

# ¿CUANTO FÓSFORO HAY QUE APLICAR PARA ALCANZAR EL UMBRAL CRÍTICO DE FÓSFORO DISPONIBLE EN EL SUELO?

## II. CÁLCULOS PARA LAS ZONAS SUR Y NORTE DE LA REGIÓN PAMPEANA

Gerardo Rubio, María J. Cabello y Flavio H. Gutiérrez Boem

Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, UBA. e IBYF CONICET-UBA.

Av. San Martín 4453, C1417DSE Buenos Aires.

rubio@agro.uba.ar

### Introducción

El umbral crítico de un nutriente en el suelo es el valor de disponibilidad que separa el nivel de deficiencia del nivel de suficiencia. En los planteos agrícolas se suele recomendar la dosis de fertilizante fosforado en función de los umbrales críticos de respuesta de cada cultivo. Son esperables respuestas positivas al agregado de fertilizantes en aquellos suelos con valores menores al umbral crítico. Los umbrales suelen estar expresados en términos de concentración de fósforo (P) extractable en los primeros centímetros del perfil. En la Región Pampeana, el método de medición de fósforo extractable más extendido es el Bray 1. En la actualidad existen consistentes estimaciones de los umbrales críticos. Para el caso de soja y girasol, los umbrales críticos oscilan entre 9 y 13 (Bray 1) y para el caso de trigo y maíz entre 14 y 19 mg kg<sup>-1</sup> (Barberis et al., 1987; Blanco et al., 2004; Echeverría et al., 2002; Echeverría y García, 1998; García, 2003; Ron y Loewy, 2000). Estos valores son similares a los umbrales utilizados como standard en el cinturón maicero de Estados Unidos (Mallarino y Blackmer, 1992; Dodd y Mallarino, 2005), lo cual no es sorprendente pues la mayor variación de los umbrales se da entre especies y no entre suelos.

Si bien constituyen la base de la recomendación de fertilización, los umbrales críticos son insuficientes para determinar la dosis de fertilizante a aplicar. La información sobre umbrales debe ser complementada con modelos que permitan predecir la dosis necesaria en cada suelo particular para alcanzar esos umbrales críticos. La mayoría de los trabajos internacionales que trataron de construir modelos de este tipo, lo han hecho en base a suelos que presentaban una alta variabilidad en las características del suelo que hacen a la dinámica del P (ej. cantidad y tipo de arcilla) e incluso suelos que pertenecían a diferentes órdenes (Cox, 1994; Wang et al., 2000). Por lo tanto esa información no es tan útil para nuestros suelos agrícolas pampeanos, que presentan una alta homogeneidad y en su mayoría pertenecen al orden Molisoles. Existen antecedentes de esta información para algunas áreas específicas de la Región Pampeana (Berardo y Grattone, 2000; Quintero et al., 2003; Suñer et al., 2004; Rubio et al., 2004), pero no existen modelos que abarquen una mayor amplitud geográfica.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una metodología de aplicación regional que permita

determinar la cantidad de P a aplicar para elevar el P extractable en el suelo desde un valor inicial hasta un determinado valor objetivo. La aproximación experimental consiste en relacionar el incremento en los niveles de P extractable en el suelo luego de la fertilización con parámetros edáficos considerados a priori como relevantes en la dinámica del P edáfico. Esta información nos permite elaborar modelos predictivos de la cantidad de P a agregar para alcanzar determinado nivel de disponibilidad de P. En la primera parte de este trabajo (Rubio et al. 2004), presentamos resultados correspondientes a suelos representativos del Norte de la Región Pampeana. En el presente, se adicionan los resultados correspondientes a situaciones del Sur de la Región Pampeana y nuevas variables para robustecer los modelos predictivos.

