

MODELO DE FERTILIZACION NITROGENADA Y FOSFORADA PARA TRIGO EN EL SUDOESTE BONAERENSE, ARGENTINA.

M M RON¹, T LOEWY²

¹ Dpto. de Agronomía - Universidad Nac. del Sur - 8000 Bahía Blanca

² E.E.A. Bordenave INTA - 8187 Bordenave

Recibido 13 de septiembre de 1999, aceptado 1 de febrero de 2000.

MODEL FOR NITROGEN AND PHOSPHORUS FERTILIZATION OF WHEAT IN SOUTHWESTERN BUENOS AIRES, ARGENTINA.

In the southwest of Buenos Aires Province (Argentina) nitrogen and phosphorus deficiencies are important wheat yield limiting factors. The objective of this paper was to develop a model which predicted yield response to nitrogen (0 to 60 kg N ha⁻¹), applied at two different times (sowing or tillering) or in a split application, and to include the interaction with phosphorus (16 kg P ha⁻¹), applied on farmers' fields, a function of the form $y = b_0 + b_1Ns + b_2Nm + b_3Ns^2 + b_4Nm^2 + b_5NsxNm + b_6P + b_7NsxP + b_8NmxP + b_9NsxNmxP$, was fitted. In the equation y denotes yield; N and P , fertilizer rates; subscripts s and m , time of application and b_0 to b_9 , coefficients. Dependent variables of yield response to N and P and interactions were derived from this equation. Independent variables were pH, organic matter (MO) and soil extractable phosphorus (BK). Dummy variables of soil texture, wheat cycle and climatic year were also included. Yield response to N and P depended mainly on climatic year and BK, respectively, as shown in previous papers. Interactions accounted for ± 500 kg wheat ha⁻¹. N-P interaction was greater for soils of low organic matter and cultivars of intermediate and short vegetative cycle. Interaction between the two N fractions of a split application was related to pH and the higher yield response potential of the intermediate cycle cultivar. The results indicate that it is more convenient to split the N rate, particularly for long and intermediate cycle cultivars.

Key words: nitrogen response, split application, N-P interaction, model, wheat.

Palabras claves: respuesta a nitrógeno, aplicación fraccionada, interacción NP, modelo, trigo.

INTRODUCCION

En el sudoeste bonaerense se cultivan anualmente alrededor de 1.000.000 has con trigo, lo que representa un 20 % de la producción nacional. Los rendimientos medios oscilan entre 1600 y 1900 kg ha⁻¹, en las zonas con suelos de régimen Ustico y Udico, respectivamente. La baja estabilidad productiva y cualitativa, dentro de un nivel subóptimo, constituyen factores económicamente negativos.

El nitrógeno y el fósforo son los nutrimentos del suelo con mayores deficiencias comprobadas en toda el área. Durante los últimos años la aplicación de N y P tuvo un lugar destacado dentro de las prácticas adoptadas.

La selección de técnicas eficientes de uso del N , en interacción con el P , aporta a la sustentabilidad del sistema productivo. La aplicación fraccionada es una opción

conveniente para la fertilización de base. Esta otorga mayor flexibilidad a la práctica, en términos de riesgo, dosis y calidad del grano, reduciendo las pérdidas potenciales (Borghetti 1999).

A los efectos de predecir la respuesta al N , los modelos existentes (Loewy, Ron 1995) no contemplan el fraccionamiento (siembra-macollaje), ni la interacción N-P. Su cuantificación contribuirá a mejorar la eficiencia y rentabilidad de la fertilización en el sudoeste bonaerense. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un modelo de respuesta que incluya tales aspectos.

MATERIALES Y METODOS

En un estudio previo se describen las características del área y de los experimentos (Loewy 1990). El criterio inicial de la selección de los sitios contempló el cubrimiento del área, suelos con aptitud agrícola, espectro de textura y P extraíble, además de la cooperación del productor.

