

Los cambios en la eficiencia técnica en el uso de nutrientes en la agricultura, y sus posibles efectos sobre el medio ambiente: un nuevo marco conceptual.

Beatriz Avalos-Sartorio *

Resumen

Se analizan los factores que subyacen a la respuesta de un cultivo a las aplicaciones de nutrientes, y se habla acerca del modelaje apropiado de esa respuesta. Se demuestra cómo los cambios en la respuesta que incrementan la productividad de los nutrientes no necesariamente conllevan a una caída en los niveles de insumo económicamente eficientes. Las mejoras en la eficiencia técnica de un nutriente pueden estar asociadas a un aumento en las aplicaciones, y pueden implicar, por lo tanto, pérdidas del nutriente al medio ambiente que son mayores que aquellas prevalecientes antes del momento en que se realizaron tales mejoras en eficiencia técnica.

Se propone un nuevo marco conceptual que permite tomar en cuenta los diferentes tipos de mejoras en la eficiencia técnica en el uso de un nutriente. Se presenta la curva de respuesta del nutriente en un marco conceptual que considera varios otros elementos adicionales al nutriente mismo, y que por lo tanto es más general que el marco conceptual convencional. Se argumenta que, a menos que los investigadores agrícolas consideren a tales elementos para evaluar los cambios en la eficiencia técnica y económica de las prácticas de manejo de nutrientes, éstos podrían atribuir erróneamente las mejoras en la eficiencia técnica al cambio tecnológico. Se ilustra este caso con varios ejemplos al presentarse situaciones de cambios en el nitrógeno residual del suelo, a menudo ignorado por el marco conceptual convencional, como uno de estos elementos importantes.

Abstract

The issues underlying crop yield response to nutrient applications, and the appropriate modeling of crop yield response are analyzed. The discussion shows how changes in response that increase nutrient productivity need not lead to a drop in the allocatively efficient level of nutrient. Improvements in the technical efficiency of a given nutrient may therefore lead to increased applications, and to losses of the nutrient to the environment that are higher than those before such improvements took place. A refined conceptual framework is proposed to deal with the different kinds of improvements in the technical efficiency of nutrient use.

The discussion then presents the nutrient response curve in a formulation that considers various other underlying components besides the nutrient itself, and that is therefore more general than the conventional formulation. It is argued that unless agricultural researchers take such components into account to assess changes in the technical and allocative efficiencies of nutrient management practices, they may wrongly attribute improvements in technical efficiency to technological change. This point is illustrated with several examples for the case of changes in the soil's carry-in nitrogen, often ignored by the conventional framework, as one of these key components.

* Profesora-investigadora y Jefa de la División de Estudios de Postgrado, Universidad del Mar.

Introducción

El gran éxito de las tecnologías de la Revolución Verde se puede atribuir no solamente al crecimiento de la productividad agrícola a través de la intensificación de los recursos aplicados. Las tecnologías también incrementaron las utilidades de los agricultores. El hecho de que los agricultores de muchas regiones hayan adoptado tales tecnologías intensivas de aplicación de recursos, confirma la tesis seminal de Schultz (1964) con respecto al predominio del motivo de las ganancias monetarias detrás de las decisiones de aplicación de recursos por los agricultores.

Los rendimientos del trigo se han beneficiado particularmente de las tecnologías de la Revolución Verde porque los genes enanizantes han permitido que los agricultores aumenten la dosis de fertilizante nitrogenado sin arriesgar que el cultivo se acame (que las plantas de trigo se doblen cuando se tornan demasiado altas) lo cual evita la cosecha normal. De acuerdo con estimaciones recientes (Byerlee, 1997; Bell *et al.*, 1995), los fertilizantes nitrogenados han sido responsables de alrededor de la mitad de las ganancias en los rendimientos del trigo durante las pasadas tres décadas en regiones que han experimentado la Revolución Verde, tales como el Punjab de la India, el Punjab de Pakistán, y el Noroeste de México. Sin embargo, durante la década pasada los rendimientos en estas regiones se han estancado a pesar de que los agricultores siguen incrementando las dosis.

De hecho, las dosis de nitrógeno en estas regiones de cultivos de trigo han alcanzado niveles preocupantemente altos. Las dosis aplicadas por los agricultores sobrepasan persistentemente los niveles recomendados. Estas dosis también están usualmente asociadas con niveles altos de ineficiencia técnica, de manera que proporciones considerables de las dosis aplicadas no son aprovechadas por el cultivo. Por ejemplo, en los Punjab de la India y de Pakistán, las proporciones de nutrientes en el cultivo *versus* nutrientes aplicados son de 5:1, las cuales son extremadamente bajas (Byerlee, 1997). En el Noroeste de México, solamente se puede considerar a la mitad del nitrógeno aplicado de provecho para los cultivos

(Meisner *et al.*, 1992; y los cálculos propios de la autora). Dadas tales ineficiencias técnicas, los agricultores en estas regiones podrían estar desperdiciando su dinero, y descuidando consecuentemente la motivación de maximización de su ingreso neto que supuestamente los indujo a adoptar en primera instancia las tecnologías de la Revolución Verde. Adicionalmente, debido a estas ineficiencias, los agricultores de trigo de estas regiones pueden estar contribuyendo de manera no trivial a la alteración del llamado ciclo global de nitrógeno. El nitrógeno que no se aprovecha por la cosecha necesariamente se deposita en el medio ambiente, en las capas profundas de tierra, en aguas subterráneas y costeras, en la atmósfera, en plantas y en animales, y en los seres humanos. Vitousek *et al.*, (1997) describió que tales alteraciones en el ciclo global del nitrógeno están dañando seriamente a los ecosistemas y a la salud humana.¹ Los autores afirman que "el nitrógeno que se utiliza como fertilizante actualmente representa con mucho la mayor contribución del hombre de nitrógeno nuevo al ciclo global." Ellos estiman que la producción global de fertilizantes nitrogenados para satisfacer esta demanda podría aumentar de un nivel actual de cerca de 80 millones de toneladas métricas por año a 134, y que cuando menos de manera corriente, por lo menos la mitad de este fertilizante, una vez aplicado a los campos, se perderá en el aire y en el agua.

