



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,  
A.C.  
México

Aceves-Ruiz, Ernesto; Turrent-Fernández, Antonio; Cortés-Flores, José I.; Volke-Haller, Víctor  
Cálculo del tratamiento óptimo económico de insumos agrícolas mediante un procedimiento numérico  
discreto

Terra Latinoamericana, vol. 23, núm. 2, abril-junio, 2005, pp. 249-256

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.

Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57323212>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# CÁLCULO DEL TRATAMIENTO ÓPTIMO ECONÓMICO DE INSUMOS AGRÍCOLAS MEDIANTE UN PROCEDIMIENTO NUMÉRICO DISCRETO

## Calculation of the Optimum Economic Treatment of Agricultural Inputs Using a Discrete Numeric Procedure

Ernesto Aceves-Ruiz<sup>1</sup>, Antonio Turrent-Fernández<sup>2‡</sup>, José I. Cortés-Flores<sup>3</sup> y Víctor Volke-Haller<sup>3</sup>

### RESUMEN

Con el propósito de reducir los costos de la generación de recomendaciones para el manejo de los cultivos, se propone un método en el que se realiza el modelaje de los niveles del óptimo económico de N, P, K y densidad de población (Dp) en el cultivo de maíz, mediante una aproximación binomial. Por cada factor de estudio, se seleccionaron cinco factores de diagnóstico, que minimizaran la discrepancia entre los niveles de los óptimos observados y los calculados mediante un modelo aditivo. El espacio de exploración y el incremento de los factores de diagnóstico se realizaron arbitrariamente y el proceso de selección involucró un gran número de corridas. Se usaron, como factores potenciales de diagnóstico, la materia orgánica, P disponible, Ca, Mg y K intercambiable, pH, índice de sequía e índice de enfermedad. Los niveles del óptimo observado y los valores de los factores incontrolables se obtuvieron de nueve experimentos de campo, conducidos entre 1993 y 1995.

**Palabras clave:** *Aproximación binomial, modelo aditivo discreto, maíz.*

### SUMMARY

Modelling economically optimum rates of N, P, K fertilizers and population density in maize by binomial approximation is tested in an effort to reduce the cost of developing recommendations for crop management. An additive model for five uncontrolled diagnostic factors that minimizes discrepancy between

computed and observed optimum rates was selected for each controlled factor. The selection process involved a large number of runs from arbitrarily selected factorial space and factor increment. Organic matter, available P, exchangeable Ca, Mg, and K, pH, drought index, and disease index were used as potential diagnostic factors. Nine field experiments conducted in years 1993 to 1995 provided both the observed optimum rates and values of the uncontrolled factors.

**Index words:** *Binomial approximation, discrete additive model, maize.*

### INTRODUCCIÓN

La investigación para generar tecnologías que involucren la optimización de prácticas de producción en México, en general, se realiza en terrenos de los productores, y se le conoce como método de campo (Laird *et al.*, 1993). Este método se ha utilizado como procedimiento de cotejo sobre el tiempo y el espacio, para medir las interacciones de los factores controlables e incontrolables de un cultivo, en una región específica. De esto se ha generado conocimiento, del cual se han derivado soluciones al manejo de los factores controlables, según la expresión de los factores incontrolables, las relaciones de precios insumo-producto y el capital disponible por el productor. Se han utilizado diversos enfoques para el diseño de recomendaciones, como: la agrupación indiscriminada, el método CP para el diseño de agrosistemas (Turrent, 1985), el método de la ecuación empírica generalizada (Estrella *et al.*, 1975; Villalpando *et al.*, 1979) y otros procedimientos (Peña *et al.*, 1975).

Un enfoque que ha recibido atención en México es el de la ecuación empírica generalizada (EEG). Este enfoque consiste en obtener una ecuación que relaciona el rendimiento con los factores controlables experimentales y los factores de suelo, clima y manejo que afecten el aprovechamiento y aporte del suelo y/o

<sup>1</sup> Campus Puebla, Colegio de Postgraduados. 72130 Puebla, Puebla, México.

<sup>2</sup> Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 56230 Chapingo, estado de México.

<sup>‡</sup> Autor responsable ([aturrent@att.net.mx](mailto:aturrent@att.net.mx))

<sup>3</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

modifiquen la respuesta del cultivo al nutrimento, de una serie de ensayos conducidos en una región determinada. Esta EEG permite estimar al tratamiento óptimo económico (TOE) de los factores de estudio para cada uno de los sitios experimentales, a través de la interacción de esos factores de estudio y los de sitio. No obstante el avance en el mejoramiento de este enfoque, aún hay ciertos problemas, como: 1) el cálculo de la EEG, respecto a las diferencias en los modelos de respuesta a escala de sitio experimental, 2) la casi-multicolinealidad que se presenta entre las variables de sitio que entran en el modelo, y 3) el alto costo del ejercicio, ya que éste requiere de una gran cantidad de experimentos de campo. Para solucionar una parte de este problema, Volke y Etchevers (1988) sugirieron que es práctico definir una función en la que el tratamiento óptimo de cada uno de los factores de parcela a escala de sitio experimental, se exprese como función de los factores de clima, suelo y manejo que los modifican. De estas funciones, se predecirían directamente las dosis óptimas de cada factor de parcela, a partir del conjunto de valores de los factores de sitio. Esta manera de generar los TOE factor por factor simplifica el problema del cálculo de la EEG; más no así, el problema del alto costo asociado a los experimentos de campo.