Para el presente trabajo se utilizaron datos de rendimiento de ensayos que incluían tratamientos de fraccionamiento del N de los años 1983, 1984 y 1985, con 6, 12 y 1 sitios, respectivamente. Los suelos empleados fueron Ustoles (9) y Udoles (10). La fertilidad nitrogenada de los lotes se diagnosticó como deficiente, en base al uso previo (más de 3 cultivos anuales, no leguminosas). Los ciclos climáticos se caracterizaron como secos (1983), y normales a húmedos (1984 y 1985), a partir de las precipitaciones ocurridas de setiembre a noviembre. Estas fueron, en promedio, de 117, 309 y 562 mm para 1983, 1984 y 1985, en ese orden.

El diseño de los ensayos fue de bloques completos al azar, con parcela dividida en franja. Los tratamientos correspondieron a dosis de N: 0 - 30 - 60 kg ha⁻¹ (aplicado como urea al voleo) y época: siembra, macollaje o fraccionada. Los subtratamientos fueron 0 y 16 kg de P ha⁻¹ como superfosfato triple, en línea de siembra. Las variedades empleadas fueron Chasicó INTA (ciclo largo, 53%), Cochicó INTA (ciclo intermedio, 26%) y Klein Chamaco (ciclo corto, 21%).

En el análisis estadístico de los resultados se usaron análisis de varianza, de regresión y correlaciones. Se emplearon los programas MSTAT-C (1988) y BMDP (1992). Además del ANOVA con todos los tratamientos se analizó una selección de los mismos, como un factorial completo, con dos factores: dosis y época de N (ANOVA parcial).

El estudio de la respuesta se basó en el método propuesto por Colwell (1994), para modelos generales de fertilidad. El procedimiento ya ha sido empleado para análisis de resultados en la zona (Loewy, Ron 1995, Ron, Loewy 1996).

Para cada ensayo se estimó una función cuadrática rendimiento-fertilizante, del tipo:
 $y = b_0 + b_1 N_s + b_2 N_m + b_3 N_s^2 + b_4 N_m^2 + b_5 N_s N_m + b_6 P + b_7 N_s P + b_8 N_m P + b_9 N_s N_m P$

(Ec. 1)

donde y: rendimiento; N_s y N_m: dosis de N a la siembra o al macollaje; P: dosis de P, y b₀ a b₉: coeficientes.

A partir de los coeficientes de la Ecuación (1) se calcularon las variables de respuesta descriptas en la Tabla 1. Los efectos simples de N son el lineal (A_{N_s} y A_{N_m}), que representa la eficiencia promedio de las dosis empleadas y el de curvatura (B_{N_s} y B_{N_m}), que posibilita el ajuste por dosis. Para el P la eficiencia (A_P) corresponde a la dosis única de 16 kg ha⁻¹. Las variables de interacción corresponden al efecto de la acción conjunta de dos elementos y/o épocas.

Los factores que afectan los rendimientos del trigo estuvieron representados por variables edáficas, climáticas y del cultivo (Tabla 2).

Se desarrollaron regresiones entre las variables de respuesta y las de sitio y del cultivo. La selección de variables predictivas se basó en la estrategia descrita para modelos generales de fertilidad (Colwell 1994).

Las ecuaciones ajustadas para las 9 variables de respuesta constituyeron el modelo que se utilizó para predecir los incrementos por fertilización. Se estimaron las variables de respuesta para distintas combinaciones de variables predictivas seleccionadas. A partir de las estimaciones se calcularon los coeficientes b₁ a b₉ de la Ecuación 1. Con éstos es posible predecir la respuesta al nitrógeno aplicado y calcular la dosis óptima económica por el procedimiento de cálculo diferencial corriente.

En el análisis económico se usaron valores de R (costo de 1 kg de N aplicado, expresado en kg de trigo) de 5 a 9, para aplicaciones aisladas en siembra o macollaje. Para calcular las proporciones relativas óptimas en un fraccionamiento del N, se efectuó una resolución simultánea de las dosis óptimas en cada época,

Tabla 1. Variables de la respuesta.

Table 1. Yield response variables.

