Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

Artículo

Ajuste a las dosis óptimo-económicas de fertilización al cambiar los precios: análisis económico-matemático

Adrián González-Estrada[1§]
Antonio Turrent-Fernández[2]

1 Programa Nacional de Economía. Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera los Reyes-Texcoco km 13.5, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56250

2 Programa Nacional de Maíz. Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera los Reyes-Texcoco km 13.5, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56250. (turrent.antonio@inifap.gob.mx).

Autor para correspondencia: adrglez@prodigy.net.mx.

Resumen

La situación actual muestra tendencias preocupantes que dificultarán tanto la producción de alimentos como la producción y uso de fertilizantes. Para el año 2050 la población mundial será de 9 200 millones, su demanda por alimentos crecerá 54% y por fertilizantes 45% en relación con las de 2015. Los precios de los fertilizantes han crecido considerablemente más de prisa que los precios de los productos agrícolas, sobre todo, a partir del primer trimestre del año 2021. Los cambios de precios y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero modifican las dosis óptimo-económicas de fertilización, razón por la cual es necesario ajustarlas. El objetivo de esta investigación fue la definición de las bases económico-matemáticas para la actualización de las dosis óptimo-económicas de fertilización al cambiar los precios de los fertilizantes y de los productos agrícolas. El método fue matemático-deductivo. Se aplicaron, además, la teoría de la Programación matemática no-lineal, la teoría económica de la optimización de ganancias, los Teoremas matemáticos de la envolvente y el Lema Shephard-McKenzie. Las diez proposiciones obtenidas constituyen los resultados de esta investigación, y fueron obtenidas mediante un proceso lógico-matemático de carácter deductivo. Se concluyó que se deben estimar las superficies de respuesta para cada cultivo y para cada una de las regiones agrícolas de México y crear un sistema computarizado que analice y actualice las dosis óptimo-económicas de fertilización, conforme se observen cambios en los precios de los productos y en los de los fertilizantes.

Palabras clave:

análisis detrás de la envolvente, dosis de fertilización, relación de precios insumo-producto.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

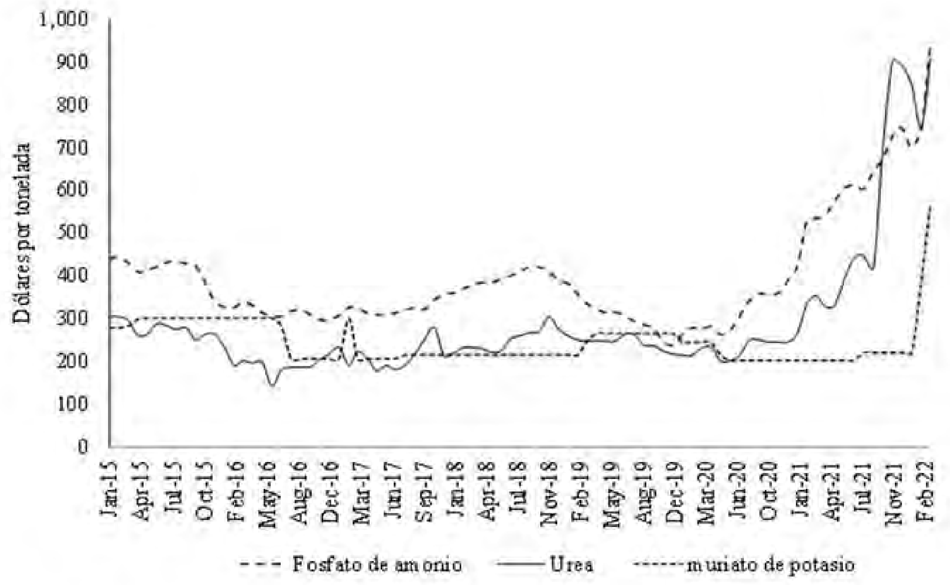
Introducción

Los fertilizantes son insumos agrícolas imprescindibles para el desarrollo sustentable de la agricultura en su fase intensiva y para el aumento de los rendimientos de los cultivos. La intensificación de la agricultura es una de las tendencias dominantes del desarrollo agrícola actual y es una condición necesaria, aunque no suficiente, para producir los alimentos que requiere una sociedad en crecimiento y desarrollo. La Asociación Internacional de fertilizantes (IFA, 2018) estimó que sin la fertilización química la producción agrícola mundial se reduciría 50%.