Turrent *et al.* (1994) propusieron un procedimiento numérico discreto, apoyado en el método de campo, para la generación de recomendaciones sobre prácticas de producción de una región. Este procedimiento reducirá, de manera sustantiva, el costo de generación de recomendaciones. Este método propone que el TOE de un factor de parcela puede aproximarse con un modelo aditivo-binomial, o bien, con un no-aditivo-binomial, que involucren a los factores de sitio.

Turrent *et al.* (1993), apoyados en información histórica sobre la respuesta del maíz al N, P, K y densidad de población y en principios “putativos”, elaboraron un manual de diagnóstico-prescripción para el cultivo de maíz en el estado de Puebla. Este manual es un diseño *a priori* que habría de ser validado. En este trabajo, se retomaron los factores de diagnóstico que se consideraron en el manual, además se incluyeron otros.

Los objetivos del presente trabajo son: 1) Analizar la factibilidad de reducir el número de experimentos de campo para la generación de TOE, mediante soluciones numéricas apoyadas en modelos aditivos, y 2) validar el manual de diagnóstico-prescripción para el cultivo de maíz del Estado de Puebla.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Kemphorne (1952) propuso el modelo aditivo (Ecuación 1) y el no-aditivo (Ecuación 2) para la realización de interacciones en los factoriales  $2^k$ . Turrent *et al.* (1994) propusieron que la dosis óptima económica (DOE) de factor de parcela, por ejemplo N, puede aproximarse con estos modelos para un conjunto factorial  $2^n$  agrosistemas definidos por  $f$  factores de sitio, en los que cada factor de sitio asume sólo dos valores: bajo o alto, es decir, se aproximan mediante una distribución binomial.

$$N_{ijk\dots n} = M + 1/2[\pm(A) \pm (B) \pm \dots \pm (F)] \quad (1)$$

$$N_{ijk\dots n} = M + 1/2[\pm(A) \pm (B) \pm (A*B) \pm \dots] \quad (2)$$

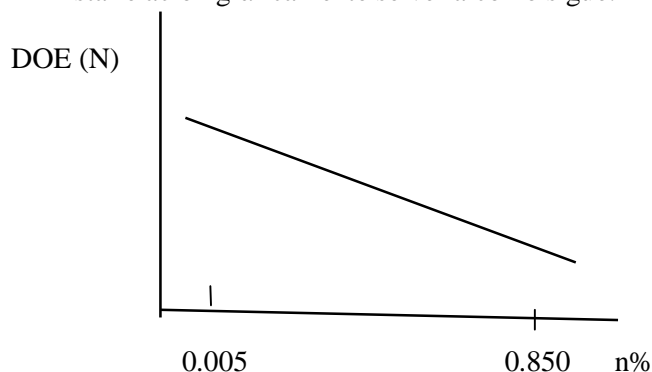
donde:  $N_{ijk\dots n}$  es el TOE calculado para un conjunto de agrosistemas; M es el TOE medio para el conjunto de agrosistemas; A es el efecto principal (EP) del primer factor de sitio sobre la DOE de N. Cuando el primer factor de sitio asume el valor bajo, el efecto principal de A es afectado por el signo negativo, y cuando asume el valor alto, el EP es afectado por el signo positivo; B es el EP del segundo factor de sitio sobre la DOE de N y F es el EP del  $F^{avo}$  factor de sitio sobre la DOE de N. Estos factores son afectados por el signo negativo o positivo, igual que el primer factor;  $A*B$  es la interacción entre los factores A y B sobre la DOE de N.

En el caso hipotético de que la DOE de N en una región dependiera sólo del contenido de N total del suelo,  $n$ , y que esta relación fuera lineal:

$$N_i = a + bn \quad (3)$$

donde: N es la DOE del fertilizante nitrogenado,  $n$  es el contenido de nitrógeno total del suelo, expresado en %,  $a$  es la ordenada al origen y  $b$  es la pendiente.

