

**ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE FOSFORO EN SUELOS ARGENTINOS:
III Relación entre la capacidad reguladora de fosfato del suelo y la
eficiencia de aplicación de fósforo para el crecimiento**

R. E. Mendoza

Centro de Ecofisiología Vegetal (CONICET - FECIC - Fund. Miguel Lillo)
Serrano 665 - 1414 Capital Federal - Argentina

RESUMEN

Se utilizaron diez suelos argentinos para comparar la capacidad reguladora de fosfato y la respuesta de plantas de "rye grass" al agregado de fósforo. La pendiente de las curvas (ecuación de Freundlich y curva de producción) se utilizaron para cuantificar tanto la capacidad reguladora como también la eficiencia de aplicación de fósforo para el crecimiento del "rye grass". La relación entre los valores de capacidad reguladora y de eficiencia de aplicación fue inversa; esta relación se vio modificada de acuerdo con el criterio utilizado para medir la eficiencia de aplicación. Las discrepancias se debieron a la influencia del fósforo nativo disponible del suelo sobre el crecimiento del "rye grass".

Palabras claves: isotermas de adsorción de fósforo, capacidad reguladora de fosfato, eficiencia de aplicación de fósforo para el crecimiento.

**PHOSPHATE ADSORPTION ISOTHERMS IN ARGENTINEAN SOILS:
III Relationship between buffering capacity and effectiveness
of phosphate for plant growth**

ABSTRACT

The Argentinean soils were used to compare the phosphate buffering capacity and the response curve to phosphate by rye grass. The slope of the curves (Freundlich equation and response curve) were used to calculate both the buffering capacity and effectiveness of the phosphate applied for plant growth. These properties were reciprocally related and the relation changed according with the criteria used to calculate the effectiveness of phosphate for plant growth. Differences were due to the effect of native phosphate on plant growth.

Key words: phosphate adsorption isotherms, phosphate buffering capacity, effectiveness of phosphate for plant growth.

INTRODUCCION

La reacción entre el fósforo agregado como fertilizante y el suelo ha sido descrita comúnmente a través de las isotermas de adsorción. La ecuación de Freundlich ha sido una de las más utilizadas en la bibliografía internacional y también ha demostrado ser una de las más adecuadas para describir la reacción en un grupo de suelos argentinos (Mendoza, 1986 a).

Una de las informaciones más valiosas que proporciona la isoterma de adsorción a través de sus coeficientes es acerca de la capacidad reguladora de fosfato del suelo; esta propiedad es una de las más importantes en relación con estudios de "disponibilidad", debido a que controla la partición del fósforo incorporado entre las fases sólida y líquida del suelo. Estudios previos han demostrado que la capacidad reguladora está inversamente relacionada con la facilidad con que se libera el fosfato adsorbido por el suelo a la solución del mismo (Holford y Mattingly, 1976 a, b); en este sentido, la capacidad reguladora es una expresión de inmovilidad del fósforo adsorbido; podría decirse entonces que la capacidad reguladora es una expresión de ineficiencia del suelo para proporcionar fósforo a la solución.

Por otra parte, la respuesta de una determinada especie al agregado de fósforo (o de cualquier otro nutriente) es descrita comúnmente por medio de la ecuación de Mitscherlich; la forma de la curva de respuesta depende de la especie (Ozanne *et al*, 1969) y del tipo de suelo sobre el cual las plantas crecen y está asociada con la eficiencia de aplicación de fósforo para el crecimiento. Surge entonces una interesante pregunta: ¿Qué relación guardan la capacidad del suelo para proporcionar fósforo a la solución (cuantificada por la capacidad reguladora) y la eficiencia de aplicación de fósforo para el crecimiento (cuantificada por los coeficientes de la ecuación de Mitscherlich)?

Estudios previos similares han arrojado diferentes resultados. En uno de ellos, no se detectó interacción entre la capacidad del suelo para adsorber fósforo y la respuesta de cinco especies cultivadas en tres suelos diferentes (Biddiscombe *et al*, 1969); mientras que en el otro, la respuesta al agregado de fósforo de dos especies cultivadas en once suelos estuvo afectada por la capacidad de adsorción de fósforo del suelo (Barrow, 1975).

