H.; ROTH, G.W.; IVERSEN, K.V. & PIEKIELEK, W. 1989. Soil and tissue nitrate tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agron. J.* 81:971-974.
- GALRÃO, E.Z. 2002. Micronutrientes. p. 185-226. *En*: D.M.G. Souza & E. Lobato (eds.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. Planaltina-DF EMBRAPA Cerrados.
- GARCÍA, F.; FABRIZZI, K.; RUFFO, M. & SCARABICCHI, P. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. *Actas VI Congreso Nacional de Maíz*. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- INPOFOS Cono Sur (Oficina Regional para el Cono Sur del Potash y Phosphate Institute y el Potash and Phosphate Institute of Canada). 1999. Planilla de cálculo para estimar requerimientos nutricionales de cultivos de grano y forrajeros. [Online] Disponible en: [http://www.ppi-pic.org/ppiweb/Itams.nsf/\\$webindex/573A3BBA6EF828E903256960006DCFC7?opendocument&navigator=home+page](http://www.ppi-pic.org/ppiweb/Itams.nsf/$webindex/573A3BBA6EF828E903256960006DCFC7?opendocument&navigator=home+page). Verificado el 22 de febrero de 2006.
- JOHNSON, G.V. & FIXEN, P.E. 1990. Testing soils for sulfur, boron, molybdenum and chlorine. p. 265-273. *En* R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. 3rd ed. SSSA Book Series No. 3. SSSA, Madison, WI.
- KLAUSNER, S.D.; REID, W.S. & BOULDIN, D.R. 1993. Relationship between late spring soil nitrate concentrations and corn yields in New York. *J. Prod. Agric.* 6:350-3354.
- MALLARINO, A.P. & BLACKMER, A.M. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agron. J.* 84:850-856.
- MALLARINO, A.P. & BLACKMER, A.M. 1994. Profit-maximizing critical values of soil test potassium for corn. *J. Prod. Agric.* 7:261-268.
- MALLARINO, A.P. 2005. Criterios de fertilización fosfatada en sistemas de agricultura continúa con maíz y soja en el cinturón del maíz Inpofos *Informaciones Agronómicas*. 28:9-15.
- MARTENS, D.C. & LINDSAY, W.L. 1990. Testing soils for cooper, iron and zinc. p. 229-264. *En*: R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. 3rd ed. SSSA Book Series No. 3. SSSA, Madison, WI.
- MEISINGER, J.J.; BANDEL, V.A.; ANGLE, J.S.; O'KEEFE, B.E. & REYNOLDS, C.M.. 1992. Presidedress soil nitrate test evaluation in Maryland. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56:1527-1532.
- MELCHIORI R.; PAPANOTTI, O. & PAUL, W. 1996. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada de maíz: Nitratos en preescardillada. *Serie de Extensión* No. 11. EEA INTA Paraná. Entre Ríos.
- MORÓN, A. & BAETGHEN, W. 1996. Relevamiento de la fertilidad de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. *Serie Técnica* 73. INIA. Uruguay.
- MULVANEY, R.L. 1996. Nitrogen^{3/4}Inorganic forms. p. 1123-1184. *En*: D. L. Sparks (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.

- OLSON, R.A., FRANK, K.D.; GRABOUSKI, P.H & RHEM, G.W. 1982. Economic and agronomic impacts of varied philosophies of soil testing. *Agron. J.* 74:492-499.
- PERDOMO, C. H., CIGANDA, V.S.; BORGHI, & G.WORNICOV, E. 1998. Evaluación del test de nitrato en suelo para las condiciones de maíz en Uruguay. p. 337. En: XXIII Reunao Brasileira Fertilidade de Solo e Nutricao de Plantas. FertBio 98. Resumos. Caxambu (MG). Brasil.
- PERDOMO, C. H. 2000. Recomendaciones de fertilización nitrogenada de maíz. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. [Online] Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/fert/web/investiga/investigacion.html> (verificado el 8 de setiembre de 2005).
- REHM, G M., SCHMITT, J.L.& ELIASON, R. 2001. Fertilizer recommendations for agronomic crops in Minnesota: fertilizer suggestions for corn. University of Minnesota Extension Service. [Online] Disponible en <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/components/6240f.html> (verificado el 8 de setiembre de 2005).
- SAINZ ROZAS, H., CHEVERRÍA, H.; STUDDERT, G. & DOMÍNGUEZ, G. 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92:1176-1183.
- SCHULTE, E. E. & EIK, K. 1988. Recommended sulfate-sulfur test. p. 17-19. *En: Recommended chemical soil test procedures for north central region.* North Dakota Agric Exp Sta Bull No. 499 (revised).
- STANDFORD, G. 1973. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. *J. Environ. Qual.* 2:159-166.
- THOMAS, G.W. 1982. Exchangeable cations. p. 159-165. En: A. L. Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- WALKLEY, A., & BLACK, T.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.