Esta relación gráficamente se vería como sigue:



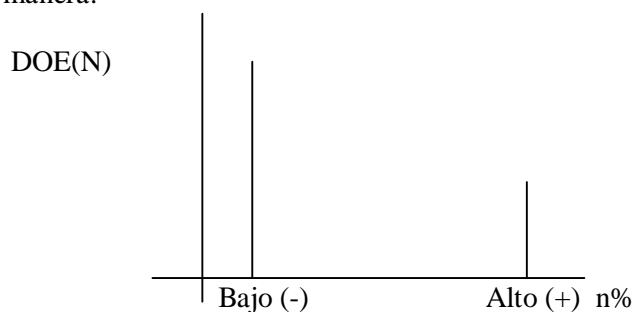
La relación anterior puede llevarse a una aproximación binomial, trinomial, tetranomial y pentanomial. Las Ecuaciones 1 y 2 únicamente son aplicables en el caso de aproximación binomial. Cuando se desee realizar las otras aproximaciones, los modelos deben ser modificados. En este ejercicio únicamente se realizará la aproximación binomial.

Para llevar la relación anterior a una aproximación binomial, puede usarse el modelo discreto binomial (Kempthorne, 1952) y, de esta forma, generar los dos agrosistemas: uno, con el valor bajo de  $n$  y, otro, con el valor alto de  $n$ , para lo cual, se requiere de imponer la condición de que si  $n \leq \bar{N}$ , entonces  $n = -1$ , y, si  $n > \bar{N}$ , entonces  $n = +1$ ; de esta forma se pasa de la variable  $n$  (cuantitativa) a la  $n$  binomial, que tiene dos valores posibles: -1 (bajo) y +1 (alto). Con esto la relación se transforma a:

$$N_i = a + bn \Rightarrow N_i = M + 1/2[\pm(N^*)] \quad (4)$$

donde:  $n$  puede asumir valores de -1 ó +1, cuando  $n$  es el valor bajo, se usa el signo negativo y, si  $n$  es alto, se usa el signo positivo;  $M$  es la media de la DOE de  $N$  de los dos agrosistemas;  $N^*$  es la diferencia entre  $N$  para el valor alto de  $n$  y  $N$  para el valor bajo de  $n$ .

Gráficamente, la relación se vería de la siguiente manera:



Considérese el caso hipotético en el que la DOE de nitrógeno,  $N$ , del maíz en una región, estuviera definida por la expresión:

$$N_{opkrcmsefd} \quad (5)$$

donde:  $N$  se expresa en  $\text{kg ha}^{-1}$ , el subíndice  $o$  representa al factor potencial de diagnóstico (FPD) contenido de materia orgánica de la capa arable, que puede asumir dos valores: -1 (bajo) y +1 (alto). El valor de  $o$  es bajo, cuando el contenido de materia orgánica es igual o inferior a la media de  $o$  en la región y es alto cuando lo rebase. El subíndice  $p$  representa al fósforo aprovechable en la capa arable, pudiendo también asumir los valores de -1 y +1;  $k$  representa al contenido de potasio intercambiable,  $r$  es el pH,  $c$  es el contenido de calcio intercambiable,  $m$  es el magnesio intercambiable,  $s$  es el índice de sequía,  $e$  es el índice de enfermedad,  $f$  es la fecha de siembra y  $d$  es la profundidad del suelo. Cada uno de estos FPD puede asumir dos valores dentro del modelo binomial: bajo y alto, según se define para el FPD de materia orgánica.

De la misma manera como para la DOE de  $N$ , puede haber expresiones para las DOE de los fertilizantes fósforo y potasio, y para la densidad de población.

Cuando se retoma el caso del nitrógeno: la Expresión 5 representa uno de los  $2^{10}$  valores exactos posibles de la DOE de  $N$ , para igual número de agrosistemas, definidos por la combinación específica de dos niveles y 10 propiedades del agrosistema. Si se conocieran los  $2^{10}$  valores exactos de las DOE de  $N$  para esos agrosistemas y considerando ahora al modelo empírico aditivo para calcular los estimadores adecuados de esas  $2^{10}$  DOE de  $N$  para maíz en la región, aquel quedaría como:

$$N_{opkrcmsefd} = \bar{N} + 1/2[\pm(O^*) \pm (P^*) \pm (K^*) \pm (R^*) \pm (C^*) \pm (M^*) \pm (S^*) \pm (E^*) \pm (F^*) \pm (D^*)] \quad (6)$$

donde:  $\bar{N}$  es la media de las DOE de  $N$  en los  $2^{10}$  agrosistemas posibles,  $O^*$ ,  $P^*$ ,  $K^*$ ,  $R^*$ ,  $C^*$ ,  $M^*$ ,  $S^*$ ,  $E^*$ ,  $F^*$  y  $D^*$  son los efectos principales de los siguientes FPD, sobre la dosis óptima económica de  $N$ : el contenido de materia orgánica, el contenido de fósforo en el suelo, el de potasio, del pH, del calcio intercambiable, del magnesio intercambiable, del índice de sequía; del índice de enfermedad, de la fecha

de siembra y de la profundidad del suelo, respectivamente.