Los resultados de Borlaug y Doesell (2004) determinaron que para el año 2050 la demanda mundial por cereales será 50% mayor que la del año 2000 y que ese incremento se obtendrá en un 80% con la intensificación de los procesos productivos y en un 20% con un aumento de la superficie cultivada. La demanda mundial por fertilizantes químicos aumentará 45%. Por su parte, González-Estrada (2019) estimó que para el año 2050 México tendrá una población de 162.75 millones, su producto interno bruto *per cápita* se incrementará en 72.5% y la demanda por alimentos crecerá 54% en relación con la de 2015. Este proceso requerirá de un creciente abasto de fertilizantes.

Según el estudio de Heffer y Prud'homme (2008) presentaron resultados estadísticos que muestran que a nivel mundial la relación insumo-producto entre el precio de los distintos fertilizantes y el precio del trigo, arroz y maíz aumentó durante el período 1972-2008, lo cual muestra que los precios de los fertilizantes crecieron más rápidamente que los precios del trigo, arroz y maíz. Esa tendencia secular ha crecido, aún más, en los años 2021 y 2022 (Banco Mundial, 2022a). A partir del primer trimestre del año 2021, los precios de los fertilizantes se incrementaron exponencialmente y se espera que aún aumenten durante el próximo año como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Dinámica de los precios de los fertilizantes, 2015-2022.



De acuerdo con el Banco Mundial (2022a), en el año 2021 el precio medio de los fertilizantes aumentó 90% y en lo que va de 2022, 30%. Por el contrario, en el primer trimestre del año 2022 el precio del trigo ascendió en 30%, maíz y soya 20% y el del arroz 6%. Se espera que el crecimiento del precio de los fertilizantes continúe (World Bank, 2022b). Cambios similares se han observado también en México, en 2017 el precio de la urea fue de 4.20 \$ kg^{-1}; a principios de 2022 la urea en México se cotizó en \$28.00 kg^{-1} y en junio, debido a los subsidios, en \$18.00.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

A nivel mundial, los incrementos en los precios de los fertilizantes han reducido la superficie sembrada y los rendimientos de los cereales más importantes (Siwa y Rosegrant, 2015). En México no solo no se han actualizado las dosis óptimo-económicas de fertilización, sino que existe la idea entre muchos agricultores e incluso técnicos de que no deben cambiar, no ha habido recomendación oficial al respecto.

Por otra parte, en la mayoría de las investigaciones que se han llevado a cabo en México se han calculado las dosis óptimas de fertilización directamente, a partir de los datos experimentales, sin la estimación previa de las superficies de respuesta. Debido a esta deficiencia, la actualización de las dosis de fertilización ante los cambios tan significativos en los precios de los fertilizantes requeriría que cada uno de los investigadores que llevaron a cabo experimentos de esa clase calculara la actualización, para cada uno de los más de cien cultivos que existen en México y para cada una de las 72 regiones agrícolas de México (González-Estrada, 1990). Tarea gigantesca que se podría abreviar si se contara con los algoritmos matemáticos y computacionales pertinentes.

El objetivo de esta investigación fue la definición de las bases económico-matemáticas que faciliten la actualización de las dosis óptimo-económicas de fertilización (DOE) al cambiar los precios de los fertilizantes y del cultivo. La hipótesis central es que las dosis óptimo-económicas de fertilización estimadas a partir de los datos experimentales quedan invalidadas después de que se presentan cambios significativos en las relaciones insumo-producto y por ello deben revisarse cada vez que esos cambios sucedan.

Materiales y métodos

El método de esta investigación es matemático-deductivo; está basado en la teoría de la Programación matemática no-lineal, en la teoría económica de la optimización de ganancias, en los teoremas matemáticos de la envolvente y en el lema de Shephard-McKenzie (Mas-Colell *et al*., 1995).

Es una práctica común en todo el mundo el uso polinomios cuadráticos en las investigaciones para estimar las superficies de respuesta de los cultivos a las distintas dosis de fertilización (González-Estrada, 1995). La función clásica general que expresa la respuesta de los rendimientos (R) a las distintas aplicaciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) es:

$R= f(N,P,K) = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 P+ \beta_3 K+ \beta_4 NP+ \beta_5 NK+ \beta_6 PK- \beta_7 N^2 - \beta_8 P^2 - \beta 9 K^2$

Debido a que en México la respuesta a de los rendimientos a las aplicaciones de potasio en la mayoría de los cultivos ha resultado poco significativa estadísticamente, el polinomio completo se reduce a:

$R= f (N,P,\theta) = \beta_0 + \beta_1 N+ \beta_2 P+ \beta_3 NP- \beta_4 N^{2-} \beta_5 P^2$ 1).

