

Influencia de factores ambientales sobre el rendimiento y la respuesta a la fertilización del trigo en suelos trumaos¹

Víctor Volke H.²

INTRODUCCION

Durante el período 1966/67 a 1968/69 se efectuó una serie de experimentos de campo de respuesta del trigo (*Triticum aestivum* L.) a nitrógeno y fósforo en varios suelos trumaos de las provincias de Malleco y Cautín. Resultados de esta investigación se indican en dos publicaciones previas. Una de ellas se refiere a algunos de los principales factores de producción del trigo en estos suelos (Volke, 1972) y, la otra, a la respuesta a nitrógeno y a fósforo (Volke, 1973).

El presente estudio pretende complementar

dichas publicaciones, principalmente en cuanto a determinar la existencia de mayor número de factores de producción que los indicados previamente, y de aquéllos que modifican la respuesta del trigo a nitrógeno y fósforo aplicados como fertilizantes. El procedimiento seguido con este fin, fue establecer una relación matemática o ecuación general de regresión para expresar el rendimiento en grano como función del nitrógeno y fósforo aplicados, y de algunos factores del cultivar, del suelo, del manejo y del clima. Para establecer esta relación se usó el método propuesto por Cady y Allen (1972).

El número de experimentos usados para establecer dicha relación matemática fue de 42. Cabe aclarar que 42 sitios experimentales puede ser un número muy reducido para este tipo de estudios si es que existe un número relativamente grande de factores que afectan el rendimiento.

¹Recepción originales: 13 de marzo de 1974.

²Ing. Agr., M. S., Centro Suelos y Riego, Estación Experimental Carillanca, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chile. Actualmente en CIMMYT, Londres 40, México 6, D. F., México.
El autor desea expresar sus agradecimientos al CIMMYT por las facilidades otorgadas en cuanto a presupuesto para el procesamiento estadístico de los datos y al Ing. Jim Draper, del Centro de Estadística y Cálculo del Colegio de Postgraduados de Chapingo, quien colaboró en dicho procesamiento.

MATERIALES Y METODOS

Durante el período 1966/67 a 1968/69 (tres años) se cosecharon 47 experimentos de campo de respuesta del trigo a nitrógeno y fósforo distribuidos en varios suelos trumaos de las provincias de Malleco y Cautín.

Los experimentos comprenden los 13 tratamientos correspondientes a las combinaciones de cinco dosis de nitrógeno y de fósforo dadas por el diseño de tratamientos "cuadrado doble" (CIMMYT, 1967). Las dosis de nitrógeno usadas fueron de 0-50-100-150-200 Kg/ha, y las de fósforo de 0-100-200-300-400 Kg/ha como P_2O_5 , con excepción de que en ocho de los experimentos se usaron valores ligeramente inferiores. Las combinaciones de nitrógeno y fósforo correspondientes a los tratamientos del diseño cuadrado doble son las siguientes (el primer valor corresponde a la dosis de nitrógeno y el segundo a la de fósforo): 50-100, 50-300, 150-100, 150-300, 100-200, 0-200, 200-200, 100-0, 100-400, 0-0, 0-400, 200-0 y 200-400. Mayores antecedentes sobre los experimentos se indican en trabajos previos (Volke, 1972 y 1973).

Los suelos trumaos estudiados se agruparon en trumaos planos —suelos Victoria, Agua Fría y Vilcún— y trumaos de lomajes —suelos Santa Bárbara—. Antecedentes sobre estos suelos son indicados por el Instituto de Invest. de Recursos Naturales —CORFO (1964), la Sociedad Agronómica de Chile (1964) y Valdés (1969).

En el presente estudio se tomaron en cuenta además de los factores o variables experimentales —nitrógeno y fósforo aplicados como fertilizantes—, variables del cultivar, del suelo, del manejo y del clima.

Las variables del cultivar se refieren a la variedad de trigo: a) en el sentido de potencial de producción de la variedad —variedades de invierno, Cappelle Desprez, y de primavera, Chifén y Pumafén—, y b) en cuanto a infección de *Puccinia striiformis* West.

Las variables del suelo se pueden agrupar en aquéllas correspondientes a propiedades del suelo determinadas en el laboratorio y aquellas determinadas en el campo. Las primeras se determinaron a partir de una muestra de suelo por repetición (dos o tres repeticiones por experimento) —compuesta por cinco submuestras— tomada al momento de la siembra, a una profundidad de 0 a 17 cm. Estas variables fueron: pH en KCl 1 N, en relación suelo: solución de 1: 2,5 mediante electrodo de vidrio y calomelano; nitrógeno

total, por el método de Kjeldahl en la forma propuesta por Foster, citado por Thun *et al.* (1955); nitrógeno de incubación*, por el método de Keeney y Bremner (1966) en una muestra secada al aire; fósforo extractable, por el método de Olsen modificado por Schenkel *et al.* (1970); calcio, potasio y aluminio extractables, mediante el extracto Morgan en la forma propuesta por Hurtado (1962); y materia orgánica, mediante la mezcla crómico-sulfúrica según la técnica propuesta por Springer y Klee, citados por Thun *et al.* (1955). Las otras variables se refieren a profundidad (profundidad del suelo hasta un máximo de 1,00 m), drenaje y pendiente. Además de estas variables de suelo, se consideraron otras en función de la magnitud de la respuesta del trigo a nitrógeno y fósforo observada en los diversos suelos o grupos de suelos, de acuerdo con lo señalado por Volke (1973). Para el caso del nitrógeno se fijaron dos variables, S_1 y S_2 , y los suelos se agruparon en: a) Victoria y Agua Fría, b) Santa Bárbara, y c) Vilcún. En cuanto al fósforo, se fijó una variable, S_3 , y los suelos se agruparon en: a) trumaos planos, y b) trumaos de lomajes. Otras características del suelo, tales como textura, consistencia y porosidad, por su relación que pueden tener en cuanto ya fuere con la fertilidad del suelo, preparación del suelo, aireación, etc., se descartaron porque son bastante constantes en este tipo de suelos.