Normalmente se desconoce los valores del vector  $\bar{N}$ ,  $O^*$ ,  $P^*$ ,  $K^*$ ,  $R^*$ ,  $C^*$ ,  $M^*$ ,  $S^*$ ,  $E^*$ ,  $F^*$ ,  $D^*$  para poder calcular los  $2^{10}$  valores de la DOE de N de los agrosistemas. Sin embargo, se puede, por un proceso iterativo (o de barrido) seleccionar, de un número muy grande de vectores arbitrarios, aquel que mejor aproxime al vector exacto, si es que se dispusiera de un criterio de selección.

El Cuadro 1 muestra un ámbito arbitrario de valores de  $\bar{N}$ ,  $O^*$ ,  $P^*$ ,  $K^*$ ,  $R^*$ ,  $C^*$ ,  $M^*$ ,  $S^*$ ,  $E^*$ ,  $F^*$ ,  $D^*$  que da origen a  $5^{11}$  vectores (48.8 millones de vectores) de posibles valores de los efectos principales, que surgen de la combinación de cada uno de sus valores. De este gran grupo de vectores considérese al primero:

$\bar{N} = 60$ ,  $O^* = 10$ ,  $P^* = 10$ ,  $K^* = 10$ ,  $R^* = 10$ ,  $C^* = 10$ ,  $M^* = 10$ ,  $S^* = 10$ ,  $E^* = 10$ ,  $F^* = 10$ ,  $D^* = 10$ .

Al operar este vector sobre la Expresión 6, se está en condiciones de generar las  $2^{10}$  posibles DOE de N, calculadas para ese primer vector. Si se dispusiera de los DOE de N observados en campo de cada uno de los  $2^{10}$  agrosistemas, se podría obtener las discrepancias entre las DOE calculados con el vector y las observadas en campo; estas discrepancias se podrían expresar en términos de la media y desviación estándar de esas discrepancias. La media de las discrepancias mide el sesgo de las DOE calculadas respecto a las observadas, en tanto que la desviación estándar de las discrepancias mediría la precisión de la estimación. Si se realizara este ejercicio para los  $5^{11}$  posibles vectores, algunos de ellos se aproximarían más a la combinación de media y desviación estándar igual a cero. La mejor solución será aquel vector que haga mínimo a esos dos valores simultáneamente.

El hecho de realizar el cálculo de la media y desviación estándar de las discrepancias sobre un número muy grande de observaciones,  $2^{10}$ , haría improbable que un vector al azar, esto es, que surgiera de una combinación de números al azar, se colara como una solución numérica aceptable. Obviamente, no se tiene acceso a un número grande de observaciones de DOE de N por lo caro del método de campo, pero sí se podría aspirar a acumular de 10 a 20 observaciones, las cuales seguirían siendo una barrera para que se colaran soluciones al azar. Si, en cambio,

**Cuadro 1. Lista de factores potenciales de diagnóstico y valores de los efectos principales por explorar, para la DOE de nitrógeno.**

Factor potencial de diagnóstico		Valores por explorar de los efectos principales				
		kg ha <sup>-1</sup>				
Media de N	$\bar{N}$	60	70	80	90	100
Materia orgánica	$O^*$	-10	-5	0	+5	+10
Fósforo aprovechable	$P^*$	-10	-5	0	+5	+10
Potasio intercambiable	$K^*$	-10	-5	0	+5	+10
Calcio intercambiable	$C^*$	-10	-5	0	+5	+10
Magnesio intercambiable	$M^*$	-10	-5	0	+5	+10
pH	$R^*$	-10	-5	0	+5	+10
Índice de sequía	$S^*$	-10	-5	0	+5	+10
Índice de enfermedad	$E^*$	-10	-5	0	+5	+10
Fecha de siembra	$F^*$	-10	-5	0	+5	+10
Profundidad del suelo	$D^*$	-10	-5	0	+5	+10

se tuviera una sola observación de DOE de N, se sabe intuitivamente que la probabilidad de que apareciera al azar una solución numérica aceptable, sería alta.

En la actualidad, con computadoras de alta capacidad, es posible realizar el ejercicio con  $5^{11}$  vectores. Esta tecnología electrónica permitiría reducir ampliamente el número de experimentos de campo necesarios para el diseño de recomendaciones. Sin embargo, con el modelo no-aditivo (Ecuación 2), se avanzaría más en precisión, pero el ejercicio de computación se incrementaría de manera amplia. Mientras que con el modelo aditivo, siguiendo el mismo ejemplo, tiene 11 elementos en el vector, en el modelo no-aditivo que incluye a las 55 interacciones de dos factores, además de los efectos principales; habría  $5^{66}$  vectores posibles, si por cada efecto principal se explorarían cinco valores posibles. Como puede apreciarse, el número de vectores y de elementos por vector que resulta es inmanejable para el estado actual de la tecnología electrónica. Este problema puede superarse, si se seleccionaran *a priori* un cierto número de interacciones, que agronómicamente tuvieran sentido, de tal forma que se limitara el número de vectores, por ejemplo, a  $5^{20}$ .