### Materiales y Métodos

Se seleccionaron 71 suelos (orden Molisoles) representativos de la Región Pampeana que presentaban un rango de variabilidad en las propiedades edáficas. Las muestras provinieron de San Antonio de Areco, Carmen de Areco, Chivilcoy, Exaltación de la Cruz, Salto, 25 de Mayo, Colon, Carlos Tejedor, Lincoln, Alberti, Puan, Tandil, San Cayetano, Pila, Olavaria, Azul, Bahía Blanca, Tres Arroyos, Lobería y Benito Juárez (Buenos Aires); Canals y Adelia María (Córdoba), Cañada de Gómez, Juncal, Venado Tuerto y Oliveros (Santa Fe).

Los experimentos para evaluar el incremento en el P extractable ante dosis crecientes de fertilizante fosforado se llevaron a cabo en el predio de la Facultad de Agronomía (UBA). Se evaluaron 5 dosis: 0, 8, 16, 32 y 64 mg P kg<sup>-1</sup> de suelo. La fuente de P fue una solución de K(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. Los suelos se fertilizaron homogéneamente y se distribuyeron en contenedores plásticos, que se mantuvieron entre el 50 y el 90% de capacidad de campo durante el transcurso del experimento. Los contenedores se dispusieron al aire libre pero protegidos del sol, para que estén sometidas a las variaciones naturales de temperatura. El experimento comenzó en noviembre, de modo de simular las condiciones de temperatura durante el crecimiento de los cultivos de verano. Se evaluó la evolución del P extractable a los 45 días desde el

momento de fertilización. Luego de la incubación se determinó por duplicado el P extractable (Bray 1) en cada muestra. Se calculó para cada suelo el aumento en el P extractable para cada dosis de P agregado como la diferencia entre el P extractable de una muestra con el P extractable promedio de las dos muestras a las que no se le agregó P. Se utilizaron estas relaciones para calcular el incremento en el P del suelo ante el agregado de una unidad de fertilizante al suelo. El coeficiente b se ajustó para cada situación mediante el modelo lineal simple  $y = bx$ , donde y es el incremento en P extractable (diferencia entre el P extractable a los 45 días en cada dosis de fertilizante agregado y el P extractable del tratamiento sin agregado de P), b es la pendiente y x es la dosis agregada de P (Fig. 1). El coeficiente b queda definido entonces como el incremento en el P extractable en el suelo ante la adición de un  $\text{mg P kg}^{-1}$  en el suelo.

Se realizaron varias mediciones de propiedades del suelo: P extractable (Bray 1), carbono total, composición textural, pH, y dos índices de retención de P (Quintero et al., 1999 y Sims, 2000). Se obtuvo un conjunto de datos con la relación entre la evolución del P extractable, las dosis de fertilizante fosforado y las características químicas específicas de cada suelo.

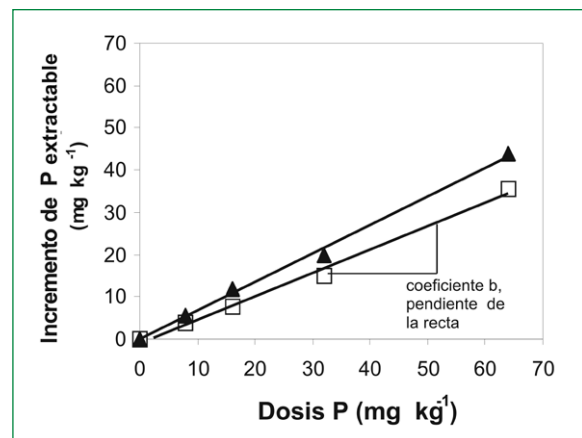
La aplicación práctica de los coeficientes b obtenidos en el presente trabajo parte del supuesto que el fertilizante comercial posee un comportamiento semejante al fertilizante utilizado en nuestro estudio y que el cultivo tiene una respuesta similar al fertilizante aplicado a campo que al fertilizante aplicado homogéneamente en el seno del suelo. La distribución homogénea del fertilizante es un requisito para obtener valores b con baja variabilidad.