Donde: = (p_c, p_N, p_P) es un vector de cuyos componentes son parámetros que se mantienen fijos en el proceso de optimización de las dosis de fertilización.

Propiedad necesaria o indispensable de estas funciones es que sean dos veces continuamente diferenciales, que exhiba rendimientos decrecientes: $\partial 2\ R ⁄ \partial\ N2 < 0$, $\partial 2\ R ⁄ \partial\ P2 < 0$ que cumplan el Teorema Young-Haffer (Sydsaeter *et al*., 2008): $\partial 2\ R ⁄ \partial N \partial P = \partial 2\ R ⁄ \partial P \partial N$ y que las funciones de respuesta sean cóncavas (Takayama, 1991 y 1996). Se debe tener presente que en este artículo se define a las DOE en términos de los ingredientes activos de N y P y no en términos de los productos comerciales.

De esta manera, la función ganancia por hectárea estimada con información experimental de ensayos sobre fertilización es:

$\Pi= (I-C) = p_C (\beta_0 + \beta_1 N+ \beta_2 P+ \beta_3 NP- \beta_4 N^{2-} \beta_5 P^2) - p_N N - p_P P$ 2).

Las condiciones de primer orden para encontrar un punto crítico son: $pC (\beta_1 + \beta_3 P^{-2} \beta 4 N) - pN = 0$. 3). $pC (\beta_2 + \beta_3 N^{-2} \beta_5 P) - p_P = 0$. 4).

Matricialmente:

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

$$\begin{pmatrix} -2\beta_4 & \beta_3 \\ \beta_3 & -2\beta_5 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} N \\ P \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} (p_N-p_C\beta_1)/p_C \\ (p_P-p_C\beta_2)/p_C \end{pmatrix}$$

5).

Puesto que la función objetivo es cóncava, entonces las condiciones necesarias (3)-(4) son también suficientes para determinar la solución óptima. Del sistema (5) se obtienen las siguientes dosis óptimo-económica de fertilización:

$$N^*=\frac{-2\beta_5(p_N-\beta_1)-\beta_3(p_P-p_C\beta_2)}{p_C(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2)} \text{ y } P^*=\frac{-2\beta_4(p_P-\beta_2)-\beta_3(p_N-\beta_1)}{p_C(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2)}$$

8).

Se debe remarcar que las dosis óptimo-económicas de fertilización no solo están en función de los estimadores mínimo-cuadráticos, sino que también dependen de los precios de los insumos y de los productos. La matriz jacobiana del problema de la función # (N,P) es:

$$I=\begin{pmatrix} \frac{\partial^2\pi}{\partial N^2} & \frac{\partial^2\pi}{\partial N\partial P} \\ \frac{\partial^2\pi}{\partial P\partial N} & \frac{\partial^2\pi}{\partial^2 P} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} -p_C 2\beta_4 N & p_C\beta_3 \\ p_C\beta_3 & -p_C 2\beta_5 \end{pmatrix}$$

.

Las condiciones suficientes, de segundo orden, que garantizan que el punto crítico encontrado es un máximo global y único son: $-2\ p_C\ \beta_4\ N< 0 \wedge (4\ \beta_4\ \beta_5\ N-\ \beta_3{}^2) > 0$.

Con el fin de llevar a cabo el análisis de los cambios que sufren las dosis óptimo-económicas de fertilización cuando cambian los precios insumo-producto, es necesario usar precios relativos (González-Estrada, 1995), cuyo numerario será el precio del producto obtenido en el cultivo determinado; es decir: $p_c= 1$ y además: $\lambda= (p_N / p_c)$ y $\varphi= (p_P / p_c)$.

Así, la función ganancia por hectárea es: $\pi= (I\text{-}C) = \beta_0 + \beta_1 N+ \beta_2 P+ \beta_3 NP- \beta_4 N^2- \beta_5 P^2-\lambda N-\varphi P$ 9).

Donde: $\beta_i> 0\ \forall i= 1, 2, \ldots ,5 \wedge p_c, p_N, p_P, \lambda, \varphi> 0$.