Aunque está claro a partir de la exposición de Vitousek que no es posible sobreenfatizar los costos potenciales y sociales de las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados técnicamente ineficientes, la pregunta central consiste en cómo los investigadores agrícolas deben de enfrentar el

¹ Vitousek *et al.*, (1997) describe algunos de estos impactos: En la atmósfera, las concentraciones cada vez mayores de óxido nitroso (N_2O) contribuyen al calentamiento global, y las concentraciones regionales de otros óxidos de nitrógeno, incluyendo al óxido nítrico (NO), coadyuvan a la formación del smog fotoquímico. El exceso de nitrógeno en el suelo promueve las pérdidas de otros nutrientes esenciales para los cultivos, como el calcio y el potasio, y causa la acidificación del suelo en detrimento de los rendimientos de las cosechas. También se están acidificando las aguas de los manantiales y de los lagos por el exceso de nitrógeno, afectando su ecología de manera importante. Además, el nitrógeno transportado por los ríos hasta los estuarios y lagunas costeras, ha acelerado las pérdidas de la diversidad biológica, y está cambiando la vida vegetal y animal, así como los procesos ecológicos de los estuarios y de los ecosistemas de las costas, y está contribuyendo a la reducción de largo plazo en las pesquerías marinas costeras. [Para obtener descripciones adicionales acerca de los impactos de las alteraciones en el ciclo global del nitrógeno, ver Ramos (1996) y Bacon (1995).]

problema del diseño de prácticas de manejo de nitrógeno que sean menos dañinas al medio ambiente, y que al mismo tiempo, sean atractivas para los bolsillos de los agricultores. Una vez que los investigadores hayan refinado su enfoque metodológico, ellos podrán identificar de manera empírica los principales factores técnicos, económicos, y aquellos relacionados con información, que sustentan las dosis altas de aplicación por parte de los agricultores, así como las eficiencias técnicas bajas, al igual que las influencias individuales y conjuntas subyacentes de estos factores en las prácticas de dichos agricultores. Consecuentemente, los investigadores agrícolas podrán determinar si, dados tales factores, las prácticas de manejo actuales de los insumos son consistentes con el comportamiento racional por parte de los agricultores que actúan para maximizar sus ganancias. Con la metodología correcta, y habiendo considerado los factores adecuados, es tan sólo un asunto empírico si los investigadores agrícolas descubren o no que las prácticas de manejo de los insumos por parte de los agricultores son consistentes con un comportamiento racional que se fundamenta en un motivo de ganancia. Pero, independientemente de sus descubrimientos, solamente hasta ese momento es que los investigadores agrícolas lograrán comprender por qué es que los agricultores pueden decidir desperdiciar la mitad del fertilizante que aplican en sus campos.

Sin embargo, estas preocupaciones acerca de las ineficiencias técnicas no se limitan al trigo, ni a las regiones que producen trigo en los países en desarrollo. Muchas otras regiones del planeta productoras de trigo, que actualmente utilizan niveles altos de los insumos y semillas mejoradas, se enfrentan a los mismos problemas que están asociados con el éxito de la Revolución Verde. Mientras que los agricultores en estas regiones intentan superar el estancamiento de los rendimientos por medio del uso de insumos cada vez mayores, las comunidades locales tienen preocupaciones cada vez más intensas acerca de las pérdidas económicas resultantes y sobre el daño al medio ambiente. Estas preocupaciones han cambiado el enfoque de los investigadores agrícolas, de uno promotor de la intensificación en la utili-

zación de los insumos, a el de incremento de la eficiencia en la utilización de éstos.

La agricultura de alta eficiencia que requieren las regiones que ya experimentaron la Revolución Verde, hoy contemplada por los investigadores agrícolas, requiere que sus recomendaciones sean cada vez más específicas para un sitio dado y, utilizando la nomenclatura de Byerlee *et al.*, (1997), *explícitas (disembodied)*. En lugar de "paquetes" de productos físicos, las recomendaciones deberán consistir principalmente de "cajas de herramientas" para la toma de decisiones. Tales recomendaciones necesitarán tomar en cuenta los elementos fundamentales de interacciones complejas y a menudo altamente no lineales entre los factores físicos, y entre éstos y las variables económicas y del medio ambiente, que determinan la viabilidad de las prácticas de manejo. Este cambio en el enfoque y en la naturaleza de las recomendaciones para las regiones que ya experimentaron la Revolución Verde podría requerir que los investigadores agrícolas en estas regiones también modifiquen sus métodos de investigación.