## Estrategia

Se dispuso de nueve experimentos (conducidos en 1993, 1994 y 1995) y 15 factores potenciales de diagnóstico (FPD), para este estudio, que son examinados agronómicamente en otra publicación (Aceves *et al.*, 2002).

Se supuso que el valor medio, observado de cada factor potencial de diagnóstico en los nueve experimentos, se aproximaba razonablemente a la media correspondiente de ese FPD en la región del Distrito de Desarrollo Rural de Cholula, Puebla. De esta manera, los mismos nueve experimentos se clasificaron en sus agrosistemas correspondientes, de acuerdo con la distribución binomial, suponiendo que todos los factores potenciales de diagnóstico eran factores de diagnóstico. En el Cuadro 2, se muestra esta clasificación.

Posteriormente, se seleccionaron cuatro o cinco factores de diagnóstico por factor de estudio. Esto se llevo a cabo realizando un análisis de regresión, con el procedimiento MAXR, entre las DOE de cada factor de estudio y los FPD, seleccionando los primeros cuatro o cinco factores que entraran al modelo. La selección de cuatro o cinco fue por que no se contaba con un equipo de cómputo capaz de procesar a todos los factores de diagnóstico.

A los factores seleccionados, se les asignó un ámbito arbitrario de exploración con 13 niveles o coeficientes. En el Cuadro 3, se presentan los factores potenciales de diagnóstico y el ámbito arbitrario de exploración de sus coeficientes para la DOE de N. El número posible de vectores arbitrarios de coeficientes es de  $11 \times 13^5 = 4'084,223$ . Nótese que entre los 13 niveles de cada FPD se incluye al valor 0,

para explorar la hipótesis de si el FPD es factor de diagnóstico o no.

Los mismos factores potenciales de diagnóstico y su ámbito arbitrario de exploración, se utilizaron para estimar la DOE de N de los dos genotipos de maíz. Para los casos de DOE de fósforo, potasio y densidad de población, se realizó el mismo proceso, pero con diferentes factores de diagnóstico. Los factores para DOE de fósforo fueron: P, O, acidez del suelo (A), índice de sequía (S) y índice de enfermedad (E); para DOE de potasio: O, K, índice de enfermedad (E), Y; para densidad de población: Y, E, A, FF, K.

Para realizar el proceso descrito anteriormente, se preparó un programa en lenguaje SAS, para que calculara de forma secuencial la DOE de N de cada vector en cada uno de los agrosistemas en que se incluían los nueve experimentos de campo. El mismo programa calculó la media y la desviación estándar de las discrepancias entre la DOE calculada con el primer vector de coeficientes y la DOE observada, en los  $11 \times 13^5 = 4'084,223$  vectores posibles.

**Primera etapa.** Se adoptó la táctica de realizar el proceso anterior tres veces; en cada uno de ellos, se separó al azar a uno de los nueve experimentos, es decir, una DOE de N observada. En cada uno de los procesos, se seleccionó a los mejores 500 vectores, por factor y variedad, que presentaran las menores medias y desviaciones estándar de las discrepancias

**Cuadro 2. Clasificación de nueve experimentos en agrosistemas de acuerdo con una distribución binomial de los factores de sitio.**

Experimento	GEN <sup>‡</sup>	Factores de sitio <sup>†</sup>														
		Y	P	Ca	M	K	A	R	O	Ar	I	T	FM	FF	S	E
PT93	C	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
	H	-1											-1	-1	+1	+1
PC93	C	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
	H	-1											+1	+1	+1	+1
HC93	C	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1
	H	+1											-1	-1	-1	+1
PC193	C	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
	H	+1											-1	-1	-1	-1
HX94	C	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
	H	+1											+1	+1	+1	+1
PC94	C	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
	H	-1											+1	+1	+1	+1
HT94	C	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1
	H	+1											+1	+1	-1	+1
HT95	C	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
	H	+1											+1	+1	-1	-1
PC95	C	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
	H	+1											+1	-1	-1	-1

<sup>†</sup> Y, P, Ca, M, K, A, R, O, Ar, I, T, FM, FF, S y E significan rendimiento de grano, fósforo aprovechable, calcio, magnesio potasio intercambiable, acidez del suelo, pH, materia orgánica, % de arena, % de limo, % de arcilla, días a floración masculina, días a floración femenina, sequía e índice de enfermedad, respectivamente. <sup>‡</sup> C = criollo, H = híbrido, H-137.