Entre las variables del manejo se incluyó: la infestación de chéptica (*Agrostis* sp.), durante todo el ciclo de desarrollo del cultivar, y de otras malezas, durante los diferentes estados del desarrollo de éste (estas últimas se controlaron en gran medida mediante herbicidas); la fecha de siembra y la rotación de cultivos en los últimos seis años anteriores a aquél del experimento; y la infección de *Ophiobolus graminis* Sacc. (la infección de *Ophiobolus* depende básicamente del manejo del suelo, en cuanto a la rotación de cultivos). Cabe hacer presente que no se presentó infestaciones de insectos.

Entre las variables del clima se incluyó la lluvia (se tomó lecturas diarias de lluvia en cada sitio experimental durante el ciclo de desarrollo del cultivar); el viento, por su relación con tendidura; y las heladas durante

*Al valor de nitrógeno de incubación se le sumó los valores de nitrógeno nítrico y amoniacal iniciales, y con este valor total se efectuó el análisis. Por este motivo se denominará a esta variable "nitrógeno extractable". En diez sitios experimentales el nitrógeno extractable se determinó en muestras de suelo con más de un año de tomadas o tomadas con posterioridad a la cosecha.

el estado de floración del cultivar. En relación con la lluvia, ella se consideró como un total desde la iniciación del estado de encañado del trigo hasta el de formación del grano en estado masoso.

Mayores detalles sobre las variables indicadas anteriormente, así como los valores de ellas y la importancia de algunas de ellas como factores limitantes de la producción del trigo en los suelos del área en estudio, son indicados en trabajos previos por Volke (1972, 1973).

Algunas de las variables consideradas en el presente estudio se descartaron del análisis de regresión. Ellas fueron: pH del suelo, por su escasa variación entre sitios experimentales; nitrógeno total del suelo, porque se encontró que el nitrógeno extractable presentaba mayor asociación con la respuesta observada al nitrógeno aplicado; pendiente del suelo, por tener una distribución deficiente entre sitios; viento en cuanto a tendidura y heladas durante la floración, por no contar con una medición satisfactoria en los experimentos en

que se presentaron, de tal modo que se decidió excluir estos experimentos del análisis de regresión (cinco experimentos); rotación de cultivos, porque sobre los factores que puede influir y que no se midieron —estado de la cama de semillas y aporte de nitrógeno en aquellos casos en que ella incluyese una leguminosa (*Trifolium pratense* L.)— aparentemente no lo hizo. En relación con la preparación de la cama de semilla, ella no parece ser muy importante, en forma directa, en este tipo de suelos de consistencia friable. En cuanto al aporte de nitrógeno, aparentemente éste no se produce, o sólo en un grado mínimo, porque los agricultores suelen sembrar trigo después del tercer año de sembrada la leguminosa, y ésta generalmente deja de producir ya al segundo año.

Los valores mínimo, máximo y promedio de las variables consideradas en el presente estudio, y la codificación de aquéllas usadas en el análisis de regresión, para el conjunto de los 42 sitios experimentales incluidos en éste, se indican en el Cuadro 1.

Cuadro 1 — Valores mínimo, máximo y promedio, y codificación de las variables incluidas en el presente estudio para el conjunto de los 42 sitios experimentales usados en el análisis de regresión.

Variable	Símbolo	Valor			Codificación*
		Mín.	Máx.	Prom.	
Rendimiento**: mínimo (qqm/ha)	Y	5,0	48,0	23,6	
máximo (qqm/ha)		33,2	77,9	54,4	
1. Variables experimentales:					
Nitrógeno aplicado (Kg/ha)	N	0	200	99	[(Kg/ha) /50] - 2
Fósforo aplicado, P ₂ O ₅ , (Kg/ha)	P	0	400	196	[(Kg/ha) /100] - 2
2. Variables del cultivar:					
Variedad de trigo:	V				
a) de invierno					+ 1
b) de primavera					- 1
Enfermedad:	E				
(<i>Puccinia striiformis</i> West.)					
a) no presente					0
b) presente					1
3. Variables del suelo:					
pH en KCl 1 N	pH	4,3	5,1	4,7	
Nitrógeno total (%)	N _t	0,22	0,90	0,57	
Nitrógeno extractable (ppm)	n	57	202	122	ppm/10
Fósforo extractable (ppm)	p	4,1	21,2	12,6	
Calcio extractable (ppm)	Ca	50	2250	1050	ppm/10
Potasio extractable (ppm)	K	70	390	149	ppm/10
Aluminio extractable (ppm)	Al	100	936	401	ppm/10
Materia orgánica (%)	O	5,5	17,4	12,3	
Profundidad (m)	R	0,40	1,00	0,86	

Variable	Símbolo	Valor			Codificación*
		Mín.	Máx.	Prom.	
<i>Drenaje:</i>	D				
a) bueno					0
b) deficiente					1
Pendiente (%)	I	1	6	2,7	
<i>Relación suelo-resp. a N:</i>					
1. a) suelos Victoria y Agua Fría	S ₁				+ 1
b) suelo Santa Bárbara					0
c) suelo Vilcún					- 1
2. a) suelos Victoria y Agua Fría	S ₂				0
b) suelo Santa Bárbara					+ 1
c) suelo Vilcún					- 1
<i>Relación suelo-resp. a P:</i>	S ₃				
a) suelos trumaos planos					+ 1
b) suelos trumaos de lomajes					- 1
<i>4. Variables del manejo:</i>					
Infestación de chéptica	M ₁	0	5	2	
Infestación de otras malezas	M ₂	0	10	4	
Enfermedad (<i>Ophiobolus graminis</i> Sacc.)	-	-	-	-	
<i>Fecha de siembra:</i>					
a) trigo de invierno		13/5	4/7	4/6	días/10 ⁺
b) trigo de primavera		22/8	10/10	21/9	días/10 ⁺
<i>5. Variables de clima:</i>					
Lluvia (mm)	L	109	469	280	mm/10
Heladas	-	-	-	-	
Viento-tendidura	-	-	-	-	

*Aquellas variables para las cuales no se indica codificación se usaron en sus unidades de medida originales.