Variable/ Cálculo	Efecto	Respuesta	Unidades
A _{N_s} = b ₁ + b ₃ 60	Simple - lineal	N siembra	kg trigo kg N ⁻¹
A _{N_m} = b ₂ + b ₄ 60	Simple - lineal	N macollaje	kg trigo kg N ⁻¹
A _P = b ₆	Simple - lineal	P	kg trigo kg P ⁻¹
B _{N_s} = b ₃	Simple - curvatura	N siembra	kg trigo kg N ⁻²
B _{N_m} = b ₄	Simple - curvatura	N macollaje	kg trigo kg N ⁻²
B _{N_sN_m} = b ₅	Interacción	N siembra x N macollaje	kg trigo kg N ⁻²
B _{N_sP} = b ₇	Interacción	N siembra x P	kg trigo kg N ⁻¹ .kg P ⁻¹
B _{N_mP} = b ₈	Interacción	N macollaje x P	kg trigo kg N ⁻¹ .kg P ⁻¹
B _{N_sN_mP} = b ₉	Interacción	N siembra x N macollaje x P	kg trigo kg N ⁻² .kg P ⁻¹

Tabla 2. Variables de sitio.

Table 2. Site variables.

Variable	Not.	Prom.	Mín.	Máx.	Desvío Estándar
pH (potenciométrico en agua 1:2,5) ⁺	pH	6,51	6,05	7,25	0,29
Materia Org., Walkley y Black (g kg ⁻¹) ⁺	MO	30,9	12,5	53,0	11,0
P Bray y Kurtz (mg kg ⁻¹) ⁺	BK	14,2	6,0	25,0	7,1
Textura (al tacto) ⁺					
Media	M				
Gruesa	G				Variables de clase
Fina	F				
Ciclo del trigo					
Largo	L				
Intermedio	I				
Corto	C				
Estación de crecimiento normal o húmeda (años 1984 y 1985)	ENH				

+ variables edáficas determinadas en capa arable (0-12 cm)

asumiendo igual costo de fertilización entre épocas.

Con el fin de ilustrar el efecto del fraccionamiento se utilizó el modelo para la predicción de la respuesta a N-P en un suelo modal (pH 6,5; MO 2% y P Bray y Kurtz (BK) 10 mg kg⁻¹). Se graficaron isocuantas (líneas de igual producción para diferentes fracciones de N) y sendas de expansión (Jáuregui, Sain 1992).

RESULTADOS Y DISCUSION

a) Análisis de varianza

El ANOVA dio efecto significativo de los subtratamientos (P) y tratamientos (N), en 15 y 11 ensayos, respectivamente. La interacción N-P y entre épocas de N (esta última analizada en el ANOVA parcial) fue significativa en 1 y 3 sitios, en ese orden. La respuesta a P fue significativa en más sitios que la del N por su mayor independencia de las condiciones climáticas y, además, porque el diseño privilegia los efectos del subtratamiento. En años normales a húmedos el 70% de los ensayos respondió significativamente a N.

La Ecuación (1), ajustada para cada ensayo, dio regresiones altamente significativas y significativas en 13 y 3 de los

casos, respectivamente, explicando 45,2 a 81,9% de la variación del rendimiento dentro de los sitios. Estos resultados fueron coherentes con los del ANOVA.

b) Características de las variables de respuesta

Las variables de respuesta describen los efectos simples de aplicaciones aisladas de N (en siembra o macollaje) y P, y de interacción por aplicaciones conjuntas. Sus características se resumen en la Tabla 3.

Los efectos simples de N (lineal y de curvatura) fueron, en promedio, similares para las dos épocas de aplicación. La respuesta a la dosis de P empleada tuvo una eficiencia media de 20 kg trigo kg P⁻¹. Como las variables de respuesta correspondientes (A_{Ns} ; A_{Nm} ; B_{Ns} ; B_{Nm} y A_p) fueron ortogonales entre sí, pudieron compararse por correlación (Tabla 4). Una asociación significativa entre efectos sugiere causas comunes. La correlación positiva entre A_{Ns} y A_{Nm} indica que las condiciones de sitio que favorecieron la respuesta fueron las mismas para las dos épocas de aplicación. Sin embargo, las épocas implican diferente

Tabla 3. Características de las variables de respuesta (Variables descriptas en Tabla 1).