Las condiciones de primer orden para encontrar un punto crítico son:

$$\begin{pmatrix} -2\beta_4 & \beta_3 \\ \beta_3 & -2\beta_5 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} N \\ P \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \lambda-\beta_1 \\ \varphi-\beta_2 \end{pmatrix}$$

10).

Puesto que la función objetivo es cóncava, entonces las condiciones necesarias (3)-(4) son también suficientes para determinar la solución óptima. La dosis óptimo-económica de fertilización (DOE) es:

$$N^*=\frac{-2\beta_5(\lambda-\beta_1)-\beta_3(\varphi-\beta_2)}{4\beta_4\beta_5-\beta_3^2}$$

11).

$$\wedge\ P^*=\frac{-2\beta_4(\varphi-\beta_2)-\beta_3(\lambda-\beta_1)}{4\beta_4\beta_5-\beta_3^2}$$

12).

La última etapa del método de esta investigación consiste en la aplicación de los teoremas de la envolvente a expresiones; (6), (7), (11) y (12). De acuerdo con González-Estrada (2022) la función objetivo en los problemas de optimización irrestricta está definida en términos de un conjunto de n variables independientes, que al ser evaluadas en un punto crítico x*, se obtiene f(x*).

Este valor óptimo de y= f(x) está en función de los k parámetros:θ_1, θ_2, θ, θ_k, del problema; es decir: $y^* = f(x^*,\theta) = f(x_1^*, x_2^*,\ldots,x_n^*; \theta_1, \theta_2,\theta,\theta_k)$, donde: $x=(x_1, x_2,\theta,_{xn}) \in X\subset R^n$ y $\theta= (\theta_1, \theta_2,\theta, \theta_k)\in R^k$.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

Además, el vector óptimo, x* (θ), también está en función del vector de parámetros, razón por la cual: f* (θ) = f (x* (θ); θ). La respuesta a la pregunta de cómo cambia f *(θ) ante el cambio en uno de los parámetros: θ_j, se encuentra en el teorema de la envolvente.

Según González-Estrada (2022), en los problemas de optimización con restricciones en igualdad, la función objetivo está definida en términos de un conjunto de n variables independientes, que al ser evaluadas en un punto crítico x*, se obtienen L (x*, λ*) y f (x*, λ*). Estos valores óptimos del lagrangeano de la función objetivo y de las variables de elección están en función de los *k* parámetros: θ_1, θ_2,θ,θ_k, del problema; es decir: y* = f (x*, λ*; θ)= f (x_1*, x_2*,λ, x_n*, λ_1*, λ_2 *,..., λ_m*; θ_1, θ_2,..., θ_k) = f *(θ_1, θ_2,...,θ_k) y además L* = L (x*, λ*; θ) = L (x_1*, x_2 *,..., x_n *, λ_1 *, λ_2 *,...,λ_m *; θ_1, θ_2,θ,θ_k) = L* (θ_1, θ_2,..., θ_k). Donde: x= (x_1, x_2,..., x_n)$\in X\subset R^n$, λ= (λ_1 *,..., λ_m *) $\in R^m$ y θ= (θ_1, θ_2,...,θ_k) $\in R^k$.

Note que x*(θ), está también en función del vector de parámetros, razón por la cual: f * (θ) = f (x * (θ), λ * (θ); θ). La respuesta a la pregunta de cómo cambian f * (θ) y x * (θ) ante el cambio en uno de los parámetros: θ_j, se encuentra en el siguiente teorema (González-Estrada, 2022).

Teorema de la envolvente

Si las funciones f (x, λ; θ), f (x* (θ), λ* (θ); θ) y x* (θ) son continuamente diferenciables y si f* (θ) = f (x*, λ*; θ) = Max f (x,θ) para x= ∈X, y x* (θ) es un punto crítico, entonces:

$$\frac{\partial f^*(\theta)}{\partial \theta_j}=\frac{\partial f\left(x^*(\theta),\lambda^*(\theta);\theta\right)}{\partial \theta_j}= \left.\frac{\partial f(x,\lambda;\theta)}{\partial \theta_j}\right]_{x=x^*(\theta)}$$

Por otra parte, el cambio de la solución óptima, x*(θ), ante un cambio en alguno de los parámetros es, simplemente: ∂x *(θ) ∂ / θ_j).