### Modelos obtenidos

En la Tabla 1 se presentan los rangos de las características de los suelos analizados. El P extractable

inicial y el pH fueron las variables con el mayor y menor coeficiente de variabilidad, respectivamente. Los rangos texturales variaron entre franco arenoso y arcilloso franco y los coeficientes b variaron entre 0.27 y 0.74, promediando 0.52. Una notable segregación espacial de los coeficientes b fue observada. Suelos localizados al Norte de la Pampa Deprimida presentaron coeficientes b más elevados que en el Sur ( $F = 76.8$ ;  $P < 0.001$ ). El promedio de b en el Norte fue 0.58 (SE = 0.013) y en el Sur 0.41 (SE = 0.012). Esto indica que los suelos del Sur necesitarían mayor cantidad de P para elevar el componente extractable del suelo que los del Norte.

Actualmente se están haciendo los estudios correspondientes para tratar de indagar acerca de estas diferencias. En la presente versión de los modelos, se ha introducido una variable cualitativa binaria que tiene en cuenta el diferente comportamiento de los suelos del Sur y del Norte. Los valores para esta



**Figura 1.** Relación entre el incremento en P extractable (diferencia entre el P extractable a los 45 días en cada dosis de fertilizante agregado y el P extractable del tratamiento sin agregado de P) y la dosis agregada de P para dos suelos. El coeficiente b es la pendiente de la recta y se calculó para cada una de las situaciones analizadas.

**Tabla 1.** Mínimos, máximos, promedios y coeficientes de variación de las propiedades de suelo analizadas. (n=71) y promedios de los suelos del Sur y del Norte (Fig. 2).

	Todos los Suelos <sup>†</sup>				Norte <sup>‡</sup>	Sur <sup>§</sup>	Valor P <sup>##</sup>
	Min	Max	Promedio	CV <sup>¶</sup>	Promedio	Promedio	
coeficiente b	0.27	0.74	0.52	22.5	0.58	0.41	***
Arcilla (%)	8.7	37.6	23.18	27.5	21.2	26.1	***
pH	5.3	7.5	6.1	6.1	6.1	6.4	***
Carbon Total ( $\text{g kg}^{-1}$ )	11.5	38.6	21.8	32.8	18.34	27.3	***
P Bray ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	2.4	35.6	12.1	64.7	10.8	14.3	NS <sup>§§</sup>
Indice retención P I <sup>#</sup>	218.3	302.6	251.3	6.8	245.	260	***
Indice retención P II <sup>††</sup>	242.2	418.2	310.2	12.6	288.8	341.2	***

<sup>‡</sup> Solo se incluyen suelos del Norte; <sup>§</sup> Solo se incluyen suelos del Sur; <sup>¶</sup> Coeficiente de variación; <sup>#</sup> Índice retención P I (Quintero et al., 1999); <sup>††</sup> Índice retención P II (Sims, 2000); <sup>##</sup> Valor P para el test t comparando Sur y Norte; <sup>§§</sup> No significativo  $P > 0.05$ ; \*\*\* Significativo  $P < 0.001$ .