**Los valores de rendimiento están expresados con un 15% de humedad aproximadamente.

⁺Días desde el 13 de mayo, primera fecha de siembra.

Como paso previo para el análisis de regresión, se efectuó un análisis de varianza para cada experimento con el fin de observar si existía efecto de tratamientos, o sea de nitrógeno y/o de fósforo aplicados, sobre el rendimiento a nivel de sitio experimental. Este análisis indicó un efecto significativo de tratamientos, a un nivel de probabilidad de 0,01, en 40 de los 42 experimentos y a un nivel de 0,05, en los dos restantes. De acuerdo con esto, a continuación se efectuó un análisis de varianza para los 42 experimentos en conjunto, con la finalidad de observar si existía efecto de sitios y de interacción sitios por tratamientos sobre el rendimiento, en la forma propuesta por Laird y Cady (1969). Este análisis de varianza indicó efecto de sitios y de interacción sitios por tratamientos a un nivel de probabilidad de 0,01. De lo cual se desprende

que: a) existen variables de sitio que afectaron el rendimiento, y b) el efecto del nitrógeno y/o del fósforo aplicados fue diferente entre sitios. Por lo tanto, se continuó con el análisis de regresión.

El análisis de regresión se efectuó con las medias de rendimiento por tratamiento, contándose con un número de 546 medias (42 experimentos con 13 medias de rendimiento cada uno). Además, también se trabajó con las medias para aquellas variables independientes en que se contaba con valores por repetición (variables de suelo determinadas en laboratorio). Para incluir estas variables en el análisis de regresión se exigió que mostrasen una suficiente mayor variación entre sitios que dentro de sitios. Esto se observó mediante un análisis de varianza.

El procedimiento seguido en el análisis de

regresión para seleccionar las variables independientes de la ecuación general de regresión se basó en el criterio de la "suma de cuadrados de predicción", SCP, dado por Allen (1971) y según lo indican Cady y Allen (1972). En el presente caso se utilizó el criterio en cuestión para las 546 medias de rendimiento en un solo grupo.

Las variables independientes incluidas en el análisis de regresión fueron aquellas correspondientes a nitrógeno y fósforo aplicados, y las variables del cultivar, del suelo, del manejo y del clima indicadas en el Cuadro 1, excepto aquellas que se descartaron del análisis según se indicó previamente. El nitrógeno y fósforo aplicados se incluyeron en un modelo cuadrático (términos lineales, cuadráticos y de interacción) y en sus interacciones con las variables del suelo, del manejo y del clima que tuviesen algún posible significado agronómico y no puramente casual. Al respecto, se utilizó un modelo cuadrático para nitrógeno y fósforo aplicados por su facilidad de manejo. Sin embargo, se reconoce que de los modelos cuadrático, raíz cuadrada y combinaciones de ambos para los dos factores, aquel cuadrático para nitrógeno y raíz cuadrada para fósforo muestra una ligera superioridad sobre el cuadrático a nivel de experimentos. Las variables del cultivar, del suelo, del manejo y del clima se incluyeron en sus términos lineales o lineales y cuadráticos, de acuerdo con el tipo de efecto esperado, y en aquellos correspondientes a interacciones entre ellas que contasen también con algún posible significado agronómico.

El modelo final de la ecuación general de regresión correspondió a aquél que dio la SCP menor.

RESULTADOS Y DISCUSION

La ecuación general final de regresión, que expresa el rendimiento como función de las variables nitrógeno y fósforo aplicados, y variables del cultivar, del suelo, del manejo y del clima, es la siguiente*:

$$Y = - 33,654 + 7,801 N + 6,957 P - 2,036 N^2 - 2,039 P^2 + 1,799 NP - 0,4792 Nn + 0,1274 Np + 3,518 ND - 0,1085 NnS_1 - 0,0952 NnS_2 + 0,0966 N^2n + 0,0399 N^2nS_1 + 0,0119 N^2nS_2 + 0,0894 Pn - 0,3223 Pp$$

*La identificación y codificación de las variables está dada en el Cuadro 1.

$$\begin{aligned} & - 0,0872 PpS_3 + 0,0523 P^2p - 0,1001 NPn \\ & + 20,981 V - 4,858 E + 1,242 n - 0,0249 n^2 \\ & + 3,217 p - 0,1109 p^2 + 0,4279 K - 0,1341 O \\ & + 14,767 R - 3,930 M_1 - 1,282 VF + 0,1313 \\ & VF^2 + 1,993 L - 0,0147 L^2 - 1,110 VO \\ & - 0,0621 VL + 1,753 OR - 0,8899 RL \dots \\ & \dots R^2 = 0,910 \end{aligned}$$

La ecuación de regresión indica efecto sobre el rendimiento de: a) nitrógeno y fósforo aplicados en sus términos lineales, cuadráticos y de interacción, y en interacciones de ellos con algunas variables del suelo, y b) variables del cultivar, del suelo, del manejo y del clima en sus términos lineales y, para algunas de ellas, en sus términos cuadráticos y/o de interacción con las variables nitrógeno y fósforo aplicados o entre ellas mismas. El coeficiente de determinación múltiple de la ecuación de regresión ($R^2 = 0,910$) indica que las variables que incluye explican el 91% de la variación del rendimiento.