Dos objetivos llevaron a la realización de este artículo; uno fue, estudiar la relación entre la capacidad

reguladora de fosfato del suelo y la característica de la respuesta de plantas de "rye grass" al agregado de fósforo y el otro fue comprobar la utilidad de la isoterma de Freundlich en estudios de interacción fósforo-suelo-planta.

MATERIALES Y METODOS

Suelos, isotermas de adsorción y ensayo de invernáculo

Detalles acerca de los suelos, isotermas de adsorción y ensayos de invernáculo en los diez han sido mencionados en los artículos anteriores de esta serie (Mendoza, 1986 a, b). En este trabajo se utilizó únicamente la ecuación de Freundlich sobre la base de que esta había demostrado ser una de las más apropiadas para la descripción de la reacción entre el fósforo y los suelos argentinos estudiados en este artículo (Mendoza, 1986 a, b).

Ecuación de Freundlich

$$Pd = ac^b \quad (1)$$

donde Pd es el fósforo adsorbido por el suelo ($\mu\text{g/g}$), c es el fósforo en solución ($\mu\text{g/mL}$) y a y b son coeficientes.

La capacidad reguladora del suelo está representada por el valor de la pendiente en cada punto de la isoterma de adsorción y por lo tanto variará de acuerdo con el valor de c utilizado para la medición; de aquí que una comparación entre pendientes de las isotermas de distintos suelos debe ser realizada a iguales valores de c. El valor de la pendiente está dado por la primera derivada de la Ec. (1):

$$\frac{dPd}{dc} = abc^{b-1} \quad (2)$$

una de las posibles comparaciones entre las pendientes puede ser realizada cuando el valor de c es igual a la unidad:

$$\frac{dPd}{dc} = ab \quad (3)$$

en este punto la capacidad reguladora de fosfato del suelo está representada por el producto de los coefi-

cientes de la ecuación de Freundlich. Este valor está asociado con la inversa de la capacidad del suelo para suministrar fósforo a la solución.

Curva de producción

La producción de materia seca acumulada al cabo de los 150 días de crecimiento de las plantas de "rye grass", se ajustó en cada suelo en función del fósforo aplicado, utilizando la siguiente ecuación:

$$y = M - N \exp(-zx) \quad (4)$$

donde y es la producción (g/maceta), x es el fósforo aplicado (mg/maceta) y M , N y z son coeficientes. M representa la máxima producción, $M-N$ la producción estimada sin la aplicación de fósforo y z es el coeficiente de curvatura de la relación y está asociado con la capacidad reguladora de fosfato del suelo (Ozanne, 1980).

La pendiente de la curva de respuesta al fósforo es propia de cada suelo y determina la eficiencia de aplicación de fósforo para el crecimiento de las plantas.

Una manera de comparar las curvas de producción entre los distintos suelos sería a través de sus pendientes; el valor de la pendiente en cada punto de la curva se puede calcular a partir de la primera derivada de la ecuación empleada para describir la respuesta del crecimiento al agregado de fósforo. En el caso de la Ec. (4) se tiene:

$$\frac{dy}{dx} = Nz \exp(-zx) \quad (5)$$

una de las posibles comparaciones se puede realizar cuando el valor de x es igual a cero:

$$\frac{dy}{dx} = Nz \quad (6)$$

El producto de los coeficientes en Ec. (6) determina el valor de la pendiente de la curva de producción cuando el fósforo aplicado (x) es igual a cero. Sin embargo, la producción de materia seca cuando x es igual a cero es dependiente del fósforo nativo disponible del suelo (q) y del fósforo contenido en la semilla (s), que utiliza la planta para crecer en el suelo sin fertilizar. Debido a que el valor de q es distinto en cada suelo, es posible que la comparación entre pendientes

por intermedio de la Ec. (6) pierda validez si no se tienen en cuenta los valores de q y s .

Conceptualmente, el valor de q representa a la cantidad de fósforo nativo disponible (mg/maceta) que debería haber sido removida del suelo sin fertilizar para obtener una producción igual a la que hubiera sido obtenida teniendo en cuenta solamente al fósforo contenido en la semilla (s). El valor de s se determinó previa digestión de diez semillas de "rye grass" en una solución nítrico-sulfúrico-perclórica, y el valor de q se estimó a partir de Ec. (4), por diferencia entre el valor de s y el valor negativo de x correspondiente a una producción y igual a cero (Tabla 1).