Debido a que la eficiencia en la utilización de los insumos agrícolas es multifacética, los investigadores agrícolas en regiones que ya experimentaron la Revolución Verde que intenten mejorarla necesitarán conciliar objetivos múltiples que no siempre son mutuamente compatibles. La eficiencia de los insumos incluye tanto a la eficiencia técnica, que es la porción de los insumos que se utiliza efectivamente para sus propósitos previstos, y la eficiencia de asignación (o eficiencia económica), que es la maximización de las utilidades de los agricultores. Por lo tanto, los investigadores en regiones que ya experimentaron la Revolución Verde se enfrentan a la tarea de diseñar tecnologías que mejoren ambas eficiencias, la técnica y la de asignación. Su trabajo no es simple porque las tecnologías técnicamente más eficientes no siempre son las más redituables para los agricultores. Surge una complicación adicional en el hecho que las mejoras en la eficiencia técnica no necesariamente llevan a niveles inferiores en el uso de los insumos. Por lo tanto, las mejoras que se dirigen hacia el uso más eficiente de los insumos, pueden entrar en conflicto con las de-

mandas sociales de salud, de la sustentabilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas, y de un medio ambiente más limpio.

De hecho, debido a que los agricultores típicamente no incluyen en sus costos de producción su contribución a los daños al medio ambiente, efecto del proceso de producción, ellos tienden a optar de manera racional por tecnologías que son relativamente más contaminantes que las alternativas disponibles.

Las recomendaciones afinadas que se requieren para la agricultura postRevolución Verde necesitarán basarse en evaluaciones más precisas de la respuesta de un cultivo a los insumos. Un investigador agrícola que intente mejorar la eficiencia de los insumos ya no podrá permitirse el lujo de ignorar la posibilidad de cometer errores de especificación de la respuesta de un cultivo a los insumos, dado que esos errores pueden tener implicaciones importantes en sus inferencias. Si los errores de especificación de la forma de la función de respuesta de una cosecha a los insumos sesgan las evaluaciones, el investigador llegará a las conclusiones erróneas con respecto a la eficiencia del uso de los insumos por parte del agricultor, diseñará tecnologías alternativas inadecuadas, y formulará recomendaciones no viables que los agricultores no acatarán.

La eficiencia en los insumos es de hecho el efecto de un proceso multidimensional del manejo de los mismos por parte del agricultor; es el resultado no sólo de las decisiones del agricultor en cuanto a sus opciones con respecto a la dosis total de insumos, sino también de los tiempos y métodos de aplicación, de la distribución de la dosis total entre las aplicaciones, así como de la formulación particular del suministro. Si las recomendaciones han de afectar la eficiencia de los insumos, tendrán que considerar todos los factores que determinen la eficiencia de los mismos. Los modelos de respuesta de los insumos que se requieren para diseñar tales recomendaciones, por lo tanto, tendrán que ser multidimensionales.

Finalmente, los investigadores agrícolas que persiguen una eficiencia mejorada en los insumos en las regiones posteriores a la Revolución Ver-

de, podrían tener que reconocer que la incertidumbre en la producción agrícola es ubicua, aunque en varios grados y con efectos variables en el comportamiento de los agricultores. Los agricultores que enfrentan la incertidumbre no pueden evitar imaginar (conjeturas informadas) el valor futuro de variables económicas fortuitas, tales como los precios de insumos y los de la producción; o sobre el comportamiento futuro de variables del medio ambiente y biológicas, también fortuitas, tales como el clima y las plagas; o bien, respecto al actual "estado de cosas" tal como la fertilidad del suelo. Debido a que las conjeturas educadas por parte de los agricultores acerca del presente y del futuro casi seguramente serán erróneas la mayoría de las veces, esto significa que aún si las prácticas de manejo de insumos son eficientes en términos de asignación *ex ante*, usualmente no serán eficientes *ex post*. En consecuencia, a menos que los investigadores agrícolas conceptualicen a la eficiencia de asignación bajo la misma perspectiva que los agricultores, esto es, de manera *ex ante*, sus conclusiones posiblemente serán erróneas y sus recomendaciones inadecuadas.

Los capítulos siguientes se refieren primordialmente a la metodología. Se propone un marco de trabajo analítico que, en contraste con los marcos de referencia convencionales de análisis de la eficiencia, incorpora explícitamente las incertidumbres y las restricciones que enfrentan los agricultores. Sin embargo, la estructura general del análisis tiene una aplicación más amplia, ya que muchos de los temas que se abordan son comunes a otras regiones, otros cultivos, y aún otros insumos.

El análisis presenta una representación general de la respuesta del nitrógeno y brinda una definición detallada de las mejoras en la eficiencia técnica en la utilización de los insumos, de los factores que determinan tales mejoras, y de por qué éstas no necesariamente deberán implicar una menor utilización de insumos. El artículo concluye con una discusión acerca de la especificación de la curva de respuesta del nitrógeno, y de los efectos de los errores de especificación.

La conceptualización de cambios en la eficiencia técnica de un nutriente aplicado

La evaluación precisa por parte de los investigadores agrícolas de la forma y desplazamientos de la curva de respuesta de un nutriente es de fundamental importancia para el estudio de la eficiencia técnica del nutriente aplicado; es decir, de la proporción del nutriente aplicado que efectivamente utiliza el cultivo. Las curvas de respuesta de los nutrientes representan la relación entre las cantidades de un nutriente aplicado y la producción resultante. La pendiente de tales curvas es el producto marginal físico del nutriente aplicado. El cociente entre la producción y el nutriente, que se representa por vectores que parten del punto de producción cero, del "origen", hasta un punto dado en la curva, es el producto físico promedio del nutriente. Los aumentos en el producto físico promedio indican mejoras en la eficiencia técnica.