Table 3. Characteristics of yield response variables (Variables as in Table 1).

Variable	Prom.	Mín.	Máx.	Desvío estándar
A_{Ns}	9,581	-4,660	19,470	1,454
A_{Nm}	10,833	-6,770	20,070	1,955
B_{Ns}	-0,098	-0,406	0,114	0,163
B_{Nm}	-0,094	-0,387	0,294	0,164
A_P	20,760	-4,770	57,640	16,850
$B_{Ns \times Nm}$	-0,187	-0,860	0,469	0,396
$B_{Ns \times P}$	0,049	-0,522	0,515	0,246
$B_{Nm \times P}$	0,075	-0,288	0,772	0,283
$B_{Ns \times Nm \times P}$	0,004	-0,031	0,038	0,023

impacto sobre componentes del rendimiento (Spiertz, De Vos 1983) y puede requerirse un ajuste distinto de la dosis, como lo revelan los coeficientes de curvatura no relacionados entre sí (Loewy, Ron 1995). Además, cuanto mayor fue la respuesta a N aplicado en macollaje, menor fue la caída de los incrementos por aumento de dosis. Con N aplicado a la siembra, esto no se observó. La respuesta a P, determinada mayormente por otras variables de sitio, fue independiente.

Las interacciones N-P corresponden a efectos de la acción conjunta de estos elementos y pueden ser positivas o negativas, según su impacto en el balance de los mismos. En promedio, aportaron escasamente, debido a que los experimentos representaban un espectro amplio de fertilidad fosfórica con un número balanceado de sitios provistos y no provistos fósforo nativo. Para la dosis de P empleada, la interacción media con 30 kg N ha^{-1} en siembra o macollaje fue de 24 ± 118 kg trigo ha^{-1} y 58 ± 136 kg trigo ha^{-1} , respectivamente.

La interacción entre épocas de aplicación de N importa un análisis diferente. Básicamente, se producen efectos de interacción negativos para sucesivas aplicaciones de N (Colwell 1994). La interacción media de dos aplicaciones de N (30 kg Ns + 30 kg Nm) fue de -160 kg ha^{-1} , valor muy similar al calculado del modelo de Vaughan *et al.* (1990). La interacción triple combina atributos de las interacciones dobles. Todas tuvieron un amplio rango de expresión (± 500 kg trigo ha^{-1}).

c) Modelo de la respuesta

Las ecuaciones de la Tabla 5 constituyen el modelo de la respuesta. Es conocido que la respuesta a N se relaciona con la disponibilidad hídrica, representada por las precipitaciones en la estación de crecimiento, para cultivos de secano. En modelos predictivos no se puede usar las precipitaciones como variables. El uso de las lluvias de setiembre para predecir la respuesta a la fertilización en macollaje implica, en

Tabla 4. Correlación entre variables de respuesta (descriptas en Tabla 1).

Table 4. Correlation between yield response variables (Variables as in Table 1).

	A_{Nm}	B_{Ns}	B_{Nm}	A_P
A_{Ns}	0,878**	-0,070	0,249	0,116
A_{Nm}	1	0,073	0,462*	0,246
B_{Ns}		1	0,281	0,196
B_{Nm}			1	-0,139

** , * Significativo a $P = 0,01$ y $0,05$

Tabla 5. Modelo de la respuesta (Variables dependientes ver Tabla 1 – Independientes ver Tabla 2).

Table 5. Yield response model (Dependent variables, see Table 1 – Independent variables, see Table 2).

	R ² %
$A_{Ns} = -0,420 + 10,136 \text{ ENH}$	46,6
$A_{Nm} = -1,176 + 10,624 \text{ ENH}$	41,4
$B_{Ns} = -0,098$	
$B_{Nm} = -0,094$	
$A_P = 9,87 - 2,47 (\text{BK} - 11,5 - \text{BK} - 11,5)$	50,6
$B_{Ns \times Nm} = 3,371 - 0,560 \text{ pH} + 0,338 \text{ I}$	39,7
$B_{Ns \times P} = 0,534 - 0,105 \text{ MO} - 0,303 \text{ L}$	36,4
$B_{Nm \times P} = 0,873 - 0,197 \text{ MO} - 0,361 \text{ L}$	58,1
$B_{Ns \times Nm \times P} = -0,022 - 0,019 \text{ G} + 0,0207 \text{ L} + 0,028 \text{ ENH}$	42,5

algunos casos, la demora de la práctica. La agricultura zonal se justifica en la expectativa de condiciones climáticas favorables. Esto conlleva a la simplificación de las variables climáticas.