Los valores de q y s se sumaron a los niveles de fósforo aplicado (x) en cada suelo, obteniendo de esta forma nuevos valores de la variable independiente que incluye además del fósforo aplicado (x), al fósforo nativo disponible (q) y al fósforo contenido en la semilla (s). Sobre esta base, la Ec. (4) se simplifica a la siguiente forma:

$$y = M (1 - \exp(-zw)) \quad (7)$$

donde w es igual a la sumatoria de $x + q + s$. La Ec. (7) pasa por el origen y permite comparar las pendientes de las curvas de producción entre suelos a valores equivalentes de la variable independiente (w). El valor de la pendiente en Ec (7) cuando w es igual a cero está dado por:

$$\frac{dy}{dw} = Mz \quad (8)$$

El producto de los coeficientes en Ec. (8), permite una comparación más racional entre las pendientes de las curvas de producción, soslayando el efecto del fósforo nativo disponible sobre la producción en los tratamientos sin fertilizar.

RESULTADOS

Capacidad reguladora y curvas de producción

La Tabla 1 muestra que existieron grandes variaciones entre los valores de capacidad reguladora de fosfato de los suelos como también entre los valores de las pendientes de las curvas de producción de los suelos, de acuerdo con el criterio utilizado para definir el valor de la variable independiente empleado en el cálculo.

Tabla 1: Valores de la capacidad reguladora de fosfato calculados a partir de la ecuación de Freundlich y descripción de la respuesta de "rye grass" al fósforo por Ec. (4) (a) y Ec. (7) (b) en los diez suelos.

Suelo No	Capacidad (c) reguladora (ml/g)	Ecuación	Nº de obs.	Coeficientes			R ²	Pendiente (d)	Valor de q (e) (µg/g)
				M	N	z			
1	16,36	4	5	8,99	4,46	0,0518	0,985	0,231	13,51
		7	6	8,99	—	0,0516	0,997	0,464	—
2	8,33	4	5	6,19	4,09	0,0631	0,969	0,258	6,55
		7	6	6,20	—	0,0623	0,998	0,386	—
3	117,92	4	5	7,47	6,84	0,0219	0,997	0,150	4,00
		7	6	7,50	—	0,0211	0,998	0,159	—
4	85,79	4	5	7,88	6,88	0,0281	0,999	0,193	4,81
		7	6	7,88	—	0,0278	0,999	0,219	—
5	35,95	4	5	9,04	6,67	0,0426	0,996	0,284	7,12
		7	6	9,03	—	0,0430	0,999	0,389	—
6	27,48	4	5	7,69	6,51	0,0377	0,998	0,245	4,37
		7	6	7,68	—	0,0380	0,999	0,292	—
7	30,79	4	5	11,96	5,35	0,0502	0,992	0,269	16,01
		7	6	11,96	—	0,0502	0,999	0,600	—
8	20,59	4	5	11,36	7,82	0,0420	1,000	0,329	8,87
		7	6	11,36	—	0,0421	1,000	0,479	—
9	21,53	4	5	9,57	5,76	0,0422	0,998	0,243	12,01
		7	6	9,54	—	0,0430	0,999	0,410	—
10	8,16	4	5	9,32	1,21	0,0660	0,633	0,080	30,91
		7	6	9,32	—	0,0660	0,991	0,615	—

(a) $y = M - N \exp(-zx)$

(b) $y = M(1 - \exp(-zw))$

(c) Valor de la pendiente de la ecuación de Freundlich a una concentración en solución de 1 µg P/ml.

(d) Valor de la pendiente cuando $x = 0$ en Ec. (4) (Nz) y cuando $w = 0$ en Ec. (7) (Mz)

(e) Valor de q estimado a partir de Ec. (4)

Tanto la Ec. (4) como la Ec. (7) describieron adecuadamente la respuesta del "rye grass" al fósforo. El trazado de las curvas de ajuste de ambas ecuaciones fue similar; esto se puede visualizar gráficamente en la Fig. 1, donde un solo trazado representó a ambas curvas, y analíticamente por comparación entre los valores de los coeficientes de ambas ecuaciones (Tabla 1). Sin embargo, la Ec. (7) ofrece algunas ventajas sobre la Ec. (4) que podrían justificar su empleo. Por un lado, permite reducir el número de coeficientes de tres a dos, y por otro, incluir una observación más en los datos experimentales (punto de origen). La producción de una especie cultivada sobre una muestra de suelo sin fertilizar, estaría exclusivamente condicionada por el nivel de fósforo contenido en la semilla si el suelo careciera de fósforo nativo dispo-

nible. La curva definida por la Ec. (7) es coincidente con este concepto. Esta situación extrema no resulta del todo irreal en suelos muy deficientes en fósforo para el crecimiento vegetal, tal como en el caso de algunos suelos del oeste de Australia (Barrow, 1975).