**Cuadro 3** Lista de factores de diagnóstico para la DOE de N y su ámbito arbitrario de exploración.

Factor de diagnóstico		Ámbito arbitrario de exploración												
		kg ha <sup>-1</sup>												
Media de N	$\bar{N}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200		
Materia orgánica	O	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Sequía	S	-40	-45	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
Días a floración femenina	FF	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
Arcilla, %	T	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
Calcio intercambiable	C	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30

entre las ocho DOE calculados y las ocho DOE observados. De esta manera, al final de los tres procesos, se disponía de 1500 vectores para la DOE (N) en ambas variedades. El mismo proceso se repitió para las DOE de P, K y D, para ambas variedades.

**Segunda etapa.** Los 1500 vectores, seleccionados por cada factor y variedad en la primera etapa, se utilizaron para realizar una nueva corrida, ahora con los tres experimentos eliminados previamente al azar. De éstos se seleccionó al vector de coeficientes que generara la menor media y desviación estándar de las discrepancias entre la DOE calculada y la DOE observada. Los valores de cada uno de los elementos del vector constituyen los coeficientes de los factores de diagnóstico que se utilizarían en la región de estudio para generar las DOE de los factores N, P, K y D, en ambas variedades.

**Tercera etapa.** El mejor vector de la segunda etapa se utilizó para realizar una nueva corrida con los nueve experimentos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar la segunda etapa del proceso, se encontraron varios vectores con la misma media y desviación estándar de discrepancias. Esto fue más severo en el caso del nitrógeno y fósforo. Se decidió realizar la tercera etapa con los vectores que presentaran la misma media y desviación estándar, y que, además, presentaran consistencia agronómica. Continuó presentándose el problema únicamente para el caso de la densidad de población en el genotipo criollo.

En el Cuadro 4, se presentan los mejores vectores para los factores N, P, K y D de las dos variedades, además de su media y desviación estándar correspondiente. Si se toma de este cuadro al vector de la DOE de nitrógeno para el genotipo criollo, este vector corresponde al modelo aditivo:

$$N_{\text{osfftc}} = 120 + 1/2[\pm(-40) \pm (-25) \pm (-20) \pm (-30) \pm (10)]$$

En este caso, se tiene que la O, T, S y FF en los sitios donde se encuentra a valores bajos incrementan la DOE de N, en tanto que donde se encuentra a valores altos lo disminuyen. La O presenta este efecto sobre la DOE de N, debido a que ésta es un gran reservorio de nitrógeno y, por lo tanto, al encontrarse a valores altos, proporciona mayor cantidad de nitrógeno. El contenido alto de arcilla, debido a las cargas que presentan en su superficie, favorece la fijación del nitrógeno, principalmente en forma de amonio, y lo libera lentamente, evitando, de esta forma, pérdidas de éste por lixiviación y volatilización. La sequía provoca que la planta disminuya su actividad metabólica, por lo que disminuye la absorción de nutrientes. Todo lo anterior es agronómicamente consistente. En cuanto a la variable FF, de acuerdo con el modelo, su efecto es contradictorio, ya que a valores bajos incrementa la DOE de N y a valores altos la disminuye, para lo cual no hay una explicación clara, sin embargo, su efecto probablemente se deba a que es una variable “proxy”, es decir, que ésta refleja el efecto de otra variable que no se evaluó en el presente estudio, pero esto con la información con que se cuenta no se puede demostrar.

En el Cuadro 4, puede apreciarse que el procedimiento numérico y de barrido, con los factores de diagnóstico seleccionados, sobreestima las DOE de N y P (la discrepancia media es mayor que cero), mientras que, para el K y la D, las subestima (la discrepancia media es menor que cero), en ambos genotipos. El mejor modelo obtenido muestra una desviación estándar de 33.6 kg ha<sup>-1</sup> de N en cada DOE calculada para el maíz criollo; en cambio, la desviación estándar es de 13.2 kg ha<sup>-1</sup> de N en el caso del H-137.

En el mismo Cuadro 4, puede apreciarse que la materia orgánica (O), juega un papel importante en el

**Cuadro 4.** Lista de los vectores seleccionados, con su media (MED) y desviación estándar (D. EST.) de las discrepancias de los tratamientos óptimos económicos observados y calculados.