Las mejoras en la eficiencia técnica no necesariamente implican una disminución en las cantidades asignadas óptimas de las aplicaciones del nutriente. Este comentario es necesario porque contradice la noción arraigada (ver por ejemplo Vitousek *et al.*, 1997; Ramos, 1996; Bacon, 1995; y Hagin y Lowengart, 1996) en cuanto a que tales mejoras conllevan a una utilización inferior del

nutriente, y a que por lo tanto, generan disminuciones en las pérdidas absolutas de nutrientes al medio ambiente. Específicamente, cuando las mejoras en la eficiencia técnica manifiestas por aumentos en el producto promedio de la aplicación de un nutriente para cada nivel de nutrientes, también se asocian con un mayor producto marginal del nutriente aplicado para cada nivel de nutriente, tales mejoras en eficiencia técnica resultan siempre en un incremento en la dosis de económicamente óptima del nutriente. En este caso, por lo tanto, las mejoras en la eficiencia técnica pueden implicar una mayor degradación del medio ambiente, ya que se perderán cantidades absolutas mayores del mismo.

Debido a que esta definición más sutil de las mejoras en la eficiencia técnica, hasta donde el autor conoce, no se ha conceptualizado de manera explícita en otro sitio, es apropiada una explicación más detallada. Una mejora *débil* en la eficiencia técnica ocurre cuando, para cada nivel de nutriente aplicado, existe un aumento en el nivel de producto promedio, pero con una caída en el producto marginal. Este caso se denota en la Figura 1a, para el caso del fertilizante nitrogenado, por medio del desplazamiento positivo de la curva de respuesta de nitrógeno F a la curva F' . Mientras que el desplazamiento hacia arriba aumenta el producto promedio de nitrógeno

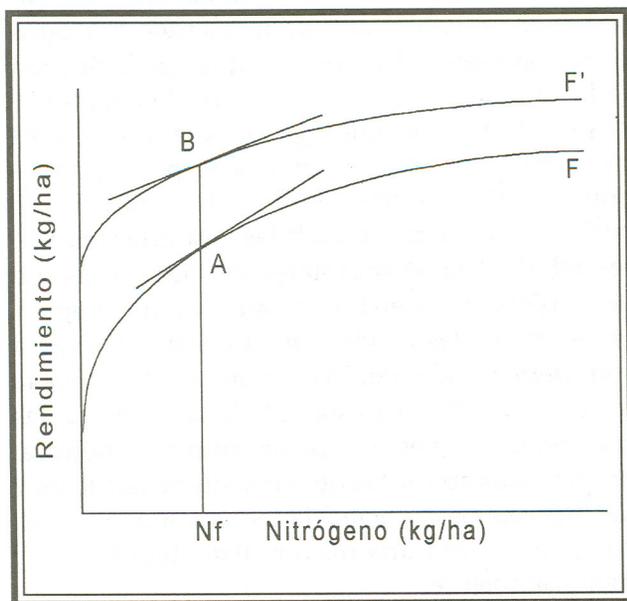


FIG. 1A. UNA MEJORA DÉBIL EN LA EFICIENCIA TÉCNICA.

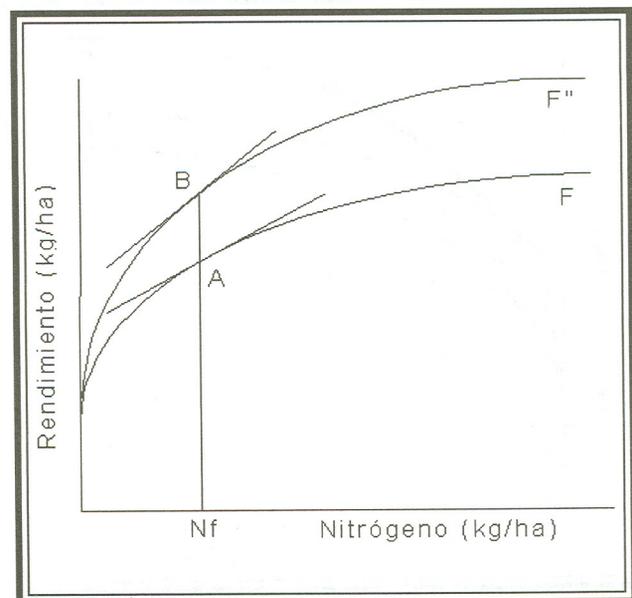


FIG. 1B. UNA MEJORA FUERTE EN LA EFICIENCIA TÉCNICA.

aplicado para cada nivel de nitrógeno, disminuye su producto marginal para cada nivel de nitrógeno. Entonces, una aplicación de Nf kilogramos de nitrógeno por hectárea se asocia con un producto marginal (igual a la pendiente de su tangente en el punto B) en la curva F' , que es inferior que aquel (igual a la pendiente de su tangente en el punto A) en la curva F .

En contraste, ocurre una mejora *fuerte* en la eficiencia técnica cuando el desplazamiento hacia arriba de la curva de respuesta del nutriente, asociado a un aumento en el producto promedio del nutriente para cada nivel de nutriente, también resulta en un incremento del producto marginal del nutriente para cada nivel de nutriente aplicado. Este caso está ilustrado en la Figura 1b, para fertilizante nitrogenado, donde la curva F'' es fuertemente superior en términos de eficiencia técnica, a la curva F , ya que para todo nivel de aplicación Nf , la pendiente correspondiente de la curva F'' es mayor que la de la curva F .