Relación entre la capacidad reguladora y la eficiencia de aplicación de fósforo

El valor del coeficiente de curvatura (z) de las curvas de producción estuvo inversamente relacionado con la capacidad reguladora de fosfato de los suelos; la relación fue curvilínea y no se vio afectada mayormente con la ecuación de producción empleada para describir la respuesta del "rye grass" al agregado de

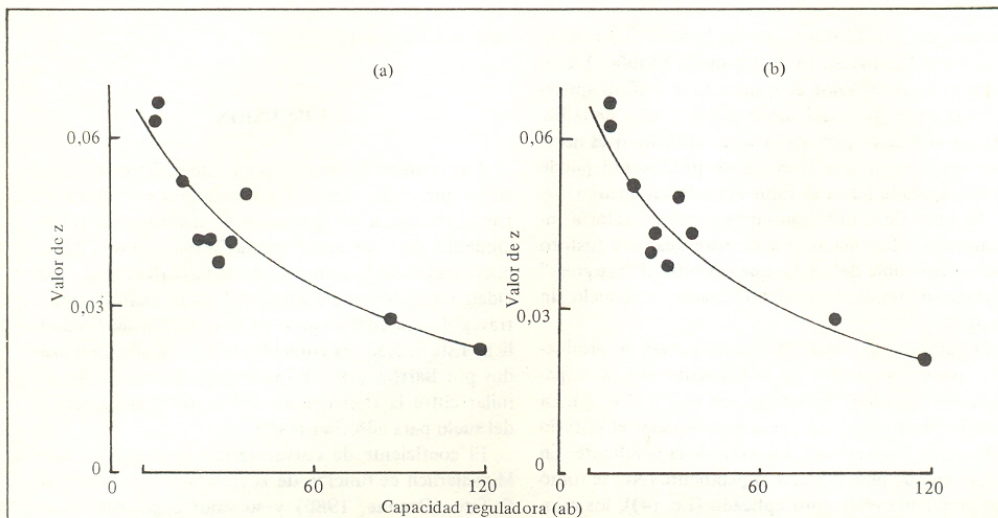


Figura 2: Relación entre el coeficiente de curvatura (z) de la Ec. (4) (Fig. 2 a) y Ec. (7) (Fig. 2 b) y la capacidad reguladora de fósforo del suelo (ab).
 Fig. 2 a; $z = 1/(15,497 + 0,250 ab)$; $R^2 = 0,92$
 Fig. 2 b; $z = 1/(15,221 + 0,263 ab)$; $R^2 = 0,94$