Resultados y discusión

De acuerdo con (6)-(7), las dosis óptimo-económicas de fertilización no son invariantes ni fijas, sino cambiantes. Es cierto que las relaciones naturales expresadas en los datos experimentales y en estimadores mínimo-cuadráticos de las superficies de respuesta se pueden considerar constantes en el corto y mediano plazo, aunque no en el largo. Sin embargo, las dosis óptimo-económicas de fertilización son cambiantes, porque dependen de la variación de las condiciones económicas, expresadas en este caso, en las relaciones de precios insumo-producto λ y φ.

Proposición 1

La DOE de nitrógeno y la de fósforo aumentan conforme aumenta el precio del producto obtenido en el cultivo; es decir:

$$\frac{\partial N^*}{\partial p_C}>0;\frac{\partial P^*}{\partial p_C}>0$$

13).

Demostración (por construcción). De acuerdo con el teorema de la envolvente aplicado a (6) y (7):

$$\frac{\partial N^*}{\partial p_C}=\frac{p_C\beta_2\beta_3\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)-\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)\left[-2\beta_5\left(p_N-\beta_1\right)-\beta_3\left(p_P-p_C\beta_2\right)\right]}{p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)^2}$$

Por otra parte,

$$\frac{\partial N^*}{\partial p_C}=\frac{p_C\beta_2+2\beta_5\left(p_N-\beta_1\right)+\beta_3\left(p_P-p_C\beta_2\right)}{p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}>0$$

14).

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

Dado que, de acuerdo con las condiciones de suficiencia: p_C (4 β_4 β_5 - β_3 ^{2}) > 0; además: p_C β_2 β_3 es positivo; $2\beta_5$ (p_N - β_1) > 0, (p_P - p_C β_2) > 0 $\Rightarrow$ β_3 (p_P - p_C β_2) > 0. Por otra parte:

$$\frac{\partial P^*}{\partial p_C}=\frac{-\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)\left[-2\beta_4\left(p_P-\beta_2\right)-\beta_3\left(p_N-\beta_1\right)\right]}{p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)^2} \quad \therefore \frac{\partial P^*}{\partial p_C}=\frac{2\beta_4\left(p_P-\beta_2\right)+\beta_3\left(p_N-\beta_1\right)}{p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}>0$$

15).

Dado que: $2\beta_4$ (p_P - β_2) > 0 y β_3 (p_N - β_1) > 0 y p_C ($4\beta_4$ β_5 - β_3 ^{2}) > 0.

Proposición 2

La dosis óptimo-económica de nitrógeno disminuye conforme aumenta el precio del nitrógeno y también disminuye con los aumentos en el precio del fósforo; es decir:

$$\frac{\partial N^*}{\partial p_N}<0 \frac{\partial N^*}{\partial p_P}<0$$

16).

Demostración (por construcción).

$$\frac{\partial N^*}{\partial p_N}=\frac{-2\beta_5 p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}{\left[p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)\right]^2}=-\frac{2\beta_5}{p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}<0$$

17).

$$\frac{\partial N^*}{\partial p_P}=-\frac{\beta_3 2\beta_5\left(p_N-\beta_1\right)}{\left[p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)\right]^2}<0$$

18).

Proposición 3

La dosis óptimo-económica de fósforo disminuye conforme aumenta el precio del fósforo y también disminuye con los aumentos en el precio del nitrógeno; es decir:

$$\frac{\partial P^*}{\partial p_P}<0 \frac{\partial P^*}{\partial p_N}<0$$

Demostración (por construcción). Después de aplicar el teorema de la envolvente a (6) y (7), se obtiene:

$$\frac{\partial P^*}{\partial p_P}=\frac{-2\beta_4\left[p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)\right]}{\left[p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)\right]^2}=-\frac{2\beta_4}{p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}<0$$

20).

$$\frac{\partial P^*}{\partial p_N}=\frac{-\beta_3\left[p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)\right]}{\left[p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)\right]^2}=-\frac{\beta_3}{p_C\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}<0$$

21).

Hasta aquí, se han analizado los efectos parciales que los cambios en los precios individuales tienen en las dosis óptimo-económicas de fertilización. Sin embargo, en la realidad se pueden presentar variaciones simultáneas de diferente magnitud en el precio del producto y en los de los fertilizantes, razón por la cual cambian los precios relativos y a consecuencia de ello, las dosis óptimo-económicas de fertilización.

