

# FÓSFORO EXTRACTABLE EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LAS REGIONES PAMPEANA Y EXTRAPAMPEANA DE ARGENTINA

Hernán Sainz Rozas<sup>1,2</sup>, Hernán E. Echeverría<sup>1</sup> y Hernán Angelini<sup>1</sup>

## Introducción

Las recomendaciones de fertilización fosfatada de los cultivos en la región pampeana argentina se basan en el rendimiento objetivo y la concentración de fósforo (P) extractable en los primeros 20 cm de suelo (Echeverría y García, 1998). En Molisoles de la región pampeana, con pH sub-ácido a neutro, el método de extracción propuesto por Bray y Kurtz (Bray I; Bray y Kurtz, 1945) es el más difundido para determinar la disponibilidad de P (García et al., 2007). La calibración en Argentina mostró que la concentración de P-Bray I en los primeros 20 cm, correlacionó positivamente con la respuesta a P de los principales cultivos de la región pampeana, con umbrales críticos que variaron de 15-18, 15-16 y 12-13 mg kg<sup>-1</sup> para trigo, maíz y soya, respectivamente (Zamuner et al., 2006; García et al., 1997; Echeverría et al., 2002).

Los suelos de la región pampeana argentina presentaban en condición prístina niveles muy bajos (< 10 mg kg<sup>-1</sup>) de P extractable en superficie en el este y sudeste de Buenos Aires, entre Ríos y Corrientes, niveles medios (10-20 mg kg<sup>-1</sup>) en el este de Santa Fe, el sudeste de Córdoba y una franja norte-sur en el centro de Buenos Aires, y niveles altos (> 20 mg P kg<sup>-1</sup>) hacia el oeste de Santa Fe, centro y sur de Córdoba y noreste de la Pampa (Darwich, 1983). La continua remoción en los granos y la escasa reposición del P extraído (García y González Sanjuan, 2010), han resultado en la disminución del P extractable, y algunas áreas han pasado de rangos de valores promedio altos (> 20 mg kg<sup>-1</sup>) a medios (10-20 mg kg<sup>-1</sup>) o de rangos medios a bajos (< 10 mg kg<sup>-1</sup>) (Montoya et al., 1999; García, 2001). Sin embargo, no se cuenta con información actualizada de la disponibilidad de P-Bray I en suelos de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina.

Considerando la importancia de este nutriente para los cultivos se plantearon como objetivos: i) determinar la distribución de la concentración de P-Bray I en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina a través de la confección de mapas; y ii) comparar estos valores con los resultados de un relevamiento realizado hace 25 años.

## Materiales y métodos

Se recopiló información de reconocidos laboratorios privados y pertenecientes a Estaciones Experimentales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) que aplican el protocolo de determinación de P-

Bray I, indicado en la norma IRAM-SAGPyA 29570-1 (en revisión), la que se basa en la metodología de extracción propuesta por Bray y Kurtz (1945) con determinación colorimétrica del fosfato.

Las muestras correspondieron al estrato superficial de 0-20 cm y fueron extraídas durante las campañas 2005 y 2006 de suelos con capacidad de uso agrícola. La superficie relevada abarcó la mayor parte de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba y Entre Ríos, y algunos departamentos de La Pampa, Corrientes, Salta, Santiago del Estero y Tucumán. Se analizaron 34 328 muestras, proviniendo el mayor número de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba (**Tabla 1**). Las muestras con valores de pH superiores a 7.5 fueron eliminadas del análisis debido a que la metodología Bray subestima el P extractable en suelos con pH alcalinos.

Se determinó el promedio, mediana, desvío estándar, valor mínimo, máximo y los percentiles a nivel de departamento, región y provincia. Para generar los mapas se utilizó el programa ESRI ArcMap (2009) con cartografía base correspondiente a la división política del país. Se generó un punto, latitud y longitud correspondiente al centro de cada partido o departamento, el cual se relacionó con el valor de mediana. El método de interpolación utilizado para realizar el mapa de P-Bray I fue el Kriging Ordinario (KO), el que calcula los valores predichos según las ecuaciones descriptas por Schloeder et al. (2001).