La reducción de la SCP que hace cada variable independiente incluida en la ecuación general de regresión, está indicada en el Cuadro 2. A partir de la magnitud de ella para

Cuadro 2 — Variables independientes incluidas en la Ecuación General de Regresión y sus correspondientes sumas de cuadrados de predicción, SCP.

Variable independiente (símbolo)*	SCP	Variable independiente (símbolo)*	SCP
O	121.955,0	Np	17.827,7
V	94.486,0	p	17.143,9
P	71.291,0	p ²	16.324,6
N	56.331,0	OR	15.701,9
M ₁	48.507,5	RL	14.870,0
R	39.426,8	(Media)	14.484,6
VO	33.231,8	NPn	14.148,0
P ²	29.384,2	VF	13.852,8
L	28.184,5	n ²	13.690,8
NnS ₂	26.953,6	NnS ₁	13.518,7
N ²	25.783,4	P ² p	13.474,6
n	24.815,9	E	13.430,9
NP	23.848,6	L ²	13.318,2
Nn	22.965,0	Pn	13.286,0
VF ²	22.052,0	VL	13.271,2
K	21.140,4	N ² nS ₂	13.266,4
Pp	20.261,3	N ² n	13.240,6
PpS ₃	19.309,2	N ² nS ₁	13.221,6
ND	18.517,2		

*La identificación de las variables está dada en el Cuadro 1.

cada variable, puede deducirse la importancia relativa de éstas desde el punto de vista de explicar mayor o menor variación del rendimiento.

Antes de continuar con el análisis de la ecuación de regresión, cabe aclarar que para algunas de las variables incluidas en ella no existió una distribución totalmente satisfactoria dentro del correspondiente espacio de exploración. Por ejemplo, se contó con un número muy reducido de experimentos dentro de algunos de los grupos de suelos en que ellos se dividieron para estudiar diferencias de respuesta a nitrógeno y fósforo aplicados entre ellos. Por otra parte, existió un grado de asociación relativamente alto entre varias de las variables independientes en sus términos lineales, esto sin considerar los grados de asociación más altos observados entre los términos lineales, y cuadráticos y/o de interacción para una misma variable. Tal fue el caso, por ejemplo, entre las variables contenidos de nitrógeno y fósforo extractables del suelo, y contenido de materia orgánica del suelo, cuyos coeficientes de correlación fueron ambos de 0,67; o, entre contenido de materia orgánica y profundidad del suelo, con un coeficiente de correlación de 0,58. Estos dos puntos del estudio en cuestión, y especialmente el primero, están relacionados con aquéllo indicado previamente, acerca de las limitaciones que presentan este tipo de estudios cuando no se cuenta con un número suficientemente elevado de experimentos en concordancia con el número de factores que afectan el rendimiento.

El efecto de los fertilizantes nitrogenados y fosfatados sobre los cultivos en general, en los suelos estudiados, es un hecho conocido. Ello se indica, para el caso del trigo, en varios trabajos ya publicados (Frias, 1967; Letelier *et al.*, 1961; Volke, 1972 y 1973). En el presente trabajo se dará énfasis acerca de las interacciones entre nutrientes aplicados y variables del cultivar, del suelo, del manejo y del clima.

Las interacciones entre los términos lineales y/o cuadráticos y/o de interacción de nutrientes aplicados y variables ya sea del cultivar, del suelo, del manejo o del clima indican que estas variables modifican la respuesta de los cultivos a los nutrientes en cuestión. En el presente caso se observó que sólo algunas variables de suelo interaccionaron con las variables nitrógeno y fósforo aplicados, o sea, modificaron la respuesta del trigo a estos nu-

trientes. De dichas interacciones son particularmente interesantes:

1. Aquéllas con los respectivos contenidos extractables de ambos nutrientes en el suelo, negativas respecto a los términos lineales de nitrógeno y fósforo aplicados y positivas respecto a los términos cuadráticos de estos nutrientes. Estas interacciones indican una relación inversa decreciente entre el contenido del nutriente en el suelo y la respectiva respuesta del trigo al nutriente aplicado como fertilizante, como era de esperar.

2. Aquéllas con las respectivas variables del suelo usadas para determinar si existía diferencia de respuesta entre grupos de suelos, S_1 y S_2 para el caso de nitrógeno y S_3 para fósforo. De estas interacciones se desprende que los diferentes grupos de suelos considerados difieren en la respuesta tanto a nitrógeno como a fósforo aplicados, a igualdad de contenidos del respectivo nutriente extractable del suelo.

Las demás interacciones corresponden a:

1. Aquellas positivas entre nitrógeno y fósforo aplicados, y fósforo y nitrógeno extractables del suelo, respectivamente. Ellas indican mayores respuestas a nitrógeno y fósforo aplicados a contenidos mayores de fósforo y nitrógeno extractables, respectivamente.

2. Aquella positiva entre nitrógeno aplicado y drenaje del suelo. Ella indica una mayor respuesta a nitrógeno aplicado en suelos con drenaje deficiente.

3. Aquella negativa entre el término de interacción entre nitrógeno y fósforo aplicados, y nitrógeno extractable. Ella indica una menor interacción entre nitrógeno y fósforo aplicados a medida que aumenta el nitrógeno extractable del suelo.