Las mejoras *fuertes* y las *débiles* en la eficiencia técnica tienen implicaciones opuestas en cuanto a la dirección del movimiento de la dosis de nutrientes económicamente eficiente. Sobre la base de que, con los demás aspectos constantes, los productos marginales más elevados para cada

nivel de nutriente también significan ingresos **marginales superiores** para cada nivel del nutriente, las dosis económicamente eficientes para un cociente determinado de precio del nutriente/precio del producto, se incrementa necesariamente cuando la mejora en la eficiencia técnica es *fuerte*, y disminuyen cuando la mejora en la eficiencia técnica es *débil*. Este caso se ilustra en la Figura 2, donde la curva F'' representa una mejora *fuerte* en la eficiencia técnica respecto a la curva F , y donde la curva F' representa una mejora *débil* en la eficiencia técnica respecto a la curva F . La aplicación óptima económica de nitrógeno, Nf'' , que se asocia con una mejora *fuerte* de la eficiencia técnica se determina en el punto D, donde la curva F'' es tangente al cociente del precio del fertilizante nitrogenado y el precio del trigo, Pn/Pw . De manera análoga, el punto E determina la aplicación óptima económica, Nf' para una mejora *débil* de la eficiencia técnica. Por lo tanto, un agricultor racional que maximice sus ganancias, y que experimente una mejoría de la eficiencia técnica, incrementará o disminuirá las dosis de nitrógeno, dependiendo, respectivamente, de si la mejora incrementó o disminuyó el producto marginal del insumo.

Entonces, las mejoras en la eficiencia técnica de un nutriente aplicado no solamente aumentan la proporción del nutriente que es utilizado por el cultivo, sino que también resultan en modificaciones en las cantidades de nutrientes aplicados porque afectan la dosis óptima de asignación para cada conjunto de precios relativos de insumos y de producción. Sin embargo, por definición, tales mejoras necesariamente implicarán pérdidas proporcionales de nutrientes al medio ambiente, lo cual no redundará en pérdidas absolutas inferiores debido a que dosis totales más altas pudiesen ser más eficientes en términos económicos en los casos en que las mejoras en la eficiencia técnica son *fuertes*. Sólo cuando las mejoras en eficiencia técnica son *débiles*, y están por lo tanto asociadas con disminuciones en la dosis óptima económica, las pérdidas absolutas de nutriente se reducen, y las mejoras en la eficiencia técnica son entonces compatibles con una mayor sustentabilidad del medio ambiente.

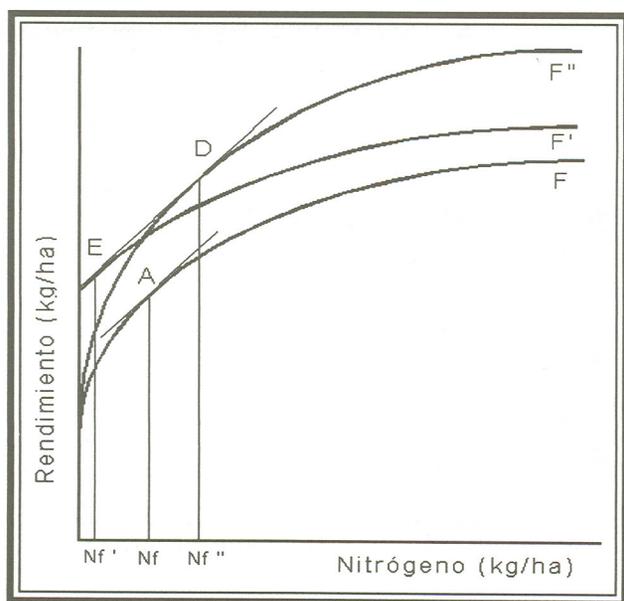


FIG. 2. DOSIS ECONÓMICAMENTE ÓPTIMAS DE APLICACIONES DE NITRÓGENO ANTE MEJORAS DÉBILES Y FUERTES EN LA EFICIENCIA TÉCNICA.

La importancia del nitrógeno residual en el suelo

Debido a que la curva de respuesta del nitrógeno puede cambiar como resultado de factores exógenos ajenos al control inmediato por parte del agricultor, las mejoras en la eficiencia técnica no necesariamente son atribuibles al cambio tecnológico. Por ejemplo, los cambios en el nitrógeno residual, que es el nitrógeno que permanece en el suelo después del barbecho de la cosecha previa, también modifican el nivel de eficiencia técnica del nitrógeno aplicado. El conocimiento del nitrógeno residual es por lo tanto importante no sólo para el agricultor, sino para el investigador agrícola que estudia la eficiencia del nitrógeno.

Una versión modificada de Byerlee (1990) basada en su formulación general de una curva de respuesta al nitrógeno es útil para ilustrar la importancia del nitrógeno residual:

$$Y = F[Nf, U, \Theta, M, T] \quad (1)$$

donde:

Y = rendimiento en kg./ha

Nf = total de nitrógeno aplicado durante el ciclo, en kg./ha

U = un vector de variables aleatorias específicas a la localidad, incluyendo la fertilidad del suelo (niveles de nutrientes individuales, incluso nitrógeno) antes de que se lleven a cabo las aplicaciones para el ciclo relevante, e infestaciones de plagas.

Θ = un vector de variables aleatorias del medio ambiente, tales como el clima, y otras menos específicas de la localidad.

M = un vector de otros componentes del manejo de nitrógeno, tales como los momentos de aplicación, su método, la distribución de las aplicaciones durante el ciclo del cultivo, y la formulación comercial del nitrógeno.

T = el resto de la tecnología que se utiliza para producir el cultivo, incluyendo aquella utilizada en la aplicación de otros nutrientes.