La comparación de la predicción del KO se realizó mediante el análisis de los valores predichos versus observados, los que se obtuvieron por validación cruzada, que consiste en retirar o remover un valor observado, estimarlo con los valores mas cercanos, para luego comparar el valor estimado con el removido (Villatoro et al., 2008). También se calculó la eficiencia de predicción (EP), que estima que tan efectiva es la misma respecto del uso del promedio general de los datos (Schloeder et al., 2001). Un valor cercano a 100 indica predicción perfecta, mientras que valores bajos o negativos indican pobre estructura espacial (Kravchenko, 2003). La EP fue calculada según la siguiente ecuación:

$$EP = 100 \times \left\{ 1 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n [Z(X_i) - Z_{pred}]^2 \right)}{\left( \sum_{i=1}^n [Z(X_i) - Z_{prom}]^2 \right)} \right\}$$

<sup>1</sup> Unidad Integrada Balcarce EEA INTA - FCA UNMDP, C.C. 276, (7620) Balcarce, Argentina. Correo electrónico: fertibalc@balcarce.inta.gov.ar

<sup>2</sup> CONICET

Donde “n” es el número de observaciones, “Z(X<sub>i</sub>)” es cada observación, “Z<sub>pred</sub>” es la observación predicha por el modelo y “Z<sub>prom</sub>” es el promedio general de los datos.

Por otra parte el KO calcula el error estándar del valor predicho (EEVP) mediante la siguiente ecuación:

$$EEVP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VO - VP)_i^2}{n}}$$

Donde “VO” y “VP” son los valores observados y predichos, respectivamente, y “n” corresponde a la cantidad de puntos que el modelo ha tenido en cuenta para el cálculo del VP en esa posición.

Para responder al primer objetivo, se agruparon las medianas de P-Bray I en los siguientes rangos: 0-10; 10.1-15; 15.1-20; 20.1-25 y de 25.1-100 mg kg<sup>-1</sup> de suelo, valores considerados como muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, respectivamente. Este rango de valores permitió discriminar con más detalle los valores próximos a los umbrales de respuesta de los cultivos. Para responder al segundo objetivo, se agruparon los valores promedio de P-Bray I en los siguientes rangos: 0-10; 10.1-20 y de 20.1-100 mg kg<sup>-1</sup> de suelo, valores considerados bajo, medio y alto, respectivamente, según Darwich (1983).

Se estimó el área ocupada para cada rango de P-Bray I considerando 28 Mha como superficie sembrada para la campaña 2006-07 (Ramírez y Porstman, 2009) y se calculó la dosis promedio de P para cada rango de concentración según Echeverría y García (1998), para que el P no limite la producción de los cultivos.

### Resultados y discusión

El análisis de la distribución de valores de mediana de departamento y/o partido mostró desviación moderada de la normalidad (P < 0.08), por lo que el mapa se realizó con el valor de mediana sin transformar, dado que el KO es robusto para desviaciones moderadas de la normalidad (White et al., 1997). La relación entre valores predichos y observados fue significativa (P < 0.05) con un coeficiente de determinación aceptable y pendiente no diferente de uno (VO = 0.98 x VP; r<sup>2</sup> = 0.66, n = 171). Los mayores errores de predicción del KO se determinaron en la zona norte de la provincia de Santa Fe, norte de Santiago del Estero y en algunas zonas de Salta (Figura 1), lo que puede ser atribuido a la baja cantidad de partidos relevados en dichas zonas (Tabla 1). No obstante, el valor de EP fue 66%, el cual es considerado aceptable para la aplicación de métodos de interpolación (Villatoro et al., 2008).