De acuerdo con las interacciones entre el nitrógeno aplicado, y el nitrógeno extractable del suelo y las variables de suelo usadas para estudiar la diferencia de respuesta entre grupos de suelos, se tiene que, existiría respuesta del trigo al nitrógeno aplicado: 1) hasta alrededor de 160 ppm de nitrógeno extractable en los suelos Victoria y Agua Fría; 2) hasta alrededor de 180 ppm en el suelo Santa Bárbara, y 3) hasta más de 202 ppm en el suelo Vilcún (valor máximo observado en este suelo), probablemente hasta alrededor de 390 ppm. Según esto, el trigo presentaría mayor respuesta a nitrógeno aplicado, a contenidos similares de nitrógeno extractable, en el suelo Vilcún que en los suelos Victoria, Agua Fría y Santa Bárbara. Esto último con-

cuerda con lo señalado por Volke (1973). A su vez, ella sería ligeramente superior en el suelo Santa Bárbara sobre aquella observada en los suelos Victoria y Agua Fría.

La diferencia de respuesta del trigo a nitrógeno en los diferentes grupos de suelos estudiados resulta difícil de explicar en base a la información contenida en el presente trabajo. Al respecto, cabe hacer presente que la diferencia entre los suelos Santa Bárbara, Victoria y Agua Fría podría ser de tipo casual, pues este último grupo de suelos contó con un número reducido de localidades experimentales. En cuanto a la mayor respuesta observada en los suelos Vilcún, sí podría aceptarse como verdadera, de acuerdo con su magnitud y a lo que suele observarse en el campo en este tipo de suelos, precisamente una mayor respuesta a nitrógeno. Una causa probable de esta mayor respuesta podría estar relacionada en parte con el menor drenaje que parecen presentar. Esto queda confirmado en cierta medida, por el hecho de que en tres localidades, correspondientes al suelo Santa Bárbara (experimentos 8 y 11) y al suelo Victoria (experimento 39), en las cuales el suelo presentó un drenaje deficiente, el trigo mostró una mayor respuesta a nitrógeno. Por otra parte, cabe aclarar que, si bien en los suelos Victoria y Agua Fría el trigo presentaría cierta menor respuesta a nitrógeno que en el suelo Santa Bárbara —a igualdad de contenidos de nitrógeno extractable en el suelo— en general se observa que las necesidades de nitrógeno del cultivar en ellos son de mayor magnitud que en este último grupo de suelos. La causa de ello habría de residir en los menores contenidos de nitrógeno asimilable que presentarían los primeros, según se desprende de sus valores inferiores de nitrógeno extractable (Volke, 1972 y 1973).

En cuanto a la respuesta del trigo al fósforo aplicado, también difirió entre grupos de suelos, o sea, entre trumaos planos (suelos Victoria, Agua Fría y Vilcún) y trumaos de lomajes (suelo Santa Bárbara). En los suelos trumaos planos existiría respuesta a fósforo aplicado hasta alrededor de 26 ppm de fósforo extractable y en los suelos trumaos de lomajes hasta 36 ppm. La mayor respuesta a fósforo aplicado que se observa en estos últimos suelos concuerda con lo indicado por Volke (1973).

Al igual que para el caso del nitrógeno, la diferencia de respuesta del trigo a fósforo aplicado entre suelos resulta difícil de expli-

car. La mayor respuesta a fósforo observada en los suelos trumaos de lomajes Santa Bárbara sobre los suelos trumaos planos, puede asociarse con una mayor capacidad de fijación de fósforo en los primeros (Volke, 1973). Sin embargo, esta propiedad del suelo es consecuencia de alguna o algunas otras características del mismo. Probablemente, algunas de ellas sean el contenido de alofano y de aluminio activo. Sin embargo, en cuanto al aluminio activo, aunque sería mayor en los suelos trumaos de lomajes —el valor promedio de aluminio extractable es de 491 ppm en estos últimos y de 256 ppm en los trumaos planos— no se encontró efecto del aluminio extractable sobre la respuesta a fósforo.

La relación entre rendimiento del trigo, y nitrógeno y fósforo aplicados se indica en la Figura 1 como una superficie de respuesta. Esto se hace a contenidos medios de nitrógeno y fósforo extractables del suelo, 122 y 12,6 ppm, respectivamente, como también de las demás variables. La respuesta del trigo a dichos contenidos de nitrógeno y fósforo extractables del suelo alcanza aun a alrededor de 205 y 350 Kg de nitrógeno y de fósforo/ha, respectivamente, con un efecto promedio de ambos nutrientes de 13 y 17 qqm de grano/ha, respectivamente.

Por otra parte, es interesante señalar que no se observó interacción entre nitrógeno y fósforo aplicados, y variedad de trigo y lluvia. El que no se haya observado la primera interacción indicaría que las variedades de invierno y de primavera presentarían respuestas, y por tanto necesidades, similares de nitrógeno y de fósforo, o, que no se trabajó a un nivel de precisión suficiente como para detectar diferencias. Además, que la oportunidad de aplicación de ambos nutrientes, de acuerdo con la variedad (de invierno y de primavera), sería adecuada*. En cuanto a la segunda interacción, se esperaba que la hubiese, por lo menos, respecto a nitrógeno aplicado. La no existencia de ella, puede interpretarse en parte, en el sentido de que la sequía se presentó más bien tardíamente, cuando las necesidades de nitrógeno y de fósforo de la planta habrían estado, en gran medida, ya satisfechas.

Las variables del cultivar, del suelo, del manejo y del clima que afectaron al rendi-

*Para el trigo de invierno el nitrógeno se aplicó una tercera parte en la siembra y el resto durante el macollaje. Para el trigo de primavera se aplicó todo en la siembra. En cuanto al fósforo se aplicó todo en la siembra para ambas variedades.