Cuando menos en principio (esto es, en ausencia de restricciones presupuestarias o de políticas restrictivas), cuánto nitrógeno aplicar, Nf , es una variable de decisión que está completamente bajo el control del agricultor. Las variables M y T también son variables de decisión bajo el control del agricultor, cuando menos dentro de los límites de la tecnología disponible.² El agricultor no tiene control absoluto sobre las variables que son elementos de U y de Θ . Aunque él puede condicionar de manera importante algunas de ellas (*por ejemplo*, los niveles de los nutrientes en el suelo y la población de plagas) por medio del manejo previo de su parcela, ellas se caracterizan por un grado alto de aleatoriedad. El agricultor no conoce con certeza ni a U ni a Θ al momento de tomar decisiones con respecto a Nf , M , o T , porque U y Θ se manifiestan plenamente sólo después de que el agricultor ha tomado sus decisiones de fertilización. Además, los indicadores de los valores actuales y futuros de U y Θ son imprecisos. Las pruebas de contenido de nitrógeno en el suelo, por ejemplo, pueden proveer tan sólo indicadores aproximados del nitrógeno que se encuentra en el suelo antes de las aplicaciones y que está disponible para las plantas.

Ya que, junto con las variables M y T , y aquellas contenidas en U y Θ “desplazan” a la curva de respuesta del nitrógeno, también causan variaciones en la eficiencia del nitrógeno aplicado. En consecuencia, los investigadores agrícolas o los agricultores que observan estos desplazamientos no deben de atribuirselos *a priori*, únicamente al cambio tecnológico (por ejemplo, a cambios en M o en T). Este punto es particularmente importante con respecto a la fertilidad del suelo en general, y particularmente en relación con el nitrógeno residual. Aunque los análisis existentes acerca de la evolución de la eficiencia en la utilización de fertilizantes han reconocido la necesidad de tomar en consideración a la fertilidad del suelo, éstos a menudo han errado al no incorporar medidas explícitas de su variación.³ Si, por ejemplo, los investigadores agrícolas observan una disminución en la diferencia entre las

² El total del nitrógeno aplicado, Nf , es un agregado de las cantidades aplicadas durante aplicaciones distintas a lo largo del ciclo, y a partir de formulaciones diferentes que tienen características físicas distintas (tales como la volatilidad), así como precios dispares. Por lo tanto, Nf es una función del manejo, M . La discusión detallada de este punto no entra dentro del ámbito de este artículo.

³ Por ejemplo, ver Fujisaka (1954); Byerlee y Siddiq (1994); y Byerlee (1990).

dosis recomendadas y aplicadas, de un ciclo a otro, pero desconocen cómo han cambiado los niveles de nitrógeno residual en los campos del agricultor, no tienen manera alguna bien fundada para determinar qué tanto del cambio fue resultado del progreso tecnológico.

El efecto de los cambios en la fertilidad del suelo sobre la forma de la curva de respuesta a los nutrientes puede ilustrarse matemáticamente, en el caso del nitrógeno aplicado, en una curva de respuesta cuadrática. El nitrógeno del suelo antes del inicio del ciclo, o nitrógeno residual, Nr , se presenta de manera explícita como una parte del nitrógeno total del suelo, N , y consecuentemente ya no se encuentran de manera implícita en las variables del vector U . Las variaciones en el nitrógeno residual modifican los productos promedio y marginales del nitrógeno aplicado para cada nivel de nitrógeno aplicado. Considérese una representación de la curva de respuesta del nitrógeno, con la siguiente formulación cuadrática:⁴

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 N - \alpha_2 N^2 + \Sigma U + \Sigma \Theta$$

con α_1 y $\alpha_2 \geq 0$ (2)

donde N es el nitrógeno total en el suelo, igual a la suma del nitrógeno aplicado, Nf , y el nitrógeno residual, Nr . Una formulación alternativa de la ecuación (2) es:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1(Nf + Nr) - \alpha_2(Nf + Nr)^2 + \Sigma U + \Sigma \Theta$$

(2a)

y su producto marginal es:

$$\delta Y / \delta Nf = \alpha_1 - 2\alpha_2 Nf - 2\alpha_2 Nr$$

(2b)

De la ecuación (2a) está claro que un incremento en el nitrógeno residual se puede asociar con un aumento en el producto promedio de nitrógeno aplicado (siempre y cuando $\alpha_1(Nf + Nr) > \alpha_2(Nf + Nr)^2$, llámese esta región de nitrógeno aplicado "región 1") o con una disminución en el producto promedio de nitrógeno aplicado (cuando, con niveles suficientemente elevados de Nf , $\alpha_1(Nf +$

$Nr) < \alpha_2(Nf + Nr)^2$, llámese esta región de nitrógeno aplicado "región 2"). Pero, como se indica en la ecuación (2b), en todos los niveles de nitrógeno aplicado, un aumento de nitrógeno residual reduce el producto marginal del nitrógeno aplicado. La región 1 de la curva representa la región relevante para la aplicación económicamente óptima de nitrógeno, ya que el producto marginal es positivo solo en esta región. Aquí, las mejoras en la eficiencia técnica que se lograrían con tan sólo un incremento en el nitrógeno residual son del tipo *débil*, y por lo tanto, se le asociaría con una disminución en la aplicación económicamente óptima de nitrógeno.

