

# PRINCIPIOS BASICOS DE LA EFICIENCIA DE FOSFORO Y POTASIO

T. Scott Murrell<sup>1</sup>

## Introducción

El fósforo (P) y el potasio (K) son retenidos por el suelo y pueden, por esta razón, impactar el rendimiento de los cultivos y la fertilidad del suelo por varios años después de su aplicación. Este impacto se denomina efecto "residual". En consecuencia, la eficiencia de una aplicación puede evaluarse para un solo ciclo de cultivo o para varios. La evaluación adecuada de los efectos residuales requiere de periodos largos para capturar de forma adecuada el real impacto del proceso (Syers et al., 2008). Este artículo discute dos formas de evaluar la eficiencia de nutrientes: la eficiencia agronómica (EA) y el balance parcial de nutrientes (BPN). Se seleccionaron estas eficiencias porque son parte central de los aspectos de manejo de P y K que más preocupan a los agricultores y consultores.

## Eficiencia agronómica (EA)

La EA considera cuanto incremento en rendimiento se logra por unidad de nutriente aplicado. Se define como (Snyder y Bruulsema, 2007):

$$EA = (R - R_0) / D \quad [1]$$

### Donde:

R es el rendimiento fertilizado (kg ha<sup>-1</sup>), R<sub>0</sub> es el rendimiento sin fertilizar (kg ha<sup>-1</sup>) y D es la dosis del nutriente aplicado (kg ha<sup>-1</sup>). Por esta razón, la EA es una expresión sin unidades.

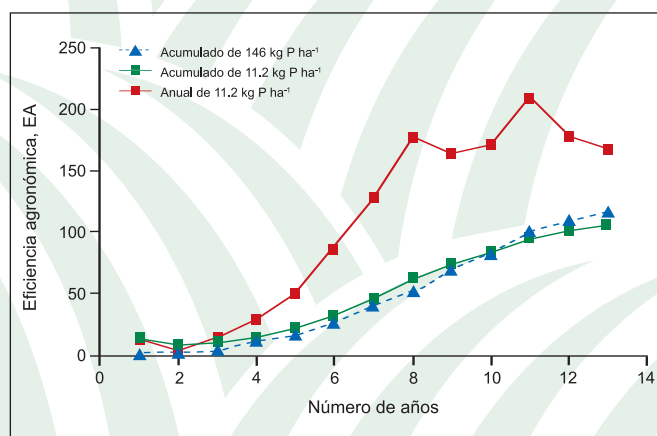
Para demostrar algunas de las diferentes formas de evaluar la EA de nutrientes como el P y K se presentan los datos de un estudio comparando los efectos en el rendimiento de maíz de la aplicación de una sola dosis de 146 kg P ha<sup>-1</sup> y aplicaciones anuales de 11.2 kg P ha<sup>-1</sup> hechas en la misma unidad experimental a través del tiempo (Webb et al., 1992). Ambas dosis fueron aplicadas al voleo e incorporadas. Las prácticas de labranza incluyeron arado de vertedera en el otoño seguida de paso de disco en primavera. Se incluyó un testigo (R<sub>0</sub>), lo que permite calcular la EA de la dosis única y de las dosis anuales de P. Para poder comparar los dos tratamientos se consideraron un total de 13 años de modo que el total acumulado de las pequeñas dosis anuales se iguale a la alta dosis aplicada una sola vez.

En la **Figura 1** se presentan los resultados de calcular la EA en forma diferente. La línea superior con la mayor EA se la calcula usando solamente el R - R<sub>0</sub> observado en un año dado con la dosis de 11.2 kg ha<sup>-1</sup>. Por esta

razón, esta EA representa una eficiencia anual que no toma en cuenta la historia de fertilización o rendimiento (corto plazo). En los otros dos casos, el R - R<sub>0</sub> es la respuesta total en rendimiento de todos los años hasta e incluyendo el año de interés. De igual forma, D representa la suma de las dosis de todos los años hasta e incluyendo el año de interés (largo plazo).