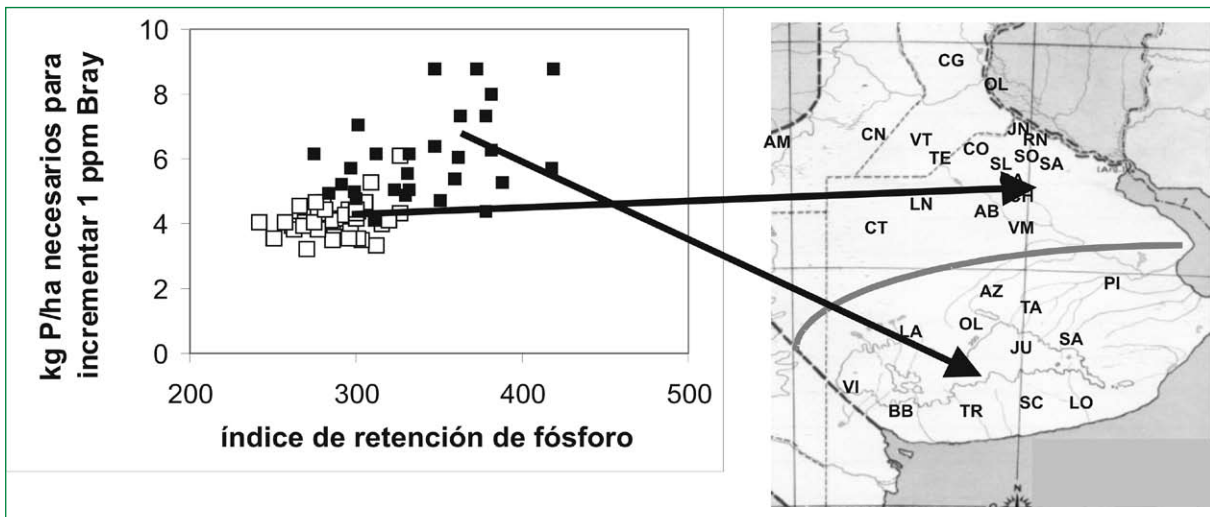
variable fueron 0 para suelos del Sur y 1 para los del Norte. Los dos suelos de la Pampa Deprimida fueron incorporados al grupo Sur ya que sus coeficientes b fueron más semejantes al promedio de este grupo (0.39, 0.42). El índice de retención de Sims fue el factor con el más alto valor predictivo sobre el coeficiente b ( $r^2 = 0.45$ ).

Se ajustaron modelos de regresión simple y múltiple para estimar el coeficiente b a partir de las propiedades edáficas utilizando los procedimientos stepwise y Mallows (Tabla 2). Los diferentes modelos presentados en esta tabla representan diferentes subgrupos de datos. Se presentan modelos con y sin la variable PRI (índice de retención de P) ya que ésta no es un análisis de rutina ofrecido por los laboratorios de suelo comerciales. El mejor modelo para el conjunto total de parámetros incluyó las variables P inicial, zona e índice de retención ( $r^2 = 0.70$ ). Excluyendo la variable PRI, el mejor modelo predictivo incluyó la variable P

inicial, zona y contenido de arcilla.

Como quedo definido, el coeficiente b representa el incremento en P Bray ante el agregado de 1 ppm de P al suelo. Desde el punto de vista práctico, es de mayor utilidad el dato de la cantidad de P necesaria para incrementar el P Bray en una unidad que este coeficiente b. En tal sentido, la interpretación del modelo 5 indica que, para una zona determinada, a mayor contenido de arcilla y a menor contenido de P extractable del suelo es necesario agregar más P para elevar la disponibilidad en 1 ppm. En el anexo de este trabajo se brinda información para realizar la transformación y en la Figura 3 se brinda un ejemplo.

Los modelos desarrollados son de aplicación general a los suelos agrícolas de la Región Pampeana y pueden ser usados para decidir la dosis de fertilizante a agregar para elevar el contenido de P extractable del suelo a un determinado valor objetivo.



**Figura 2.** Cantidad de P de fertilizante necesaria para incrementar el nivel de P Bray del suelo en un ppm en función del índice de retención de P. En la figura: Suelos del Norte de la Región Pampeana símbolos llenos, suelos del Sur símbolos vacíos. En el mapa se muestran los sitios de muestreo.

**Tabla 2.** Modelos predictivos del coeficiente b. PRI I=índice retención P Quintero et al. (1999), PRI II=índice retención P Sims. C total: carbono total (g kg<sup>-1</sup>). Z=variable binaria suelos al Sur de la Pampa Deprimida valor =0, al Norte valor 1.