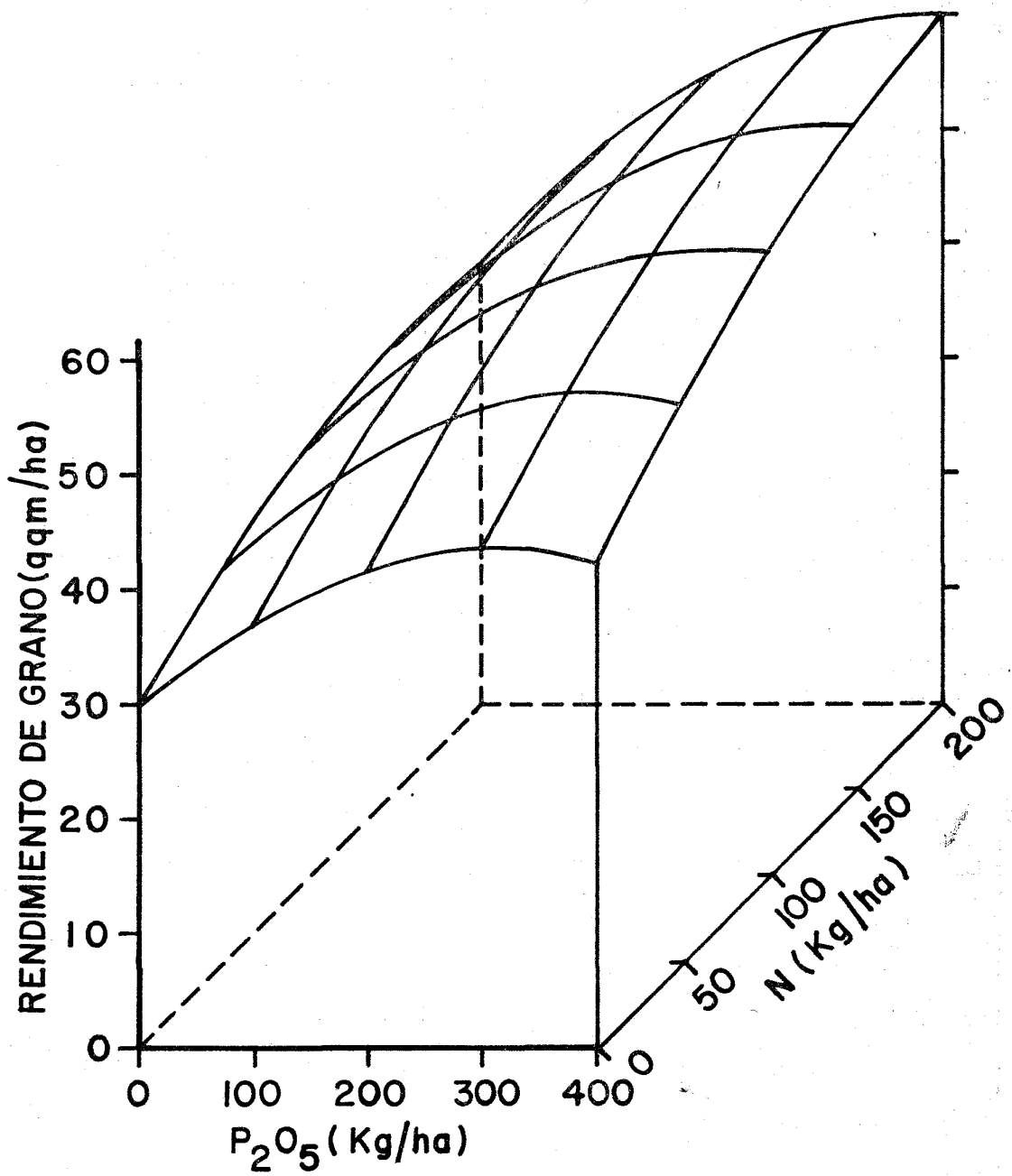


Figura 1 — Superficie de respuesta del trigo a nitrógeno y fósforo aplicados, a valores medios de nitrógeno y fósforo extractables del suelo y de los demás factores del cultivar, del suelo, del manejo y del clima que afectaron el rendimiento.

miento en forma directa (efectos lineales y cuadráticos) fueron:

1. *Variables del cultivar*: la variedad —la variedad de invierno, Cappelle Desprez, mostró tener un potencial de rendimiento mayor que las de primavera, Chifén y Puma-fén—; y la infección de *Puccinia struiformis* West., mediante un efecto negativo.
2. *Variables del suelo*: los contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio extractables; el contenido de materia orgánica; y la profundidad. Todas, excepto la materia orgánica, mediante un efecto lineal positivo y, además decreciente, para nitrógeno y fósforo extractables. En cuanto a la materia orgánica, se observó que su signo negativo se debe a la presencia del término correspondiente a su interacción con profundidad del suelo.
3. *Variables del manejo*: la infestación de chéptica y la fecha de siembra, ambas en forma negativa, lineal para la primera, y lineal y cuadrática para la segunda.
4. *Variables del clima*: lluvia total desde la iniciación del estado de encañado del trigo hasta el de formación del grano en estado masoso, mediante un efecto positivo decreciente.

De las variables del cultivar, del suelo, del manejo y del clima que afectaron el rendimiento de acuerdo con el presente estudio y señaladas anteriormente, con excepción del contenido de potasio extractable del suelo y la fecha de siembra, todas ellas se habían identificado como factores de producción del trigo en el área y suelos estudiados según lo indica Volke (1972).

En relación con el potasio extractable del suelo, se observa que presentó un efecto lineal positivo sobre el rendimiento, según se señaló previamente. Al respecto cabe aclarar que el espacio de exploración de esta variable fue muy reducido, de tal modo que sólo se observó efecto lineal de ella.