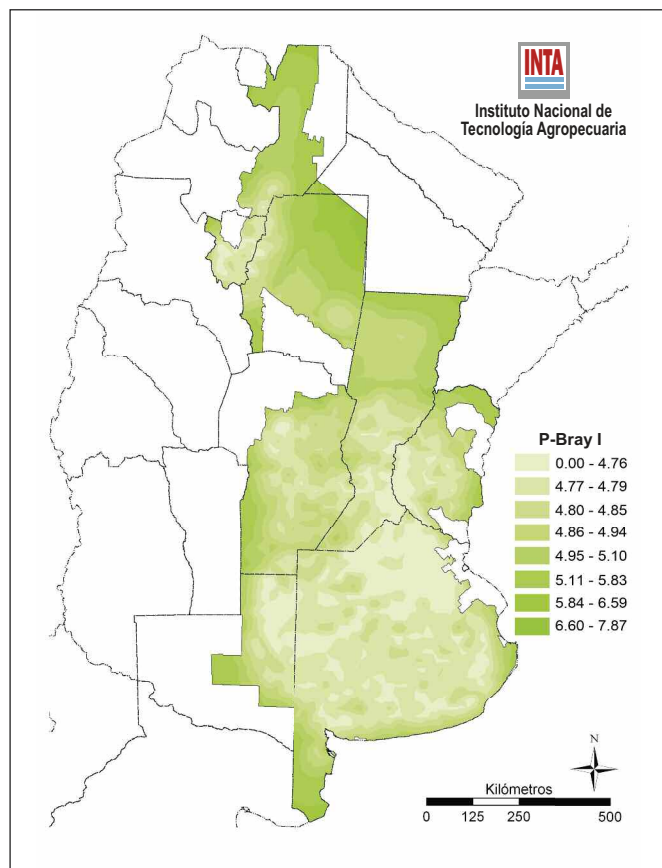
Los valores más bajos de P-Bray I se determinaron en la provincia de Buenos Aires, este de La Pampa, sur de Santa Fe, sudeste de Córdoba y Entre Ríos, áreas que presentaron valores en el rango de muy bajo a bajo (Figura 2). Los valores de P-Bray I registrados para el este de La Pampa son similares a los reportados por Montoya et al. (1999) en un muestreo realizado en 1996. Si se asume que los umbrales críticos de P-Bray I para soya y/o girasol, maíz y trigo son de 12-13, 15-16 y 18-20 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (García et al., 2007), estos resultados sugieren que el nivel actual de P-Bray I en los suelos de esta vasta región podría ser limitante para la producción de los cultivos. Esta situación se agravaría en algunas sub-regiones de la región pampeana como el sur, oeste y norte de Buenos Aires, donde el 75% de los

**Tabla 1. Estadísticos descriptivos del P extractable (Bray y Kurtz, 1945) del horizonte superficial del suelo (0-20 cm) en provincias de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina.**

Provincia	n	Promedio	DE	Mínimo	Máximo	----- Percentil -----		
						0.25	0.50	0.75
----- mg kg <sup>-1</sup> -----								
Buenos Aires	22 025	13.3	10.8	1.0	132.0	6.9	10.4	16.0
La Pampa	1 221	16.8	10.9	1.6	95.5	9.2	14.3	21.2
Santa Fe	4 711	24.1	19.6	1.8	178.3	10.8	17.5	32.7
Córdoba	3 916	21.5	14.6	2.5	166.1	11.3	17.5	27.6
Santiago del Estero	219	29.3	17.1	5.7	125.0	19.6	26.4	33.5
Entre Ríos	1 190	11.8	13.2	1.4	98.2	4.6	7.8	13.4
Salta	406	26.8	16.0	3.5	110.6	16.8	24.2	33.7
Tucumán	640	30.2	25.6	3.3	194.8	14.9	22.9	34.5

n = número de muestras; DE = desvío estándar.