Factor de diagnóstico	Vectores seleccionados por nutrimento y genotipo							
	N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O		D	
	C	H	C	H	C	H	C	H
O	-40	-45	-10	-15	-5	-10	-10	-5
S	-25	-30	-25	-10	-	-	-	-
P	-	-	0	0	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-25	-40	10	-15
FF	-20	0	-	-	-	-	-20	0
E	-	-	-5	-	0	0	-5	5
T	-30	-40	-	-	-	-	-	-
Ca	10	5	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-15	-20	-	-	0	10
Y	-	-	-	-	10	10	-10	-5
M	120	120	40	50	20	20	60	60
MED	3.611	0.00	0.833	4.722	-6.11	-4.44	-4.16	-4.72
D. EST.	33.61	13.22	22.22	17.87	5.46	15.50	6.12	17.69

O = materia orgánica, S = índice de sequía, P = fósforo aprovechable, K = potasio intercambiable, FF = días a 50% de floración femenina, E = índice de enfermedad, T = % de arcilla, Ca = calcio intercambiable, A = acidez del suelo, Y = rendimiento de grano, M = tratamiento óptimo económico medio para el conjunto de agrosistemas, N = nitrógeno, P = fósforo, K = potasio, D = densidad de población, C = maíz criollo, H = maíz híbrido.

TOE de N, P y K. Para este factor, el manual de Diagnóstico-Prescripción (MDP) considera tres categorías (< 1%, de 1 a 3%, > 3%), mientras que el contenido de O observado en los nueve experimentos no sale de la primer categoría (< 1%) considerada en el MDP, por lo cual, para que sea útil en el distrito de Cholula, las categorías del MDP deben de ajustarse.

En el Cuadro 5, se presentan las DOE de N, P, K y D, observados, calculados y los recomendados por el MDP para el cultivo de maíz del estado de Puebla. En este cuadro puede observarse que el MDP sobreestima a la recomendación de N, P y D con 35, 36.2 kg ha<sup>-1</sup> y 4.4 miles de plantas en el genotipo criollo [estos valores se obtienen restando al valor promedio de cada uno de los nutrimentos o factor, del método referido, el valor promedio obtenido con el método de campo (observado) para el mismo nutrimento y variedad], mientras que para el potasio en el mismo material lo subestima en 31.1 kg ha<sup>-1</sup>. Con los datos del Cuadro 5, se puede calcular las desviaciones estándar de las discrepancias de las DOE observadas y las recomendadas en el MDP para el genotipo criollo y éstas son de 51.08 kg ha<sup>-1</sup>, 44.9 kg ha<sup>-1</sup>, 36.83 kg ha<sup>-1</sup> y 11.46 miles de plantas ha<sup>-1</sup> para N, P, K y D, respectivamente, mientras que para el maíz híbrido son 62.1 kg ha<sup>-1</sup>, 46.77 kg ha<sup>-1</sup>, 42.57 kg ha<sup>-1</sup> y 13.23 miles de plantas ha<sup>-1</sup> para N, P, K y D, respectivamente. Si se comparan estas desviaciones con las obtenidas con el procedimiento propuesto en este estudio, se encuentra que las del MDP son más

imprecisas. Esto indica que los coeficientes que se utilizaron para obtener las DOE en el MDP deben modificarse y, además, deben incluirse los factores de diagnóstico S, FF, T, Ca, E, y A para mejorar la precisión y disminuir el sesgo en las recomendaciones.

Al parecer, con el procedimiento numérico y de barrido, se reduce el número de experimentos para generar recomendaciones óptimas económicas; sin embargo, es necesario seguir realizando más investigación con el procedimiento, en el cual se incluyan un mayor número de factores de diagnóstico, y compararlo con otros enfoques para la generación de recomendaciones.

## CONCLUSIONES

- Los coeficientes de los factores de diagnóstico utilizados para generar las recomendaciones en el manual deben de modificarse y es necesario incluir a otros factores de diagnóstico, para tener una mayor precisión y menor sesgo en las recomendaciones que se generen.
- El método numérico y barrido parece ser una alternativa para generar recomendaciones de fórmulas de producción para el cultivo de maíz.
- El método propuesto tiende a sobreestimar la DOE de nitrógeno y fósforo, mientras que para el potasio y para la densidad de población los subestima.



**Cuadro 5. Tratamientos óptimos económicos observados, del manual de diagnóstico-prescripción y calculados, en nueve sitios experimentales.**