Una ilustración gráfica del efecto de las variaciones en el nitrógeno residual en la forma de la curva de respuesta del nitrógeno se presenta en la Figura 3. Esta representación gráfica es especialmente relevante porque se basa en el análisis de Byerlee (1990) de "las etapas del cambio tecnológico" en los sistemas agrícolas intensivos, pero implica una interpretación alternativa de su análisis. En la gráfica, el fertilizante nitrogenado aplicado, Nf , se representa por valores positivos en el eje horizontal. Los valores negativos sobre el mismo eje indican el nitrógeno residual, Nr . Byerlee identificó cuatro fases en el cambio tecnológico de los sistemas agrícolas intensivos durante las décadas pasadas:

1. La fase previa a la Revolución Verde, cuando los aumentos en productividad por unidad de tierra son modestos, y donde la expansión del área plantada con granos alimenticios, especialmente la de riego, jugaron un papel crucial en el incremento de la producción de alimentos. Esta fase está representada por un movimiento a lo largo de la curva de respuesta de nitrógeno F , desde el punto O hasta el punto A .
2. La fase de la Revolución Verde, que se inicia a partir de la adopción de nuevas variedades de alto rendimiento (HYV) que reaccionan significativamente a las aplicaciones de nutrientes, principalmente a los fertilizantes nitrogenados, y que multiplican el potencial para incrementar dramáticamente la productividad de las tierras agrícolas cada vez más escasas. La introducción de las HYV desplaza

⁴ Aunque la cualidad aditiva de los dos últimos términos de la ecuación (2) es improbable, ésta no influye en los argumentos de la presente discusión.

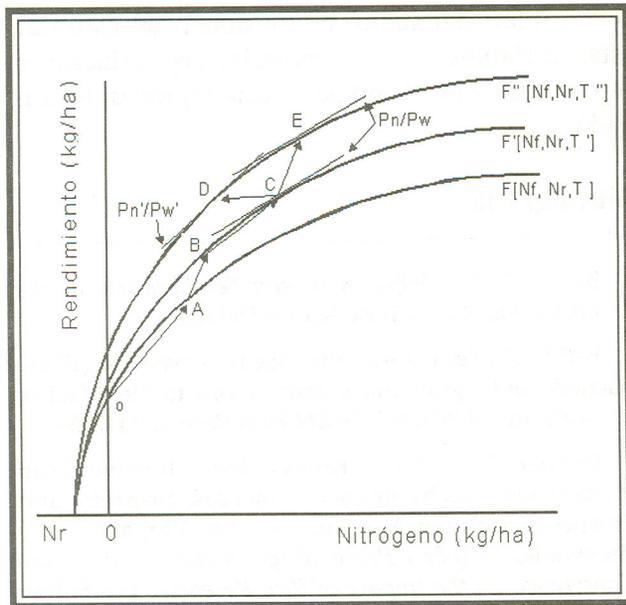


FIG. 3. ETAPAS DEL CAMBIO TECNOLÓGICO EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS INTENSIVOS.

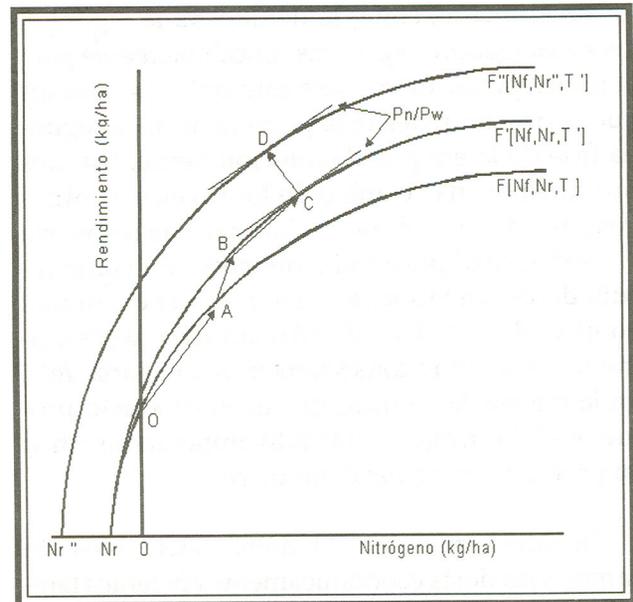


FIG. 4. MEJORAMIENTO EN LA EFICIENCIA TÉCNICA ORIGINADO EXCLUSIVAMENTE POR UN INCREMENTO EN EL NITRÓGENO RESIDUAL DEL SUELO.

de manera considerable a la curva de respuesta del nitrógeno hacia arriba, desde F hasta F' , y permite la aplicación más abundante de fertilizantes nitrogenados. Esta es una mejora fuerte en la eficiencia técnica, ya que tanto Y/Nf como $\delta Y/\delta Nf$ aumentan. Pero los agricultores todavía se encuentran lejos de lograr la eficiencia económica, son incapaces de explotar inmediatamente los beneficios completos de la nueva tecnología, y así continúan operando en el punto B , abajo de la frontera tecnológica F'' .

3. La primera fase posterior a la Revolución Verde, cuando los agricultores continúan aumentando las aplicaciones de nutrientes y se acercan a la eficiencia económica. Esta fase está representada en el punto C , en que el valor marginal de cada nutriente se acerca a su precio de adquisición.
4. La segunda fase posterior a la Revolución Verde se inicia después de que el uso de nutrientes alcanzó niveles altos. En esta etapa, la experiencia con tecnologías nuevas junto con cambios institucionales y de políticas de apoyo, dan al agricultor la habilidad administrativa para mejorar el manejo de nutrientes. Por otro lado, el manejo de información sustituye a la

utilización extensiva de los nutrientes, resultando en una mejor eficiencia en el uso de los mismos. Aunque las mejoras en los rendimientos son menos impresionantes que en las etapas previas, los aumentos en la productividad de los nutrientes pueden ser bastante rápidos. En contraste con las fases previas, la investigación en el manejo de los recursos y cultivos para mejorar la eficiencia en el uso de los nutrientes se torna relativamente más importante durante la era posterior a la Revolución Verde. Este cambio se representa por un movimiento hacia la frontera de producción, F'' . La utilización de nutrientes podrá expandirse sólo de manera modesta durante esta etapa, si los agricultores se desplazan desde C hasta E , o, alternativamente, podría reducirse al mismo tiempo de mantener rendimientos cuando menos tan altos como los del punto C , con un desplazamiento desde C hasta D .