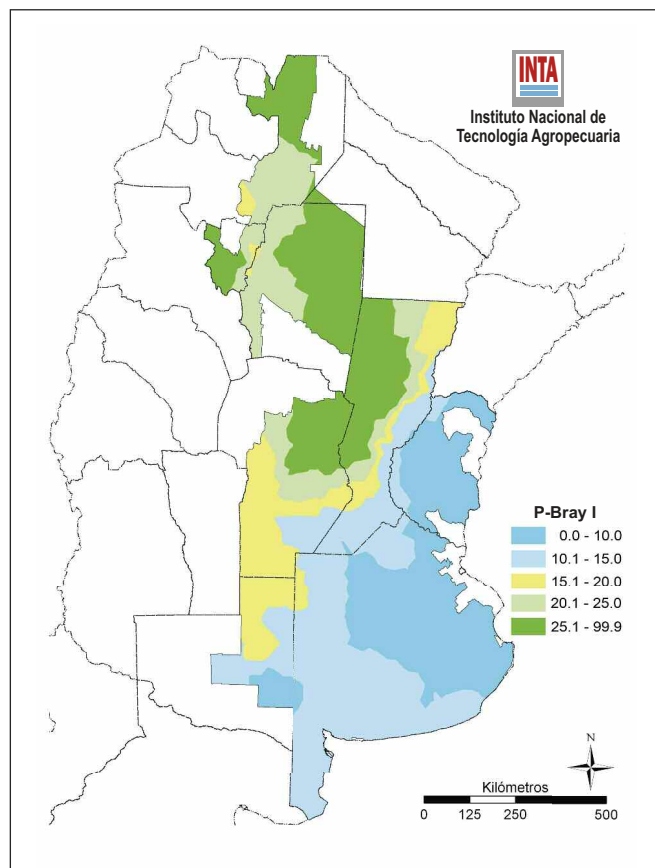
Fuentes: Laboratorio Tecnoagro, Laboratorio Suelofertil (ACA Pergamino), Laboratorio ISETA de Nueve de Julio, Laboratorio Tecnosuelo NOA, Laboratorio EEA INTA Oliveros, Laboratorio EEA INTA Marcos Juárez, Laboratorio EEA INTA Balcarce, EEA INTA Gral. Villegas y Laboratorio EEA INTA Anguil.



**Figura 1.** Rangos del error estándar del valor estimado de P-Bray I ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) por el método Kriging (error de predicción) en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina.

lotes relevados presentaron valores de P-Bray I menores a  $16.8 \text{ mg kg}^{-1}$  (Tabla 2), valor cercano al umbral de respuesta a la fertilización de la mayoría de los cultivos.

En un relevamiento realizado en 1980, se reportaron niveles de 10-20 y mayores a  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  de P-Bray I hacia el oeste y norte de la región pampeana e inferiores a  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  para el sudeste y noreste de Buenos Aires y para la provincia de Entre Ríos (Darwich, 1983). Estos resultados difieren de los actuales (Figura 3), dado que la mayor parte de los suelos del oeste de Buenos Aires, este de La Pampa, sur y sudeste de Córdoba han disminuido notoriamente su concentración respecto del muestreo realizado en 1980, pasando de concentración alta ( $> 20 \text{ mg kg}^{-1}$ ) al rango de concentración media ( $10\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Esta disminución se explicaría por el mayor uso agrícola de los suelos y por la baja reposición del nutriente, la cual en promedio representa tan solo entre 40-60% del P exportado (García y González Sanjuan, 2010). Esta caída también sería explicada por un aumento en la frecuencia del cultivo de soja en la rotación, debido al elevado requerimiento e índice de cosecha de esta especie (García, 2001). Además, los suelos del oeste de la región pampeana se caracterizan por presentar bajos contenidos de MO y textura gruesa, características que se asocian a un escaso poder de buffer de P (Tiessen et al., 1984).



**Figura 2.** Rangos de valores de mediana de concentración ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de P-Bray I (Bray y Kurtz, 1945) del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana. Interpolación realizada con el método de la inversa de la distancia ponderada y con Kriging Ordinario (a y b).