En cuanto a la fecha de siembra, ella presentó un efecto negativo de tipo cuadrático sobre el rendimiento, el cual difirió entre variedades, según lo indica la correspondiente interacción (variedad por fecha de siembra). Dicho efecto negativo fue mayor para las variedades de primavera que para las de invierno, dentro de las fechas límites estudiadas y a

partir de la fecha de siembra más temprana para cada variedad.

La ecuación de regresión incluye cuatro interacciones entre algunas variables del cultivar, del suelo y del clima, además de aquella entre fecha de siembra y variedad. Ellas son: 1) interacción negativa entre variedad y el contenido de materia orgánica del suelo, 2) interacción negativa entre variedad y lluvia, 3) interacción positiva entre el contenido de materia orgánica del suelo y la profundidad del suelo, y 4) interacción negativa entre la profundidad del suelo y lluvia.

La interacción negativa entre variedad y el contenido de materia orgánica del suelo se ha de interpretar en el sentido de que un menor contenido de materia orgánica afecta en mayor grado el rendimiento de las variedades de primavera que de las de invierno, según lo indica Volke (1972). La interpretación de esta interacción no es posible a la luz del presente estudio. Al respecto, cabe señalar que no fue posible demostrar que ella estuviese relacionada con la humedad del suelo.

La interacción negativa entre variedad y lluvia significa que el efecto negativo de la lluvia —por déficit— sobre el rendimiento es de mayor magnitud en las variedades de primavera que de invierno. Esto podría interpretarse en base a que las variedades de invierno son sembradas lo suficientemente antes que las de primavera como para lograr desarrollar un sistema radicular más extenso y profundo, debido a lo cual el efecto de la escasez de lluvia sobre ellas es de menor magnitud.

La interacción positiva entre el contenido de materia orgánica del suelo y la profundidad del mismo, resulta difícil de explicar en base de los presentes datos experimentales.

La interacción negativa entre profundidad del suelo y lluvia indica que a medida que aumenta la profundidad del suelo, hasta 1,00 m (valor máximo considerado), decrece el efecto negativo de la lluvia sobre el rendimiento. Esto es perfectamente comprensible en un área en la cual la humedad es más o menos limitante.

La representación gráfica de las relaciones existentes entre el rendimiento y las variables que lo afectan se logra, de acuerdo con la ecuación general de regresión, dando valores a la variable en cuestión, dentro del espacio de exploración observado, y los valores medios u otros a las demás variables.

Además de las variables estudiadas en el

presente trabajo e identificadas como factores de producción del trigo, existen otros factores de producción del trigo en el área y suelos estudiados, según lo señala Volke (1972). Ellos se refieren a: 1) el viento, por tendidura; 2) las heladas durante la floración del trigo, y 3) la infección de *Ophiobolus graminis* Sacc. Por otra parte, desde el punto de vista del agricultor también existen otros factores de producción, a saber: 1) la infestación de malezas diferentes a chépica, cuyo efecto sobre el rendimiento no se estimó en el presente trabajo, pues ellas se controlaron mediante herbicidas, y 2) las bajas cantidades de fertilizantes nitrogenados y fosfatos que la mayoría usaba hasta al menos 1968, según lo señala Volke (1972).

Un objetivo final de generar una ecuación general de regresión que exprese el rendimiento como función de nutrientes aplicados, y de variables del cultivar, del suelo, del manejo y del clima, es el de diagnosticar las necesidades de fertilizantes del cultivar. Dichas necesidades estarán determinadas por la magnitud de la respuesta del cultivar a los fertilizantes, de acuerdo con las variables o factores del suelo, del manejo y del clima de cada sitio en particular que modifican dicha respuesta. Estas variables corresponden a aquellas con las cuales los nutrientes aplicados

presentan interacciones, según se señaló anteriormente. En este sentido, cabe hacer presente que si bien las necesidades de fertilizantes del cultivar están determinadas por aquellos factores que modifican la respuesta a ellos, también lo están, en forma indirecta, por aquellos factores que limiten los rendimientos. Pues cuando estos últimos son muy reducidos, no será posible hacer recomendaciones de fertilizantes altas aunque así resultaren de acuerdo con las respuestas observadas a ellos. Al respecto, son de especial interés aquellos factores modificables importantes, como ser: la infestación de chépica, y de otras malezas cuando no se controlan mediante herbicidas; fecha de siembra; enfermedades fungosas, desde el punto de vista de no usar una variedad resistente o usar una rotación inadecuada (aspecto importante en la magnitud de la infección de *Ophiobolus graminis* Sacc.), según lo señala Volke (1972), etc. En cuanto a la incidencia sobre el rendimiento de factores inmodificables, como ser: escasez de lluvias, vientos, heladas durante la floración, son de naturaleza impredecible. Aunque para el caso de vientos, su efecto depresivo a través de la tendidura que causa, puede verse reducido o evitado mediante el uso de variedades de menor altura que aquellas usadas en la presente investigación.

RESUMEN

Mediante el presente estudio se intentó determinar aquellos factores del cultivar, del suelo, del manejo y del clima que afectan el rendimiento en grano del trigo (*Triticum aestivum* L.), y que modifican su respuesta a nitrógeno y fósforo, en algunos suelos trumaos de las provincias de Malleco y Cautín. El procedimiento seguido con este fin, fue establecer una relación matemática —ecuación general de regresión— que expresase el rendimiento como función de nitrógeno y fósforo aplicados, y de algunos factores del cultivar, del suelo, del manejo y del clima. Para esto se contó con 42 experimentos de respuesta del trigo a nitrógeno y fósforo. Los experimentos se basaron en un diseño de tratamientos "cuadrado doble" (5 dosis de cada nutriente y 13 tratamientos). Los suelos trumaos estudiados fueron: Santa Bárbara, Victoria, Agua Fría y Vilcún. El método usado para establecer la relación en cuestión, fue aquél basado en la "suma de cuadrados de predicción" propuesto por Cady y Allen.