⁵ Los cambios drásticos en el manejo de los cultivos originados por las tecnologías de la Revolución Verde indudablemente han modificado los niveles de nitrógeno en el suelo. La dirección y el grado de tales cambios es, sin embargo, una cuestión empírica. En algunas situaciones, las altas dosis de nitrógeno combinadas con cosechas múltiples por cada año calendario podrían haber resultado en niveles más elevados de nitrógeno residual de ciclo a ciclo. La mayor contaminación del suelo y del agua por el nitrógeno originado de los fertilizantes agrícolas por sí misma sugiere este hecho (Vitousek et al. 1997).

Sin embargo, como lo demuestra la Figura 4, los investigadores agrícolas concebiblemente pueden interpretar de manera diferente los cambios que se observan desde la primera hasta la segunda fase de la era postRevolución Verde, basados únicamente en el cambio de los niveles de nitrógeno residual en el suelo.⁵ La curva de respuesta F' se desplaza positivamente hasta F'' como resultado de un aumento en el nitrógeno residual en el suelo, Nr . Este desplazamiento necesariamente tiene como consecuencia una mejoría débil en la eficiencia técnica, ya que el producto promedio del nitrógeno aplicado aumenta mientras su producto marginal disminuye.

Debido a que, con los demás elementos sin cambio, las dosis económicamente eficientes también disminuyen, el movimiento desde C hasta D se explica únicamente por un incremento en el nitrógeno residual; en otras palabras, el movimiento ha ocurrido mientras la tecnología se ha mantenido constante.

Conclusiones

La discusión mostró por qué, al contrario de la noción comúnmente aceptada, las mejoras en la eficiencia técnica de los nutrientes (desplazamientos hacia arriba de las curvas de respuesta de los nutrientes) no necesariamente implican una disminución en las cantidades económicamente óptimas de aplicaciones de nutrientes. Se demostró, por lo tanto, que las mejoras en la eficiencia técnica en el uso de los nutrientes no necesariamente resultan en dosis menores de nutrientes, y son, por lo tanto posiblemente perjudiciales al medio ambiente. Posteriormente, se propuso una definición más detallada de los tipos de mejoras en la eficiencia técnica del uso de los nutrientes, que considera los diferentes efectos de las mismas en las dosis óptimas económicas.

La discusión también mostró por qué los investigadores agrícolas deben de saber lo que sucedió en el pasado para entender los factores que subyacen a los niveles actuales de eficiencia técnica de los nutrientes aplicados. Se argumentó que ellos no solamente deben tomar en consideración los cambios de tecnología, sino también aquellos factores exógenos tales como el clima y

la fertilidad del suelo, y que deben de estudiar estas variables para comprender las variaciones espaciales de la eficiencia en una región determinada.

Bibliografía

Bacon, P. E. (1995). *Nitrogen Fertilization in the Environment*. Nueva York: Marcel Dekker.

Bell M. A., Fischer R.A., Byerlee D., y Sayre K. (1995). "Genetic and Agronomic Contributions to Yield Gains: A Case Study of Wheat." *Field Crops Research* 44: 55-65.

Byerlee, D. (1997). "Knowledge-Intensive Crop Management Technologies: Concepts, Impacts, and Prospects in Asian Agriculture." En: Pingali, P.L. y Siamwalla, A. (eds.) *Proceedings of the International Conference on the Impact of Rice Research*. Los Baños: International Rice Research Institute.

___ y Siddiq, A. (1994). "Has the Green Revolution Been Sustained? The Quantitative Impact of the Seed-Fertilizer Revolution in Pakistan Revisited." *World Development* 22: 1345-61.

___ (1990). "Technical Change, Productivity, and Sustainability in Irrigated Cropping Systems of South Asia: Emerging Issues in the Post-Green Revolution Era." *CIMMYT Economics Working Paper 90/06*. El Batán: CIMMYT.

Fujisaka, S., Harrington, L. y Hobbs, P. (1994). "Rice-Wheat in South Asia: Systems and Long-Term Priorities Established Through Diagnostic Research." *Agricultural Systems* 46: 167-87.

Hagin, J., y Lowengart, A. (1996). "Fertigation for Minimizing Environmental Pollution by Fertilizers." En: Rodríguez-Barrueco, C. (ed.) *Fertilizers and the Environment*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Meisner C.A., Acevedo E., Flores D., Sayre K., Ortiz-Monasterio J.I., y Byerlee D. (1992). "Wheat Production and Grower Practices in the Yaqui Valley, Sonora, México." *Wheat Special Report* No. 6. El Batán: CIMMYT, Texcoco, México.

Ramos, C. (1996). "Effect of Agricultural Practices on the Nitrogen Losses to the Environment." En: Rodríguez-Barrueco, C. (ed.) *Fertilizers and the Environment*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Schultz, T.W. (1964). *Transforming Traditional Agriculture*. New Haven: Yale University Press.

Vitousek P.M., Aber J.E., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schlesinger W.S., y Tilman D. (1997). "Human Alterations of the Global Nitrogen Cycle: Causes and Consequences." *Ecological Applications* 7.