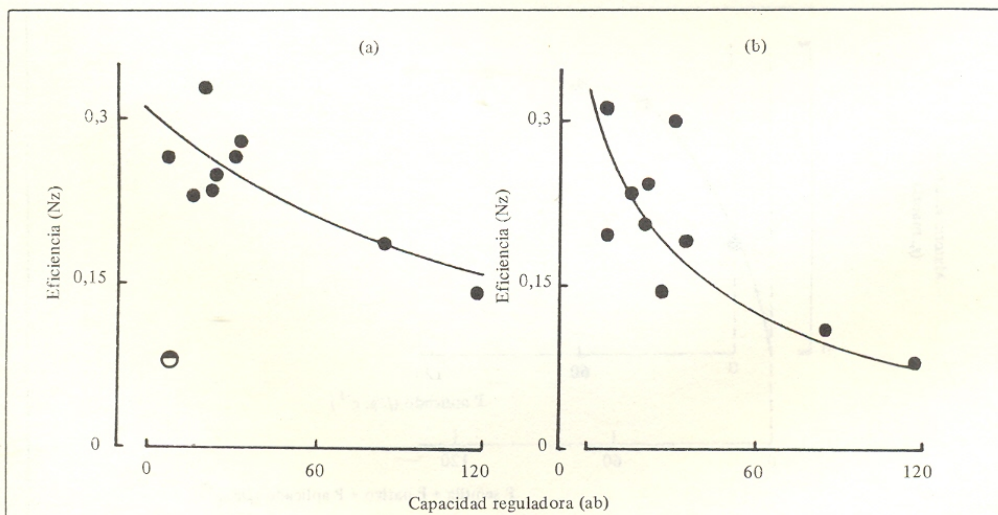


Figura 3: Relación entre la eficiencia de aplicación de fósforo para el crecimiento (Nz) de acuerdo con Ec. (4) (Fig. 3 a) y con Ec. (7) (Mz) (Fig. 3 b) y la capacidad reguladora de fósforo del suelo (ab).
 Fig. 3 a; la curva de ajuste corresponde a 9 observaciones (suelo N° 10 (•) no incluido); $Nz = 1/(3,232 + 0,026 ab)$; $R^2 = 0,78$
 Fig. 3 b; $Mz = 1/(1,532 + 0,038 ab)$; $R^2 = 0,86$

fósforo (Fig. 2). El valor de z de la Ec. (7), fue similar al de la Ec. (4) en todos los suelos (Tabla 1); esto se debió a que el valor de q sumado al fósforo aplicado en la Ec. (7) fue calculado sobre la base de la Ec. (4). Sin embargo, para emplear el valor de q es necesario presuponer que la curva de producción puede ser extrapolada hasta el valor cero de ordenada (Fig. 1). El valor de q utilizado en este trabajo estaría íntimamente relacionado con el valor real del fósforo nativo disponible del suelo, que permitió al "rye grass" alcanzar un rendimiento determinado en el suelo sin fertilizar.

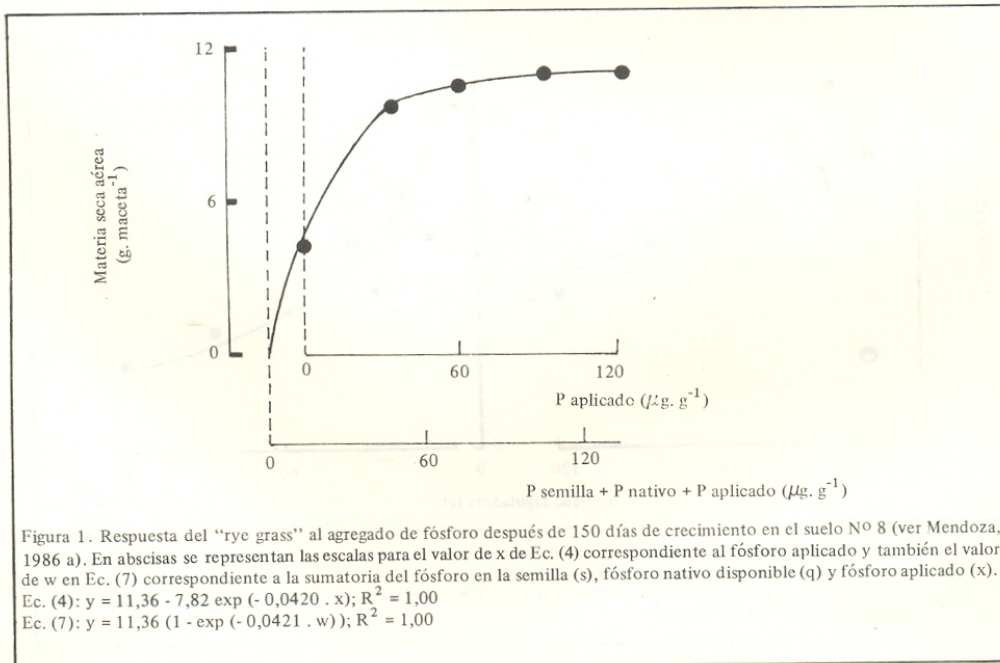
El valor de la pendiente de las curvas de producción estuvo inversamente relacionado con la capacidad reguladora de fosfato de los suelos (Fig. 3). La relación se vio modificada de acuerdo con el criterio utilizado para el cálculo del valor de la pendiente. En el caso en que para calcular la pendiente (Nz) se tomó sólo en cuenta el fósforo aplicado (Ec. (4)), los valores no tuvieron una distribución claramente definida (Fig. 3 a); mientras que, cuando al valor del fósforo aplicado se le sumaron los valores estimados del fósforo nativo disponible y del fósforo contenido en las semillas (Ec. (7)), la relación fue clara y significativa-

mente curvilínea (Fig. 3 b).