	Ecuación del modelo	r <sup>2</sup> or R <sup>2</sup>	P
Modelo 1: una sola variable	1.137 - 0.002 PRI II	0.44	<0.0001
Modelo 2: una sola variable, PRI excluidos	0.715-0.0091 Ctotal	0.31	<0.0001
Modelo 3: todas las variables	0.95049 + 0.00482 PBray + 0.1545 Z - 0.00233 PRI-I	0.70	<0.0001
Modelo 4: se excluye la variable binaria zona	1.4437 + 0.00410 PBray - 0.0555 pH - 0.00204 PRI-II	0.56	0.03
Modelo 5: PRI excluidos	0.45369 + 0.00356 PBray + 0.16245 Z - 0.00344 arcilla (%)	0.61	<0.0001

## Agradecimientos

Este proyecto es financiado por, UBA, CONICET, ANPCYT e IPNI. Se agradece a O. Novello, F. Salvagiotti, F. García, G. Ferraris, P. Marasas, M. Silva Rossi, J. Gené, C. Alvarez, P. Prystupa, B. Romano, J. Gaona, H. Echeverría, M. Pazos, S. Mestelan, T. Loewy, P. Calviño, A. Sallies, J. Galantini, M. Fernández, M. Souilla, y F. Pacín por la provisión de muestras. Gerardo Rubio y Flavio Gutiérrez Boem son miembros del CONICET.

## Referencias

**Barberis L.A., G. Duarte, A. Sfeir, L. Marban y M. Vázquez.** 1987. Respuesta de trigo a la fertilización fosforada en la Pampa Arenosa Húmeda y su predicción. Ciencia del Suelo 5: 166-174.

**Berardo A. y D. Grattone.** 2000. Fertilización fosfatada

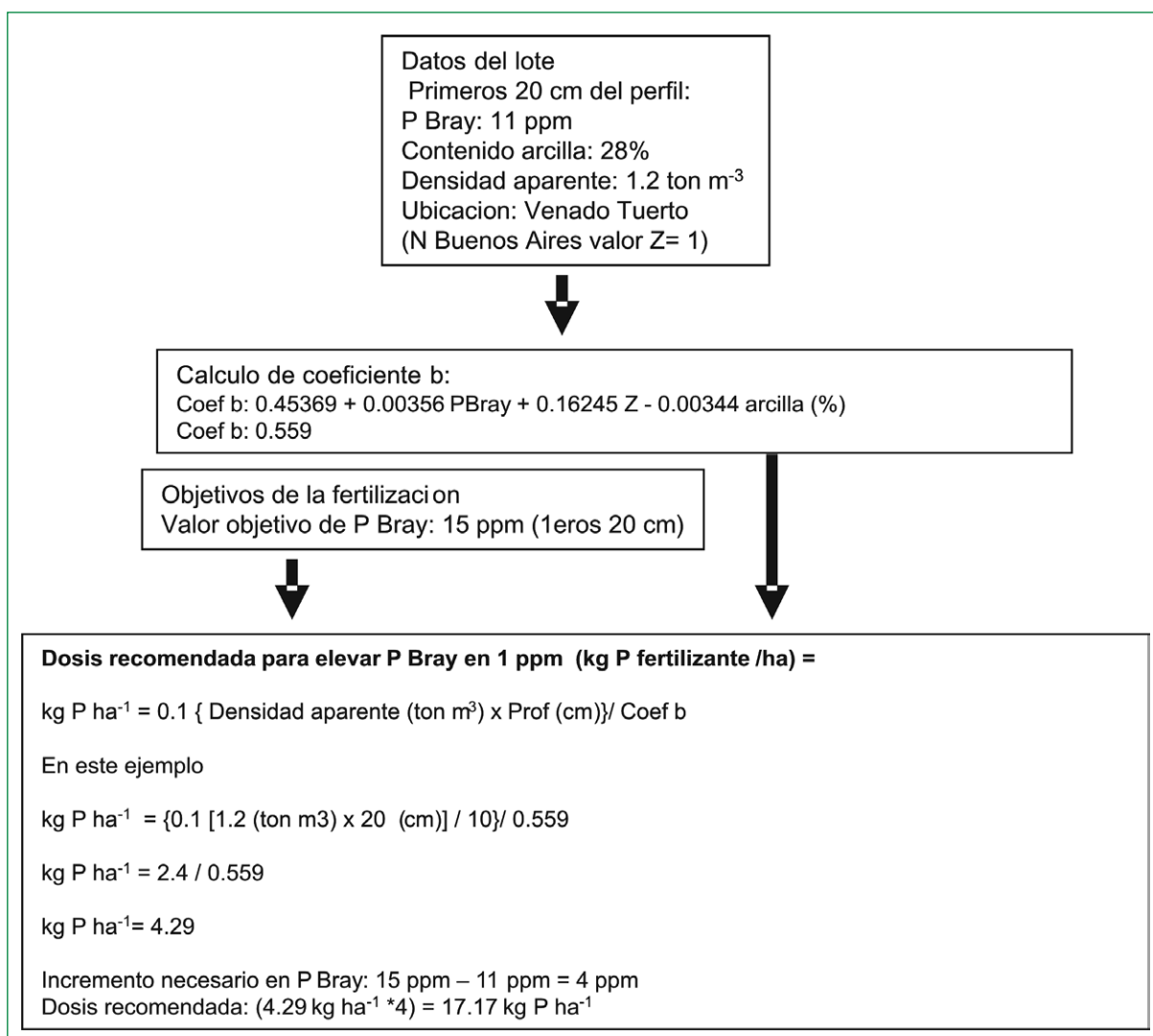
requerida para alcanzar niveles objetivos de fósforo Bray en un Argiudol. XVII Cong Arg Ciencia del Suelo, Mar del Plata.