Experi- mento	Tratamiento óptimo económico												
	V	Observado				MDP <sup>†</sup>				Numérico y barrido			
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	D	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	D	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	D
		----- kg ha <sup>-1</sup> -----											
PT93	C	100	45	50	65	155	80	0	60	117.5	42.5	40	62.5
	H	100	60	40	60	175	90	0	70	105.0	62.5	40	67.5
PC93	C	170	60	0	60	155	80	0	60	87.5	32.5	0	62.5
	H	110	60	0	60	175	90	0	70	100.0	47.5	0	52.5
HC93	C	100	60	45	60	155	80	0	60	112.5	52.5	35	57.5
	H	100	60	70	60	175	90	0	70	95.0	57.5	40	62.5
PC193	C	170	75	20	70	155	80	0	60	172.5	67.5	15	72.5
	H	195	85	30	80	175	90	0	70	175.0	72.5	10	42.5
HX94	C	135	10	15	60	155	80	0	60	147.5	22.5	15	67.5
	H	150	55	5	65	175	90	0	70	145.0	42.5	10	57.5
PC94	C	125	35	40	40	155	80	0	60	127.5	37.5	30	47.5
	H	125	35	40	40	175	90	0	70	145.0	62.5	40	67.5
HT94	C	110	50	30	40	155	80	0	60	122.5	47.5	30	52.5
	H	140	45	65	75	175	90	0	70	135.0	52.5	50	72.5
HT95	C	60	55	40	55	155	80	0	60	92.5	42.5	25	52.5
	H	95	30	25	75	175	90	0	70	95.0	37.5	40	67.5
PC95	C	110	5	40	50	155	80	0	60	132.5	57.5	35	62.5
	H	110	20	25	75	175	90	0	70	130.0	57.5	40	57.5
Promedio	C	120	43.8	31.11	55.55	155	80	0	60	123.6	44.72	25	59.72
	H	125	50	33.33	65.5	175	90	0	70	125.0	54.72	30	60.83
Diferencias <sup>‡</sup>	C	-	-	-	-	35.0	36.2	-31.1	4.4	3.6	0.9	-6.1	4.17
	H	-	-	-	-	50.0	40.0	-33.3	4.5	0.0	4.7	-3.3	-4.67

<sup>†</sup> MDP es Manual de Diagnóstico-Prescripción. La primera letra significa régimen de humedad (P = punta de riego, H = temporal con humedad residual), segunda letra significa localidad (T = San Pedro Tlaltenango C = San Mateo Capultitlan, X = Santa Ana Xalmimilulco), el numero es el año en que se llevó a cabo; V = variedad (C = criollo, H = híbrido H-137); N = dosis óptima económica de nitrógeno; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = dosis óptima económica de fósforo; K<sub>2</sub>O = dosis óptima económica de potasio; D = dosis óptima económica de densidad de población. <sup>‡</sup> Las diferencias de los tratamientos óptimos económicos por nutrimento y variedad se obtienen restando a los valores promedio obtenidos con los métodos MDP y numérico y barrido el valor promedio observado por cada nutrimento y variedad.

## LITERATURA CITADA

- Aceves-Ruiz, E., A. Turrent-Fernández, J.I. Cortés-Flores y V. Volke-Haller. 2002. Comportamiento agronómico del híbrido H-137 y materiales criollos de maíz en el valle de Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25: 339-347.
- Estrella-Chulin, N., A. Turrent-Fernández y R. Núñez-Escobar. 1975. Relaciones empíricas entre el rendimiento de maíz de temporal y algunos factores ambientales en la región Chalco-Amecameca. *Agrociencia* 19: 159-188.
- Kemphorne, O. 1952. *The design and analysis of experiments*. Wiley. New York.
- Laird, J.R., A. Turrent-Fernández, V. Volke-Haller y J.I. Cortés-Flores. 1993. La investigación en productividad de agrosistemas. Cuadernos de Edafología 18. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Peña-Olvera, B., A. Turrent-Fernández y H. Cuanalo-de la Cerda. 1975. Evaluación de un levantamiento fisiográfico cuando se utiliza como base para desarrollar recomendaciones sobre prácticas de producción de cultivos. *Agrociencia* 19: 93-106.
- Turrent-Fernández, A. 1985. El agrosistema, un concepto útil dentro de la disciplina de productividad. *Escritos de la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas* 3. Colegio de Postgraduados. Chapingo, estado de México.
- Turrent-Fernández, A., R. Avendaño-Salazar, R. Mendoza-Robles, J.I. Cortés-Flores, A. Espinosa-Calderón, R. Moreno-Dahme, F. Alemán y R. Garza-García. 1993. Manual de diagnóstico-prescripción para el cultivo de maíz en el estado de Puebla: Provincias agronómicas de riego y temporal de muy buena y buena productividad. Centro de Investigaciones de la Región Centro. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Texcoco, estado de México.
- Turrent-Fernández, A., J.L. Zuñiga-González, R. Moreno-Dahme y R. Avendaño-Salazar. 1994. El sistema PRONAMAT de diagnóstico-prescripción para el cultivo de maíz: II. El diseño de manuales de diagnóstico-prescripción. *Terra* 12: 159-168.
- Villalpando-I., J.F., A. Turrent-Fernández y F. Puente-F. 1979. Efecto de algunos factores ambientales sobre la respuesta del maíz de temporal al fertilizante fosfórico en la planicie de Huamantla. *Agrociencia* 36: 163-178.
- Volke-Haller, V. y J.D. Etchevers-Barra. 1988. Calibración del análisis de suelo para nitrógeno y fósforo en maíz de temporal en suelos de la Mixteca de Cardenas, Oaxaca. *Agrociencia* 73: 19-42.