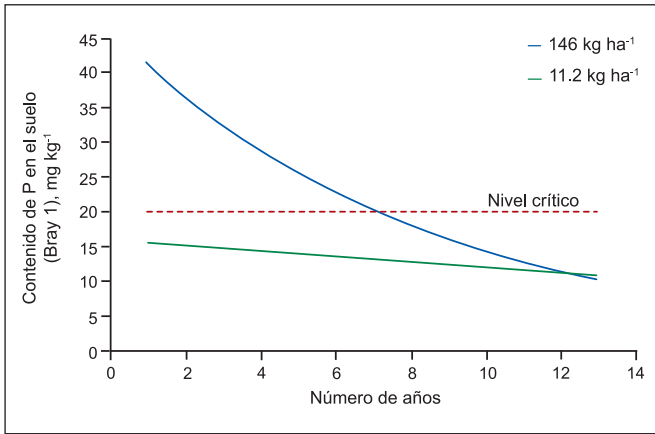
Los datos de la **Figura 1** demuestran que las evaluaciones de corto plazo que ignoran el historial de la fertilización y el historial de la respuesta en rendimiento pueden producir valores artificiales de EA. Adicionalmente, los datos demuestran también que una aplicación individual de una dosis alta de P produce una EA de largo plazo, esencialmente igual a la misma cantidad total de P dividida en dosis más pequeñas aplicadas anualmente. En consecuencia, la evaluación de aplicaciones anuales debe considerar la historia de fertilización para ser adecuadamente comparada con dosis más altas aplicadas en periodos más amplios.

Otra importante diferencia entre la aplicación de una sola dosis alta de P y la aplicación anual de dosis más pequeñas es su efecto relativo en el contenido de P determinado por el análisis de suelos (**Figura 2**). En el mismo estudio citado arriba, la dosis de 146 kg ha<sup>-1</sup> incrementó inicialmente el contenido de P en el suelo a niveles superiores al nivel crítico (20 mg kg<sup>-1</sup> P, Bray 1). A contenidos de P por debajo del nivel crítico existen las más altas probabilidades de que los contenidos de P en



**Figura 1.** Eficiencia agronómica (EA) de una sola aplicación de 146 kg P ha<sup>-1</sup> y la aplicación anual de 11.2 kg P ha<sup>-1</sup>. La EA de la aplicación anual se calculó de dos formas: 1) cada año considerado individualmente sin tomar en cuenta la historia previa de fertilización (dosis anual de 11.2 kg P ha<sup>-1</sup>) y 2) EA basada en la suma acumulada de las dosis anuales hasta e incluyendo el año de interés (acumulado de la dosis anual de 11.2 kg P ha<sup>-1</sup>) (Webb et al., 1992).

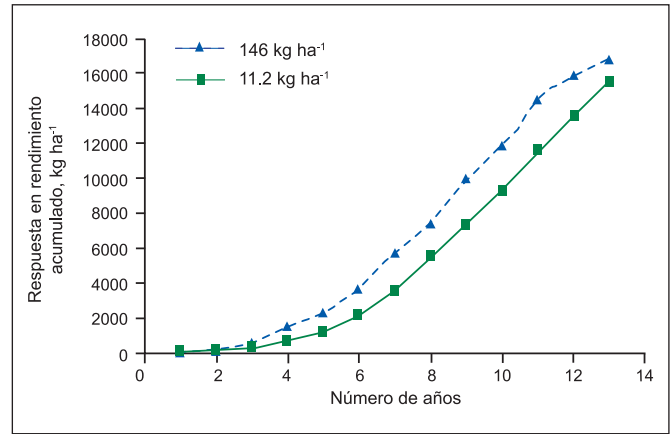
<sup>1</sup> Director para la Zona Central de Norte América del International Plant Nutrition Institute (IPNI). Correo electrónico: smurrell@ipni.net