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

Además, en la situación actual se observan aumentos en los precios de los fertilizantes acompañados de incrementos en los precios, lo cual no necesariamente significa que los efectos de esos cambios se contrarrestan y que no modifican las dosis óptimo-económicas de fertilización. En el análisis que sigue, se muestra que no son relevantes los cambios absolutos de los precios de los productos y los cambios en los precios de los fertilizantes. Lo correcto es analizar los cambios en las dosis óptimas de fertilización en términos de los cambios relativos en los índices de precios insumo-producto: λ= (p_N ⁄ p_c) y φ= (p_P ⁄ p_c).

Proposición 4

La dosis óptimo-económica de nitrógeno disminuye conforme aumentan los precios insumo-producto; es decir:

$$\frac{\partial N^*}{\partial \lambda} < 0 \frac{\partial N^*}{\partial \varphi} < 0$$

26).

Demostración. De la aplicación del teorema de la envolvente a (11) y (12) se obtiene:

$$\frac{\partial N^*}{\partial \lambda} = \frac{-2\beta_5\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}{\left[4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right]^2} = -\frac{2\beta_5}{4\beta_4\beta_5-\beta_3^2} < 0$$

27).

$$\frac{\partial N^*}{\partial \varphi} = \frac{-\beta_3\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}{\left[4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right]^2} = -\frac{\beta_3}{4\beta_4\beta_5-\beta_3^2} < 0$$

18).

Proposición 5

La dosis óptimo-económica de fósforo disminuye conforme aumentan los precios insumo-producto; es decir:

$$\frac{\partial P^*}{\partial \lambda} < 0 \frac{\partial P^*}{\partial \varphi} < 0$$

29).

Demostración. De (11), (12) y de la aplicación del teorema de la envolvente, se obtiene:

$$\frac{\partial P^*}{\partial \lambda} = \frac{-\beta_3\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}{\left[4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right]^2} = -\frac{\beta_3}{4\beta_4\beta_5-\beta_3^2} < 0$$

30).

$$\frac{\partial P^*}{\partial \varphi} = \frac{-2\beta_4\left(4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right)}{\left[4\beta_4\beta_5-\beta_3^2\right]^2} = -\frac{2\beta_4}{4\beta_4\beta_5-\beta_3^2} < 0$$

31).

Proposición 6

El efecto de un cambio en el precio relativo del fósforo sobre la dosis óptima de nitrógeno es igual al efecto de un cambio en el precio relativo del nitrógeno sobre la DOE de potasio:

$$\frac{\partial N^*}{\partial \varphi} = \frac{\partial P^*}{\partial \lambda}$$

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

32).

Demostración obvia a partir de (28) y (30). Una especie de condición de reciprocidad (Chiang y Wainwright, 2012) es la que se obtuvo de (32).

Proposición 7 (simetría de los efectos cruzados)

El efecto cruzado que los cambios en la relación de precios fósforo/producto tienen en las ganancias, a través del de la dosis óptima de nitrógeno es igual a los que tienen sobre las ganancias los cambios de los precios nitrógeno/producto, a través de la dosis óptima de fósforo:

$$\frac{\partial^2\pi}{\partial N^*\partial\varphi}=\frac{\partial^2\pi}{\partial P^*\partial\lambda}$$

Proposición 8

Los aumentos en los precios de los fertilizantes ya sean absolutos o relativos, hacen disminuir la ganancia de los agricultores, mientras que los aumentos en los precios del producto obtenido la hacen aumentar:

$$\frac{\partial\pi^*}{\partial p_N}<0\frac{\partial\pi^*}{\partial p_P}<0\frac{\partial\pi^*}{\partial\lambda}<0\frac{\partial\pi^*}{\partial\varphi}<0\frac{\partial\pi^*}{\partial p_C}>0$$

33) (demostración obvia).

Con el fin de conocer en cuánto cambian las ganancias cuando cambian los precios del producto y de los fertilizantes, se aplicó el lema de Hotelling, que se encuentra en Varian (1992); Mas-Colell *et al*. (1995); Jehle y Reny (2011) y se obtuvo la siguiente proposición.

Proposición 9

En la vecindad de la solución óptima, un aumento unitario del precio del producto aumenta las ganancias en R * pesos, mientras que un aumento unitario del precio del nitrógeno o del fósforo disminuye la ganancia en N * P * pesos, respectivamente:

$$\frac{\partial\pi^*}{\partial p_C}=R^*;\frac{\partial\pi^*}{\partial p_N}=-N^*;\frac{\partial\pi^*}{\partial p_P}=-P^*$$

34).