**Blanco H., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Houssay, G. Deza Marín, A. Berardo y F. García.** 2004. Red nutrición Crea sur de Santa Fe. Informaciones Agronómicas 23: 9-14.

**Cox F.R.** 1994. Predicting increases in extractable phosphorus from fertilizing soils of varying clay content. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:1249-1253.

**Dodd J.R. y A.P. Mallarino.** 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:1118-1128.

**Echeverría E., G. Ferraris, G. Gerster, F.H. Gutierrez Boem y F. Salvagiotti.** 2002. Fertilización en soja y trigo - soja: respuesta a la fertilización en la región pampeana resultados de la red de ensayos del Proyecto Fertilizar - INTA Campaña 2000/2001 y 2001/2002. EEA INTA Pergamino, 44 p.



**Figura 3.** Aplicación práctica de los resultados obtenidos. Ejemplo de un lote agrícola de Venado Tuerto en el que se quiere incrementar el P extractable a 15 ppm P Bray. Resultado final expresado en kg P por hectárea, multiplicando este valor por 5 se obtiene la dosis en kg de superfosfato triple o fosfato diamónico.

**Echeverría H.E. y F.O. García.** 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín técnico 149, INTA, EEA Balcarce.

**García F.O.** 2003. El manejo de fósforo en la producción de trigo y maíz. Simposio El fósforo en la agricultura argentina. INPOFOS, pág.55-61.

**Mallarino A.P. y A.M. Blackmer.** 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agron. J* 84:850-856.

**Quintero C.E., G.N. Boschetti y R.A. Benavidez.** 1999. Phosphorus retention in some soils of the argentinean mesopotamia. *Com Soil Sci Plant Anal*: 30: 1449-1461.

**Quintero C., G. Boschetti y R.A. Benavidez.** 2003. Effect of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement. *Comm Soil Sci Pl Anal*, 34:1435-1450.

**Ron M.M. y T. Loewy.** 2000. Modelo de fertilización nitrogenada y fosforada para trigo en el Sudoeste Bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo* 18: 44-49.