**Figura 2. Efecto de la aplicación individual de una dosis alta de P y de una serie de aplicaciones anuales de cantidades más pequeñas en el contenido de P en el suelo. La cantidad total aplicada en el periodo de tiempo considerado fue la misma (Webb et al., 1992).**

el suelo sean muy bajos para satisfacer las necesidades del cultivo. A medida que transcurre el tiempo, sin la subsecuente aplicación de P, los niveles de P descendieron de manera exponencial y para el año 8 estuvieron por debajo del nivel crítico. Este tipo de caída exponencial ha sido observado por otros investigadores (McCollum, 1991; Syers et al., 2008). Por otro lado, las aplicaciones anuales de 11.2 kg ha<sup>-1</sup> nunca elevaron el contenido de P en el suelo a niveles mayores al nivel crítico. Al contrario, estos provocaron una constante reducción de la fertilidad del suelo. Al final del periodo considerado, ambas dosis generaron niveles bajos de P casi idénticos.

Una importante diferencia entre las dos dosis en el estudio de Webb y colaboradores (1992) se presenta en el rendimiento. La **Figura 3** muestra que la aplicación individual de una sola dosis alta resultó en rendimientos acumulados más altos en el año 4 y permanecieron altos por el resto de 13 años evaluados. El análisis económico del estudio evaluó solamente los retornos a corto plazo de las aplicaciones anuales. Sin embargo, existen implicaciones sobre la rentabilidad a largo plazo. Los rendimientos más altos obtenidos al principio son capaces de proporcionar ingresos que tienen un valor más alto cuando se consideran el periodo total de 13 años, debido a la tendencia de devaluación del dinero en el tiempo. Además, una sola compra de P podría hacerse coincidir con una época de precios más favorables del cultivo y del fertilizante, si existe suficiente capital y si la tierra es de propiedad o arrendada por un periodo largo de tiempo. En algunos casos, una sola alta inversión en fertilizante hecha en la época apropiada puede ser más rentable a largo plazo que pequeñas compras anuales que están más sujetas a las fluctuaciones del mercado. El análisis de rentabilidad debe examinar estos factores a largo plazo para entregar una visión clara del riesgo.



**Figure 3. Respuesta en rendimiento acumulado a una sola dosis alta de P y a dosis anuales más pequeñas (Webb et al., 1992).**

### Balance parcial de nutrientes (BPN)

El BPN es la relación entre la cantidad de nutriente removido en las partes cosechas del cultivo ( $U_C$ ) y la cantidad de nutriente aplicado (Snyder y Bruulsema, 2007):

$$BPN = U_C / D \quad [2]$$

La precisión de la determinación del BPN se basa en: 1) determinación en el laboratorio, antes que la estimación de datos de la literatura, de la concentración del nutriente en las partes cosechadas del cultivo. 2) tener en cuenta todas las aplicaciones del nutriente, incluyendo las aplicaciones de residuos de corral y otros residuos y de fertilizantes minerales.

El objetivo principal de esta medición de eficiencia es determinar que tan cercano está el sistema a 1. Un valor de BPN cercano a 1 indica que existe un balance de masa (aplicación del nutriente a una unidad de superficie es aproximadamente igual a la remoción de esa misma superficie). Este balance es necesario para sostener el nivel de fertilidad del suelo del sistema.

Sin embargo, un BPN de 1 no garantiza que el contenido del nutriente en el suelo, según el análisis, sea estático. En un estudio con alfalfa bajo riego conducido por Fixen y Ludwick (1983), en dos suelos diferentes, se encontró que para mantener los niveles de P en el suelo se necesitaban valores de BPN de 2.2 y 1.4. Para K los valores del BPN fueron de 0.75 y 0.22. Al inicio de este estudio se utilizaron dosis altas de fertilizante que se aplicaron al voleo y luego se incorporaron y que fueron seguidas por aplicaciones anuales que no se incorporaron. Moncrief y colaboradores (1985) demostraron que la misma cantidad de K aplicada a un suelo con labranza y otro sin labranza, la aplicación a la superficie sin incorporación en el suelo sin labranza incrementó el contenido de K en los primeros 15 cm del suelo. Estos dos estudios demuestran que la distribución del nutriente dentro del suelo puede determinar si el

contenido del nutriente en el suelo permanece constante o cambia con las aplicaciones de mantenimiento hechas para mantener el BPN cerca de 1.