Demostración. Dado que: $\pi^*(p_C, p_N, p_P) = p_C R^*(p_C, p_N, p_P) - p_N N^*(p_C, p_N, p_P) - p_P P^*(p_C, p_N, p_P)$, entonces, de acuerdo con el teorema de la envolvente (Simon y Blume, 1994):

$$\frac{\partial\pi^*(p_C, p_N, p_P)}{\partial p_C}=R^*;\frac{\partial\pi^*(p_C, p_N, p_P)}{\partial p_N}=-N^*;\frac{\partial\pi^*(p_C, p_N, p_P)}{\partial p_P}=-P^*.$$

Proposición 10

Después de dividir el primer postulado de (34) entre el segundo y luego, el primero entre el tercero, se obtiene:

$$\frac{\partial p_N}{\partial p_C}\approx-\frac{R^*}{N^*};\frac{\partial p_P}{\partial p_C}\approx-\frac{R^*}{P^*}$$

35).

Puede suceder; sin embargo, que no obstante los cambios en los precios de los productos y de los fertilizantes, resulte mejor en términos de ganancias, que aún se use la anterior DOE de fertilización o incluso, que se incremente. Este caso sucedería si los cambios positivos producidos por un

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

incremento en el precio del producto superaran la disminución en las ganancias debida al aumento de los costos por el encarecimiento de los fertilizantes. Este evento también es explicado por el análisis previo.

En la mayoría de los casos las dosis óptimo-económicas de fertilización aplicadas en la agricultura mexicana son inválidas, ineficientes y anacrónicas, debido a que no se consideran los costos ambientales y ecológicos y a que se les considera fijas e inmutables, por lo que erróneamente no se les revisa y actualiza al cambiar las relaciones de precios insumo-producto.

Desafortunadamente, por facilidad, la dosis óptimo-económica para un cultivo y para un lugar específico se calcula directamente a partir de los datos experimentales, sin la estimación previo de las superficies de respuesta. Por esto es que la revisión frecuentemente las DOE y actualizarlas para 100 cultivos y 70 regiones resultaría muy costosa e ineficiente. Además, en la estimación de las superficies de respuesta se deben considerar también los costos ambientales que se producen con la fertilización química en la agricultura (González-Estrada y Camacho, 2018 y 2017).

Sin la consideración de estos costos las DOE de fertilización no podrían ser óptimas económicamente, ni eficientes desde el punto de vista del bienestar social y ambiental. En el documento donde se considera la implementación de las acciones de mitigación para el cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones comprometidos en el Acuerdo de París por parte de México (INECC, 2021), no se consideran acciones para el control de emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la fertilización química nitrogenada, no obstante que esta la principal fuente de emisiones de la agricultura mexicana. Por estas razones, resulta apremiante una nueva política de ciencia y tecnología para el campo mexicano (González-Estrada, 2020).

Conclusiones

Las diez proposiciones obtenidas validan la hipótesis central de esta investigación. La no-actualización de las dosis óptimo-económicas de fertilización al cambiar tan significativamente los precios de los productos o de los fertilizantes, en la mayoría de los casos produce ineficiencia, reducción en las ganancias de los agricultores y mayores emisiones de gases de efecto invernadero. El uso de fertilizantes químicos en la agricultura es ineficiente e irracional, porque no se siguen las DOE de fertilización y porque no se consideran los costos de las emisiones que producen los fertilizantes nitrogenados.

Se debe mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes y las prácticas de aplicación; se debe promover: el uso de fertilizantes de lenta liberación de nitrógeno, la aplicación de fertilizantes orgánicos y el uso de microrganismos que mejoren la nutrición de las plantas. Se recomienda estimar las superficies de respuesta para cada cultivo y para cada una de las 72 regiones agrícolas de México. En el cálculo de las dosis óptimo-económicas de fertilización se deben considerar también los costos ambientales que se producen con la fertilización químico-nitrogenada en la agricultura.

Se propone, además, la creación de una base de datos con los resultados experimentales de fertilización, para cada cultivo y para cada una de las regiones agrícolas del país. También se propone que se desarrolle un sistema computarizado que actualice las dosis óptimo-económicas de fertilización inmediatamente después de que se conozcan los nuevos vectores de precios, para cada cultivo y para cada una de las regiones del país. Por último, se sugiere también que se incluya el control eficiente de emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la fertilización química nitrogenada en la agricultura mexicana en la implementación de las acciones de mitigación para el cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones comprometidos en el Acuerdo de París por parte de México.