**Rubio G., F.H. Gutiérrez Boem y M.J. Cabello.** 2004. ¿Cuanto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? I. Cálculo a partir de propiedades básicas del suelo. *Informaciones Agronomicas del Cono Sur* 23: 5-8.

**Sims J.T.** 2000 A phosphorus Sorption Index. En G.M. Pierzynski *Methods of P analysis for soils, sediments, residuals and waters.* Pg 22-23. USDA. Southern Cooperative series.

**Suñer L., J.A. Galantini y R.A. Rosel.** 2004. Fertilización con fósforo en suelos de la Región Pampeana cultivados con trigo. *Actas CD XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.* AACs.

**Wang X., J.M. Jackman, R.S. Yost y B.A. Linqvist.** 2000. Predicting soil phosphorus buffer coefficients using potential sorption site density and soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 64:240-246. <

## ANEXO

### Aplicación práctica de los resultados obtenidos

Como ya fue definido mas arriba, el coeficiente b representa el incremento en el P extractable del suelo (medido en mg de P Bray por kg de suelo – ppm) al agregar una cantidad de fertilizante equivalente a un mg de P del fertilizante por kg de suelo. Para convertir esta cantidad de fertilizante en dosis de P por hectárea, es necesario definir dos variables: la profundidad del suelo en el cual se realiza la determinación del contenido inicial de P extractable del suelo y la densidad aparente del mismo. La profundidad de muestreo debe coincidir con la profundidad en la cual se trabajó en el método de determinación del umbral crítico a utilizarse. En la mayoría de los métodos de recomendación de fertilización fosforada realizados en el Norte de la Región Pampeana esa profundidad es 0-20 cm. La densidad aparente es una propiedad variable del suelo. Un valor representativo para suelos de la Región es  $1.2 \text{ ton m}^{-3}$ , aunque es recomendable ajustarlo para cada caso particular, en caso de ser posible. Definidas estas dos variables, es posible convertir el coeficiente b en un parámetro de directa utilización para determinar la dosis de fertilizante a agregar.

Una vez calculado el coeficiente b de acuerdo a los modelos de la Tabla 2 la ecuación a aplicar es: (\*)

Utilizando una profundidad de 0-20 cm y una densidad aparente  $1.2 \text{ ton m}^{-3}$ , un simple cálculo matemático indica que una dosis de 1 mg de P por kg de suelo (standard en la determinación del coeficiente b) es equivalente a  $2.4 \text{ kg ha}^{-1}$ . Al dividir el valor b por 2.4 obtenemos el incremento en ppm de P extractable al agregar un kg de P por ha. Si, en cambio, dividimos 2.4 por el coeficiente b obtenemos el parámetro  $D_e$ , que es la dosis necesaria de P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para incrementar en una unidad (1 ppm) el P extractable. El coeficiente b promedio de todas las situaciones fue de 0.52, lo que significa que la dosis de fertilizante fosforado promedio necesaria para incrementar una unidad de P-Bray del suelo 45 días después de aplicado el fertilizante al suelo es  $4.61 \text{ kg ha}^{-1}$  ( $2.4/0.52$ ), equivalente a  $23 \text{ kg ha}^{-1}$  de fosfato diamónico o superfosfato triple.

En la Figura 3 se ejemplifican los cálculos con un lote agrícola de Venado Tuerto al que se quiere llevar a una disponibilidad de P de 15 ppm. La dosis final recomendada se debe traducir en kg de fertilizante para lo cual debe ser considerada la concentración de P del mismo. Para el caso del fosfato diamónico y el superfosfato esa concentración es el 20%.

$$(*) \text{ Dosis P (kg P/ha) para elevar P Bray en 1 ppm: } \frac{0.1 [\text{Densidad aparente (ton m}^{-3}) \times \text{Prof (cm)}]}{\text{Coeficiente b}}$$