**Efecto de la localización de los nutrientes en la EA y el BPN**

En muchos estados del cinturón maicero de los Estados Unidos se recomienda reducir las dosis de fertilizantes si estos se aplican en banda en lugar de aplicarlas al voleo (Gerwing y Gelderman, 2005; Rehm et al., 2006; Shapiro et al., 2003). En ocasiones el grado de reducción varía con el contenido del nutriente en el suelo según el análisis (Rehm et al., 2006) y a veces no (Shapiro et al., 2003). A menudo, las dosis de aplicación en banda son la mitad de las dosis al voleo.

Esta recomendación asume que las aplicaciones en banda (B) son generalmente más eficientes que las aplicaciones al voleo (V) y que esencialmente producen la misma respuesta en rendimiento que las aplicaciones al voleo. Este razonamiento se presenta gráficamente en la **Figura 4** donde se escogió el popular modelo cuadrático-meseta ( $R = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2$  para  $D \leq D_{max}$ ;  $R = R_{max}$  para  $D > D_{max}$ ) para modelar la respuesta. Esta figura muestra que la EA es el doble cuando se hace la aplicación en banda en comparación con la aplicación al voleo ( $EA_B = 2EA_V$ , gráfico inferior). Este duplicamiento en EA se produce estrictamente por el hecho que se usa la mitad de la dosis con la aplicación en banda para producir el máximo rendimiento ( $R_{max}$ ) que con la aplicación al voleo ( $D_{max-B} = 0.5D_{max-V}$ , parte superior del gráfico). La mayor eficiencia de la aplicación en banda se puede expresar con la relación  $D_{max-B} / D_{max-V}$ , que en este caso es igual a 0.5.

Se puede demostrar que en el escenario de respuesta descrito arriba se pueden presentar las siguientes relaciones. En primer lugar, los interceptos ( $\beta_0$ ) de las dos ecuaciones son los mismos:

$$\beta_{0V} = \beta_{0B} \quad [3]$$

**Donde:**

$\beta_{0V}$  es el intercepto de la curva de respuesta a la aplicación al voleo y  $\beta_{0B}$  es el intercepto de la aplicación en banda. Luego, el coeficiente de la sección lineal de la pendiente ( $\beta_1$ ) de la curva de respuesta para las dosis al voleo se puede describir de la siguiente forma:

$$\beta_{1V} = (D_{max-B} / D_{max-V}) \beta_{1B} \quad [4]$$

**Donde:**

$\beta_{1V}$  es el coeficiente de la parte lineal de la curva de las dosis al voleo y  $\beta_{1B}$  es el mismo coeficiente para las dosis en banda. De igual manera, la curvatura ( $\beta_2$ ) de las dos ecuaciones de respuesta se describe de la siguiente forma:

$$\beta_{2V} = (D_{max-B} / D_{max-V})^2 \beta_{2B} \quad [5]$$

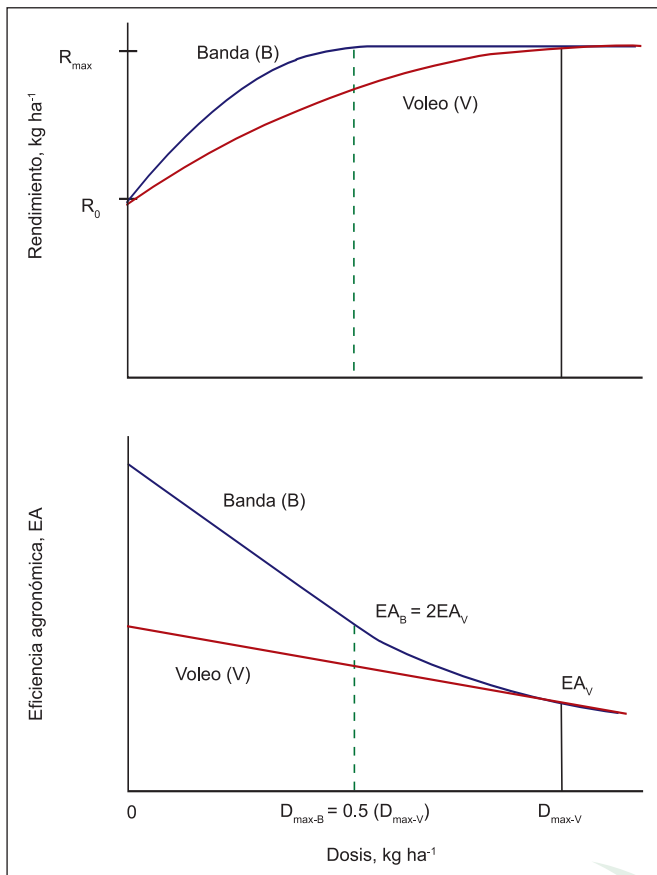
Si estas relaciones se mantienen, el mejor desempeño de la EA de las aplicaciones en banda sobre las aplicaciones al voleo es una constante a través de todas las dosis de aplicación. La implicación práctica de esta relación es que si los agricultores tienen que reducir las dosis por debajo de aquellas necesarias para producir máximo rendimiento, las aplicaciones en banda de estas dosis reducidas todavía tendrán la misma eficiencia de aquellas que producen el máximo rendimiento.

Investigación para demostrar la mayor eficiencia de las aplicaciones en banda fue conducida previamente por varios grupos (Welch et al., 1966a; Welch et al., 1966b, Peterson et al., 1981). Todos estos investigadores compararon las aplicaciones al voleo con las aplicaciones en banda durante un solo ciclo de cultivo y no consideraron los efectos residuales. Todos estos estudios también reportaron que la respuesta a las aplicaciones era cuadrática, permitiendo probar la relación teórica descrita anteriormente.

Se reportaron 12 sitios-año, 9 que investigaron P y 3 K. De estos 12 estudios, solamente un sitio-año se ajustó a la respuesta teórica descrita en la **Figura 4**. El estudio mostró una relación  $D_{max-B} / D_{max-V} = 0.63$ , demostrando en este sitio, que tenía un bajo contenido de P, que la aplicación en banda puede producir la misma respuesta en rendimiento con dos tercios de la dosis aplicada al voleo. En 5 sitios-año no se aplicaron dosis suficientes para maximizar la respuesta a ambos métodos de aplicación. En los 4 sitios-año restantes, los máximos rendimientos obtenidos por los métodos de aplicación fueron diferentes y en tres de ellos la aplicación en banda produjo rendimientos máximos más altos que las aplicaciones al voleo.

Los investigadores envueltos en estos estudios no usaron la relación teórica de la **Figura 4** para evaluar los dos tipos de aplicaciones. En lugar de esto, eligieron un nivel de rendimiento y se compararon las dosis necesarias para obtener ese rendimiento. Si bien se puede calcular la relación  $D_B / D_V$  de esta manera para un determinado juego de datos, esta relación no ofrece una visión completa de las respuestas y puede ser engañosa. Por ejemplo, es importante que el agricultor conozca que sin importar la eficiencia, las aplicaciones al voleo no serán iguales en rendimiento a las respuestas de la aplicación en banda y viceversa. Además, si el incremento en EA de un método sobre el otro no es constante en todas las dosis del nutriente en cuestión, no se puede esperar que los rendimientos a obtenerse con la dosis escogida de la relación sean los rendimientos esperados.