DISCUSION

Los resultados obtenidos en este trabajo han mostrado que existe una relación inversa y curvilínea entre la eficiencia de aplicación de fósforo para el crecimiento de "rye grass" cuantificada a través de los coeficientes de la ecuación de Mitscherlich y la capacidad reguladora de fosfato del suelo cuantificada a través de los coeficientes de la ecuación de Freundlich. Este trabajo es coincidente con estudios realizados por Barrow (1975), que encontró una relación similar entre la eficiencia de aplicación y la capacidad del suelo para adsorber fósforo.

El coeficiente de curvatura (z) de la ecuación de Mitscherlich es función de la capacidad reguladora de fosfato (Ozanne, 1980) y su valor está relacionado con la eficiencia de aplicación de fósforo en el suelo para el crecimiento vegetal. Suelos con altos valores de capacidad reguladora tendrían bajos valores de z y serían ineficientes para liberar el fósforo aplicado necesario para el crecimiento vegetal.



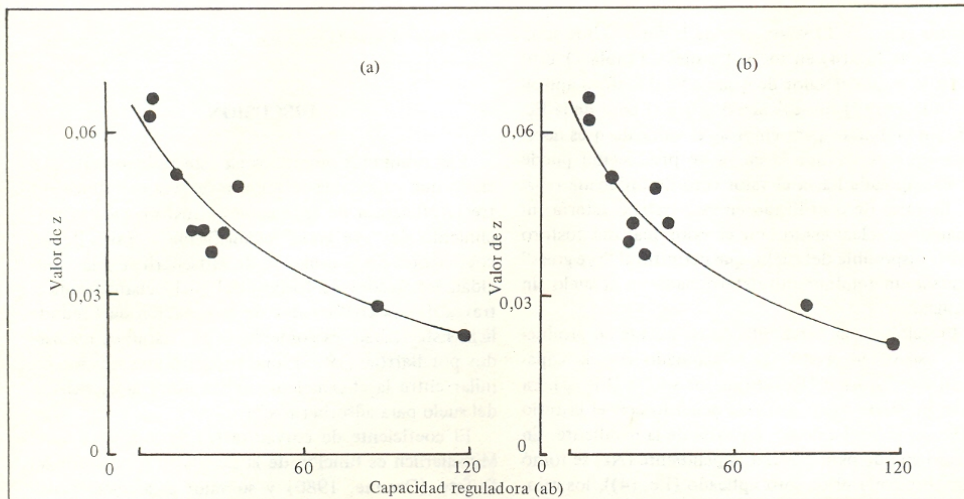


Figura 2: Relación entre el coeficiente de curvatura (z) de la Ec. (4) (Fig. 2 a) y Ec. (7) (Fig. 2 b) y la capacidad reguladora de fósforo del suelo (ab).
 Fig. 2 a; $z = 1/(15,497 + 0,250 ab)$; $R^2 = 0,92$
 Fig. 2 b; $z = 1/(15,221 + 0,263 ab)$; $R^2 = 0,94$