Las DOE de fertilización con costos ambientales reducirán los rendimientos esperados, por lo que resulta apremiante una nueva política de ciencia y tecnología para el campo, orientada hacia el desarrollo sostenible, que mejore los rendimientos y la rentabilidad y que se adapte al control de emisiones requerido para evitar los efectos catastróficos del cambio climático.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v16i4.3425

Bibliografía

1 Borlaug, N. and Doesell, Ch. 2004. Prospects for world agriculture in the twenty-first century, Ed. Sustainable Agriculture and the International Rice-Wheat System. Marcel Dekker, Inc. New York. 5-22 pp.

2 Chiang, A. and Wainwright K. 2012. Fundamental methods of mathematical economics. Fourth Ed. McGraw-Hill Companies. New York. 708 p.

3 González-Estrada, A. 1990. Los tipos de agricultura y las regiones agrícolas de México. Colegio de Posgraduados. Chapingo, Estado de México. 152 p.

4 González-Estrada, A. 1995. Algoritmo para actualizar las dosis óptimo-económicas de fertilización al cambiar la relación de precios. Agricultura Técnica en México. 11(1):69-86.

5 González-Estrada, A. 2020. Hacia una nueva política científica y tecnológica para el desarrollo del campo mexicano. Ciencia, Tecnología e innovación. *In*: ciencia, tecnología e innovación: una visión desde el poder legislativo. Editorial Fontamara y Cámara de Diputados. Ciudad de México. 225-240 pp.

6 González-Estrada, A. 2022. Programación matemática no-lineal con aplicaciones en la economía. División de Ciencias Económico-Administrativas, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 221 p.

7 González-Estrada, A. y Camacho, M. A. 2017. Emisiones de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 8(8):1733-1745.

8 González-Estrada, A. y CamachoA. 2018. Costos y políticas eficientes de control de emisiones de la fertilización nitrogenada en la agricultura mexicana. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 9(7):1399-1410.

9 Heffer, P. and Prud'homme, M. 2008. Outlook for world fertilizer demand, supply, and supply/ demand balance. Turkish Journal of Agriculture and Forestry and International Fertilizer Association. 32(28):159-174.

10 INECC. 2021. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Estimación de costos y beneficios asociados a la implementación de acciones de mitigación para el cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones comprometidos en el Acuerdo de París. Ciudad de México. 202 p.

11 IFA. 2018. International Fertilizer Association. Estimating and reporting fertilizer-related greenhouse gas emissions. A discussion paper for policy makers. 11 p.

12 Jehle, G. A. and Reny, P. J. 2011. Advanced microeconomic theory. Prentice Hall. New York. 656 p.

13 Mas-Colell, A.; Whinston, M. D. and Green, J. R. 1995. Microeconomic theory. Oxford University Press. Cambridge, England. 1008 p.

14 Simon, C. P. and Blume, L. 1994. Mathematics for economists. WW. Norton & Co. New York. 930 p.

15 Siwa, M. and Rosegrant, M. W. 2015. Energy and agriculture: evolving dynamics and Future implications. *In*: sustainable economic development, resources, environment, and institutions: 261-292. Academic Press, Elsevier. San Diego, CA. 532 p.

16 Sydsaeter, K.; Hammond, P.; Seierstad, A. and Strom A. 2008. Further mathematics for economic analysis. Second edition. Prentice Hall. London. 616 p.

17 Takayama, A. 1991. Mathematical economics. Cambridge University Press. New York. 737 p.

18 Takayama, A. 1996. Analytical methods in economics. The University of Michigan Press. Ann Arbor, Michigan. 672 p.

19 Varian, H. R. 1992. Microeconomic analysis. WW. Norton & Company. New York. 591 p.

20 World-Bank. 2022a. Commodity markets outlook. Washington, DC. 48 p.

21 World-Bank. 2022b. Commodity prices forecasts. Released Washington, DC. 2 p.

Ajuste a las dosis óptimo-económicas de fertilización al cambiar los precios: análisis económico-matemático

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 February 2025
Date accepted: 01 June 2025
Publication date: 27 June 2025
Publication date: May-Jun 2025
Volume: 16
Issue: 4
Electronic Location Identifier: e3425
DOI: 10.29312/remexca.v16i4.3425

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

análisis detrás de la envolvente
dosis de fertilización
relación de precios insumo-producto

Counts

Figures: 1
Tables: 0
Equations: 29
References: 21
Pages: 0