El trabajo de Anghinoni y Barber (1980) demostró que cuando se aplican dosis bajas de fertilizante a un suelo deficiente, las aplicaciones en banda, que fertilizan un



**Figura 4. Relaciones teóricas entre la eficiencia agronómica (EA) y el balance parcial de nutrientes (BPN) para una situación donde la dosis de mantenimiento de un nutriente (BPN = 1) es rentable en un ciclo de crecimiento, resultando en una  $EA > Q$ .**

pequeño volumen de suelo producen rendimientos más altos que aquellos obtenidos con las mismas dosis incorporadas completamente en un volumen mayor de suelo. Sin embargo, a medida que se incrementa la dosis, se necesita fertilizar un mayor volumen de suelo para maximizar el rendimiento y el rendimiento obtenido con esta dosis más alta es mayor que el rendimiento obtenido con una dosis más baja aplicada en banda. Las aplicaciones conjuntas en banda y al voleo pueden ofrecer una nutrición más completa que cualquiera de las dos utilizadas en forma individual. Los nutrientes colocados en banda cerca de la semilla proveen de la disponibilidad posicional de una banda concentrada al inicio del ciclo (Mengel y Barber, 1974). La completa incorporación de la aplicación al voleo incrementa la cantidad del nutriente disponible para un sistema radicular más extenso más tarde en el ciclo.

En los casos en los cuales un método de localización del fertilizante mejora la EA, se debe examinar cuidadosamente los resultados de la dosis reducida para determinar que tan cerca está del BPN de 1 necesario para sostener los niveles de fertilidad del suelo. En los casos donde el BPN de una dosis más eficiente es menor a 1 es importante pensar si el mejoramiento en eficiencia

a corto plazo es una buena alternativa frente a la posible reducción de la fertilidad del suelo a largo plazo si esta dosis se utiliza repetidamente.

## Bibliografía

- Anghinoni, I. and S.A. Barber. 1980. Predicting the most efficient phosphorus placement for corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:1016-1020.
- Fixen, P.E. and A.E. Ludwick. 1983. Phosphorus and potassium fertilization of irrigated alfalfa on calcareous soils: I. Soil test maintenance requirements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:107-112.
- Gerwing, J. and R. Gelderman. 2005. South Dakota fertilizer recommendations guide. Sep. 2005. EC750. South Dakota Coop. Ext. Serv., South Dakota State Univ.,
- McCullum, R.E. 1991. Buildup and decline in soil phosphorus: 30 year trends on a typical umprabuilt. *Agron. J.* 83:77-85.
- Mengel, D.B. and S.A. Barber. 1974. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. *Agron. J.* 66:399-402.
- Moncrief, J.F., P.M. Burford, and J.B. Swan. 1985. The effect of tillage on interpretation and response to soil K. *J. Fert. Iss.* 2:17-25.
- Peterson, G.A., D.H. Sander, P.H. Grabouski, and M.L. Hooker. 1981. A new look at row and broadcast phosphate recommendations for winter wheat. *Agron. J.* 73:13-17.
- Rehm, G., G. Randall, J. Lamb, and R. Eliason. 2006. Fertilizing corn in Minnesota. FO-3790-C. Rev. 2006. Minnesota Coop. Ext. Serv., St. Paul., MN.
- Shapiro, C.A., R.B. Ferguson, G.W. Hergert, A.R. Dobermann, and C.S. Wortmann. 2003. Fertilizer suggestions for corn. G74-174-A. Rev. Nov. 2003. Nebraska Coop. Ext. Serv., Univ. Nebraska, Lincoln.
- Snyder, C.S., and T.W. Bruulsema. 2007. Nutrient use efficiency and effectiveness in North America: Indices of agronomic and environmental benefit. Ref # 07076. International Plant Nutrition Institute. Norcross, GA.
- Syers, J.K., A.E. Johnson, and D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *FAO Fert. Plant Nutr. Bull.* 18. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Webb, J.R., A.P. Mallarino, and A.M. Blackmer. 1992. Effects of residual and annually applied phosphorus on soil test values and yields of corn and soybean. *J. Prod. Agric.* 5:148-152.
- Welch, L.F., P.E. Johnson, G.E. McKibben, L.V. Boone, and J.W. Pendleton. 1966a. Relative efficiency of broadcast versus banded potassium for corn. *Agron. J.* 58:618-621.
- Welch, L.F., D.L. Mulvaney, L.V. Boone, G.E. McKibben, and J.W. Pendleton. 1966b. Relative efficiency of broadcast versus banded phosphorus for corn. *Agron. J.* 58:283-287. ✱