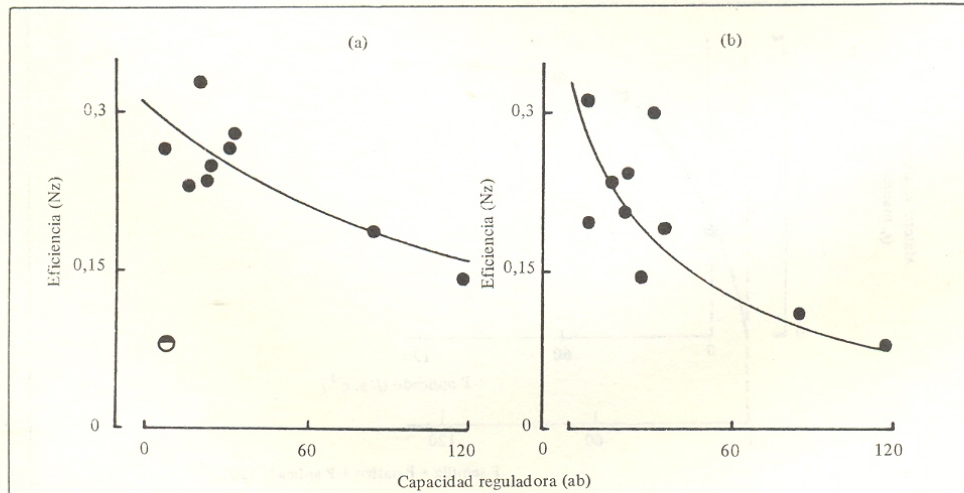


Figura 3: Relación entre la eficiencia de aplicación de fósforo para el crecimiento (Nz) de acuerdo con Ec. (4) (Fig. 3 a) y con Ec. (7) (Mz) (Fig. 3 b) y la capacidad reguladora de fósforo del suelo (ab).
 Fig. 3 a; la curva de ajuste corresponde a 9 observaciones (suelo N° 10 (◉) no incluido); $Nz = 1/(3,232 + 0,026 ab)$; $R^2 = 0,78$
 Fig. 3 b; $Mz = 1/(1,532 + 0,038 ab)$; $R^2 = 0,86$

La relación entre "eficiencia y capacidad reguladora" se vio afectada por el criterio utilizado para la medición de la eficiencia de aplicación a partir de la curva de producción. Las discrepancias en los resultados entre ambos criterios se deben a la subestimación del fósforo nativo disponible del suelo (q) con el cual la planta crece en ausencia de fertilización con fósforo. En suelos con bajos valores de q (suelos utilizados por Barrow (1975) y suelos N° 3, 4 y 6 de este trabajo) la diferenciación entre ambos criterios perdería cierta validez.

De acuerdo con las Figs. 2 y 3, y conociendo el valor de la capacidad reguladora de un suelo calculada fácilmente a partir de la isoterma de adsorción podrían estimarse los valores de los coeficientes y a partir de estos definir la respuesta del "rye grass" al agregado de fósforo. Tal estimación podría resultar adecuada para los valores del coeficiente de curvatura (z) y la

máxima producción (M); sin embargo, podría resultar imprecisa en el caso del valor de N debido a la influencia del nivel de fósforo nativo disponible del suelo para el crecimiento.

Este trabajo como también otros anteriores (Mendoza, 1986, a, b), han mostrado la amplitud de información que puede ser obtenida a partir de las isotermas de adsorción en un grupo de suelos argentinos; tal información puede ser utilizada para caracterizar no sólo propiedades del suelo sino en estudios relacionados con factores propios de la planta.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. N. J. Barrow de CSIRO. Floreat (Western Australia) por sus sugerencias y por facilitarme sus programas de computación para la realización del trabajo.

REFERENCIAS

- Barrow, N. J., 1975. The response to phosphate of two annual pasture species. I. Effect of soil's ability to adsorb phosphate on comparative phosphate requirement. *Aust. J. Agric. Res.* 26: 137-144.
- Biddiscombe, E. F.; Ozanne, P. G.; N. J. Barrow y J. Keay, 1969. A comparison of growth rates and phosphorus distribution in a range of pasture species. *Aust. J. Agric. Res.* 20: 1023-33.
- Holford, I. C. R. y Mattingly, G. E. G., 1976 a. A model for the behaviour of labile phosphate in soil. *Plant and Soil* 44: 219-229.
- Holford, I. C. R. y Mattingly, G. E. G., 1976 b. Phosphate adsorption and availability plant of phosphate. *Plant and Soil* 44: 377-389.
- Mendoza, R. E., 1986 a. Isotermas de adsorción de fósforo en suelos argentinos: I. Métodos de ajuste y comparación entre ecuaciones. *Ciencia del Suelo* 4: 107-116.
- Mendoza, R. E., 1986 b. Isotermas de adsorción de fósforo en suelos argentinos: II. Aplicabilidad de las isotermas e interrelación de sus parámetros con variables de suelo y planta. *Ciencia del Suelo* 4: 117-124.
- Ozanne, P. G., 1980. Phosphate nutrition of plants. A general treatise. (In) *The role of phosphorus in Agriculture*. Khasawneh, F. E.; Sample, E. C. and E. J. Kamprath (Editors). Published by Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin (USA). 910 pp.
- Ozanne, P. G.; J. Keay y E. F. Biddiscombe, 1969. The comparative applied phosphate requirements of eight annual pasture species. *Aust. J. Agric. Res.* 29: 225-233.