En años normales a húmedos, las mayores respuestas se lograrían con 80 kg N ha⁻¹ (valor fuera del rango de dosis utilizado para el modelo). El óptimo económico se situaría entre 30 y 50 kg N ha⁻¹, en siembra o macollaje, para relaciones de precios de 9 y 5, respectivamente.

La respuesta a 16 kg de P fue en promedio de 160 kg ha⁻¹ para los suelos con $\text{BK} \geq 11,5$ mg de P kg⁻¹. La eficiencia para el rango de 5 a 11,5 mg de P kg⁻¹ varió en forma aproximadamente lineal de 42 a 10 kg trigo kg P⁻¹.

Las interacciones N-P estuvieron relacionadas con la materia orgánica del suelo y el ciclo del trigo. El P aplicado potenció el efecto del nitrógeno (y viceversa), en mayor medida cuando los suelos fueron pobres en materia orgánica o cuando el ciclo del cultivo se acortó. En ambos casos esto implica que el aporte de los elementos nativos disminuyó, por menor sustrato mineralizable y/o tiempo de absorción (Ron, Loewy 1990).

La interacción siembra-macollaje fue función indirecta del pH. Valores menores que 6 estuvieron asociados con suelos más profundos, con mayor retención de agua y de zonas comparativamente más húmedas: en éstos, la interacción fue positiva. Lo inverso ocurrió en suelos con pH superiores. Cuando se usaron variedades de alto rendimiento, la

interacción se hizo más positiva.

La interacción triple fue menor en los suelos de textura gruesa y años secos. El aumento de dosis que implica las dos fracciones tuvo un efecto negativo en suelos con baja capacidad de retención hídrica y condiciones climáticas desfavorables. La relación con el ciclo debe ponderarse en conjunto con el efecto de las interacciones dobles.

d) Ejemplo para un suelo modal

Las isocuantas de la Figura 1 muestran las distintas fracciones de N a aplicarse para obtener un rendimiento de trigo determinado. La curvatura indica una interacción positiva entre épocas para este ejemplo, en particular cuando se usó la variedad de ciclo intermedio, con alto potencial relativo de rendimiento. Las variedades de ciclo corto tuvieron una interacción cercana a cero porque en ellas se estrechó el período entre las aplicaciones.

Las sendas de expansión marcan el óptimo económico, para cada rendimiento estimado. Los resultados aconsejan diferir una parte de la dosis al macollaje. El tamaño de esa fracción se regula en orden a condiciones climáticas, objetivos de calidad o aplicaciones posteriores.

Para el sudeste bonaerense se informan rendimientos superiores con aplicaciones a la siembra o divididas que al macollaje (García *et al.* 1998). Resulta tentadora la practicidad de una sola aplicación a la siembra. Sin embargo, ésta aumenta el