La ecuación general de regresión presentó un coeficiente de determinación múltiple, R^2 , de 0,910. De acuerdo con ella, los factores que afectaron el rendimiento del trigo fueron: nitrógeno y fósforo aplicados como fertilizantes; la variedad de trigo; la infección de *Puccinia striiformis* West.; los contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio extractables del suelo; el contenido de materia orgánica del suelo; la profundidad del suelo; la infestación de chépica, *Agrostis* sp; la fecha de siembra; y la lluvia total desde la iniciación del estado de encañado del trigo al de formación del grano en estado masoso. Aquellos factores que modificaron la respuesta del trigo a nitrógeno y fósforo fueron: los contenidos de nitrógeno y fósforo extractables del suelo; y a nitrógeno: el drenaje del suelo. Por otra parte, se observó diferencia de respuesta

a nitrógeno y fósforo entre algunos de los suelos estudiados. No se encontró que la lluvia modificase la respuesta a nitrógeno o fósforo. Igual cosa ocurrió en cuanto a aluminio extractable del suelo.

SUMMARY

The objective of the present study was to determine those factors of the cultivar, soil, management and climate which: 1) affect the grain yield of the wheat (*Triticum aestivum* L.), and 2) modify the wheat response to nitrogen and phosphorous, in some "trumao" soils of Malleco and Cautin provinces (Chile). The way followed for this, was to establish a mathematic relationship —general regression equation— that expresses the yield as a function of applied nitrogen and phosphorous as fertilizers, and some cultivar, soil, management and climate factors. The data were obtained from 42 trials of wheat response to nitrogen and phosphorous. The trials were based on a treatment design "square double" (5 doses of each nutrient and 13 treatments). The trumao soils studied were: Santa Barbara, Victoria, Agua Fria y Vilcun. The method used for producing the general regression equation, was that based on the "prediction sum of squares" proposed by Cady and Allen.

The general regression equation achieved a coefficient of multiple determination, R^2 , of 0.910. According with it, the factors that affected the wheat yield were: nitrogen and phosphorous applied as fertilizers; the wheat variety; the infection of *Puccinia striiformis* West.; the extractable nitrogen, phosphorous and potassium contents of soil; the organic matter content of soil; the soil depth; the infestation of "chépica", *Agrostis* sp.; the planting date; and the total rainfall since the beginning of jointing wheat stage to soft-dough graing. Those factors that modified the wheat response to nitrogen and phosphorous were: the extractable nitrogen and phosphorous contents of soil; and to nitrogen: the soil drainage. Besides, differences of wheat response to nitrogen and phosphorous among soils were observed. It was found that the amount of rainfall and the aluminum content of soils did not modify the wheat response to nitrogen and phosphorous.

LITERATURA CITADA

- ALLEN, D. M. 1971. The prediction sum of squares as a criterion for selecting predictor variables. Technical Report 23, Dept. of Statistics, Univ. of Kentucky.
- CADY, F. B. and ALLEN, D. M. 1972. Combining experiments to predict future yield data. Agron. Jour. 64: 211-214.
- CENTRO INTERNACIONAL DE MEJORAMIENTO DE MAÍZ Y TRIGO. 1967. Informe 1966-67. México, D. F., México, pp. 85-93.
- CHILE. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE RECURSOS NATURALES-CORFO. 1964. Suelos, descripciones. Proyecto aerofotogramétrico CHILE/OEA/BID. Publicación Nº 2. Santiago, pp. 15, 342, 379-381.
- FRÍAS M., HERNÁN. 1967. Experimentos en los fundos sobre fertilización de trigo en Malleco y Cautín. 1966-1967. Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura. Departamento de Extensión Agrícola.
- HURTADO L., RICARDO. 1962. Potasio, nitrógeno y materia orgánica en suelos dedicados al cultivo de la alfalfa. Chillán, Chile. Universidad de Concepción. pp. 69. (Tesis Ing. Agr., mimeografiada).
- KEENEY, D. R. and BREMNER, J. M. 1966. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. Agron. Jour. 58: 498-503.
- LAIRD, R. J. and CADY, F. B. 1969. Combined analysis of yield data from fertilizer experiments. Agron. Jour. 61: 829-834.
- LETELIER A., ELÍAS, RUSSI S., ENRIQUE, POLLE O., ENRIQUE, SAN CRISTÓBAL N., ISABEL, BARAHONA S., JORGE, ROJAS U., OSCAR e INFANTE M., JOSÉ. 1961. Cien ensayos NPK en trigo. Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura, Departamento de Investigaciones Agrícolas. Boletín Técnico Nº 9.
- SCHENKEL S., GOTARDO, BAHERLE V., P., FLOODY A., T., y GAJARDO M., M. 1970. Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. I. Experiencia preliminar. Agricultura Técnica. (Chile). 30 (4): 173-187.
- SOCIEDAD AGRONÓMICA DE CHILE. 1964. Mesa redonda de suelos volcánicos. Publicación especial Nº 1. Valdivia, Chile.
- THUN, R., HERMANN, R. und NICKMANN, E. 1955.

- Die Untersuchung von boden. Dritte anlage. Berlin, Neumann Verlag. pp. 49-50.
- VALDÉS F., ALBERTO. 1969. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Chile. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica. pp. A. I. I. - A. I. 14.
- VOLKE H., VÍCTOR. 1972. Factores de producción del trigo en suelos trumaos de las provincias de Malleco y Cautín. Agricultura Técnica (Chile). 32 (4): 189-200.
- . 1973. Fertilización nitrogenada y fosfatada del trigo en suelos trumaos de las provincias de Malleco y Cautín. Agricultura Técnica (Chile). 33 (1): 6-15.