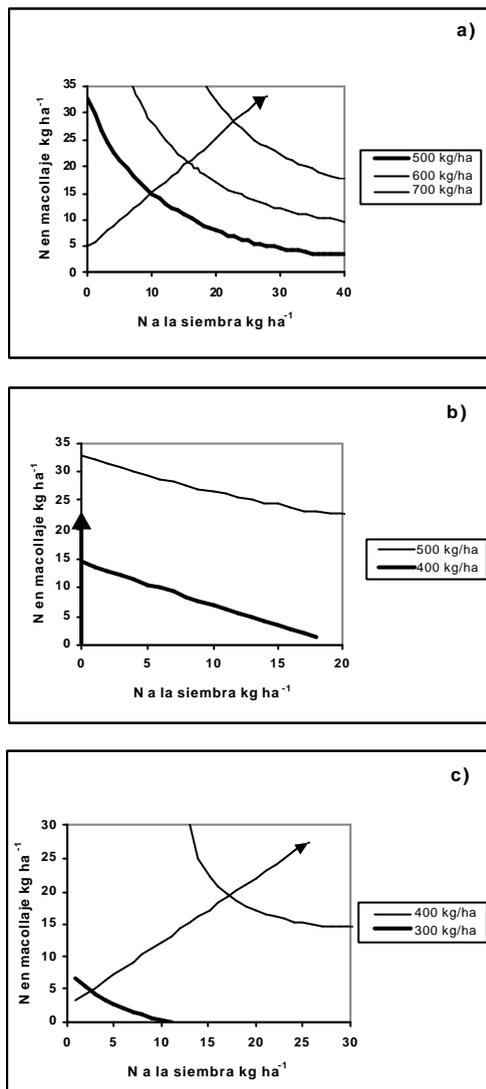


Figura 1. Fraccionamiento del N según niveles de respuesta predicha para cultivos de a) ciclo intermedio (Cochicó INTA), b) ciclo corto (Klein Chamaco) y c) ciclo largo (Chasicó INTA), en un suelo modal (MO:2,5%; pH:6,5 y BK:10 mg kg⁻¹). Las flechas indican las sendas de expansión.

Figure 1. N splits as related to predicted yield response for cultivars of a) intermediate cycle, b) short cycle (Klein Chamaco) and c) long cycle (Chasicó INTA), in a modal soil (MO: 2,5%; pH: 6,5 y BK: 10 mg kg⁻¹). The arrows indicate expansion paths.

riesgo ambiental. Por otra parte la posibilidad de cancelar o disminuir la fracción de macollaje es importante para una zona con

probabilidad errática de lluvias.

El comportamiento varietal a la fertilización operó principalmente por ciclo y potencial de rendimiento: materiales de menor ciclo y mayor productividad fueron más dependientes del fertilizante.

REFERENCIAS

BMDP Statistical Software Inc., 1992. BMDP Statistical Software Manual. BMDP. Los Angeles, CA.

Borghi B. 1999. Nitrogen as determinant of wheat growth and yield. In: Satorre E H y G A Slafer (Ed.) Wheat: Ecology and physiology of yield determination. Food Products Press, New York (USA) p. 67-84.

Colwell JD. 1994. Estimating fertilizer requirements. A quantitative approach. CAB International. Oxon. UK: 169-198.

García FO, Fabrizzi KP, Berardo A, Justel F. 1998. Fertilización nitrogenada del trigo en el sudeste bonaerense: respuesta, fuentes y momentos de aplicación. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Carlos Paz 4 al 7 de mayo de 1998 : 109-110.

Jaúregui MA, Sain GE. 1992. Continuous economic analysis of crop response to fertilizer in on-farm research. CYMMYT Economics Paper No. 3. Mexico, D.F. México. CYMMIT. p. 14-25.

Loewy T. 1990. Fertilización nitrogenada del trigo en el sudoeste bonaerense. I Respuesta física y diagnóstico. Ciencia del Suelo 9:47-56.

Loewy T, Ron MM. 1995. Nitrogen fertilization recommendations for wheat in southwestern Buenos Aires Argentina. Commun. in Soil Science and Plant Analysis 26: 2041-2050.

MSTAT-C. 1988. Microcomputer Program for the Design Management and Analysis of Agronomic Research Experiments. Michigan State University.

Ron MM, Loewy T. 1990. Fertilización fosfórica del trigo en el S.O. bonaerense. I Modelos de la respuesta. Ciencia del Suelo 8: 187-194.

Ron MM y Loewy T. 1996. Recomendaciones de fertilización fosfórica para trigo en suelos del S.O. bonaerense. Ciencia del Suelo 14:16-19.

Spiertz JHJ, De Vos NM. 1983. Agronomical and physiological aspects of the role of nitrogen in yield formation of cereals. Plant and Soil 75:379-391.

Vaughan B, Westfall DG y Barbarick KA. 1990. Nitrogen rate and timing effects on winter wheat grain yield, grain protein and economics. J. Prod. Agric. 3:324-328.