En suelos de la región pampeana de Argentina, se determinó que la mineralización del P orgánico contribuyó positiva y significativamente al P extractable (Zubillaga y Giuffrè, 1998). Por lo tanto, ante balances negativos de P, las mayores caídas en los niveles de P-Bray I podrían ocurrir en suelos con textura más gruesa y con menores contenidos de MO. Sin embargo, en los suelos del sur y sudeste bonaerense, la concentración de P-Bray I se ha mantenido o ha pasado de niveles bajos a medios de P-Bray I (Figura 3), lo que puede ser atribuido a la amplia adopción de la práctica de fertilización y al uso de dosis de P más elevadas respecto de otras áreas con mayores niveles de P nativo (Echeverría y García, 1998).

De la superficie total cultivada en 2006-07 se estimó que el 54.4% presentó valores muy bajos a bajos y el resto valores medios a altos (Tabla 3). Según esta estimación solo el 31% de los suelos destinados a la actividad agrícola no requerirían el aporte de P por fertilización, mientras que el resto de la superficie sembrada requeriría dosis de enriquecimiento y/o mantenimiento (Tabla 3). Por lo tanto, para cubrir los requerimientos de P de los cultivos y aumentar gradualmente los contenidos de P-Bray I se deberían aplicar aproximadamente 424 220 t de P ( $2.12 \times 10^6 \text{ t de } 0\text{-}46\text{-}0$ ) (Tabla 3), valor superior a las 207 000 t de P consumidos en el 2006 según García y

Tabla 2. Estadísticos descriptivos del P extractable (Bray y Kurtz, 1945) del horizonte superficial del suelo (0-20 cm) en algunas subregiones de la región pampeana de Argentina.

Sub-Región	n	Promedio	DE	Mínimo	Máximo	----- Percentil -----		
						0.25	0.50	0.75
----- mg kg <sup>-1</sup> -----								
Sur-Sur Este de Buenos Aires <sup>1</sup>	4 540	12.9	9.4	1.3	121.6	7.2	10.3	15.5
Oeste de Buenos Aires <sup>2</sup>	7 519	13.6	9.3	1.5	108.1	7.7	11.4	16.8
Nor-Noreste de Buenos Aires <sup>3</sup>	8 445	13.6	12.7	1.0	132.0	6.5	9.9	15.8
Sur de Santa Fe <sup>4</sup>	4 293	22.9	17.6	1.8	158.0	10.5	16.8	30.0
Sur de Córdoba <sup>5</sup>	2 641	19.2	12.9	2.5	166.1	10.5	15.6	23.9

n = número de muestras; DE = desvío estándar.

Partidos en cada subregión: <sup>1</sup>Azul, Bahía Blanca, Balcarce, B. Juárez, Cnel. Dorrego, Cnel. Pringles; Cnel. Suárez, A. Gonzáles Chávez, Gral. Alvarado, Gral. Lamadrid, Gral. Pueyrredón, Laprida, Lobería, Mar Chiquita, Necochea, Olavarría, Púan, San Cayetano, Tandil, Tornquist, Tres Arroyos; <sup>2</sup>A. Alsina, Bolívar, C. Casares, C. Tejedor, Daireaux, Guaminí, Gral. Villegas, H. Irigoyen, 25 de Mayo, 9 de Julio, Rivadavia, Trenque Lauquen, Pellegrini; <sup>3</sup>Baradero, B. Mitre, Bragado, Cañuelas, Cap. Sarmiento, C. de Areco, Chacabuco, Chivilcoy, Colon, 25 de Mayo, Gral. Viamonte, Gral. Arenales, Junin, L.N. Alem, Lincoln, Lujan, Mercedes, Monte, Pergamino, Pilar, Ramallo, Rojas, Roque Pérez, Saladillo, Salto, S.A. de Giles, S.A. de Areco, San Nicolás, San Pedro, San Vicente, Suipacha, Zárate; <sup>4</sup>Caseros, Gral López, Gral. Belgrano, Castellanos, Constitución, Rosario, San Lorenzo, Iriondo, San Jerónimo, San Martín, San Justo, Las Colonias, <sup>5</sup>Gral. San Martín, Juaréz Cellman, Marcos Juárez, Roque Saenz Peña, Río Cuarto, Unión.

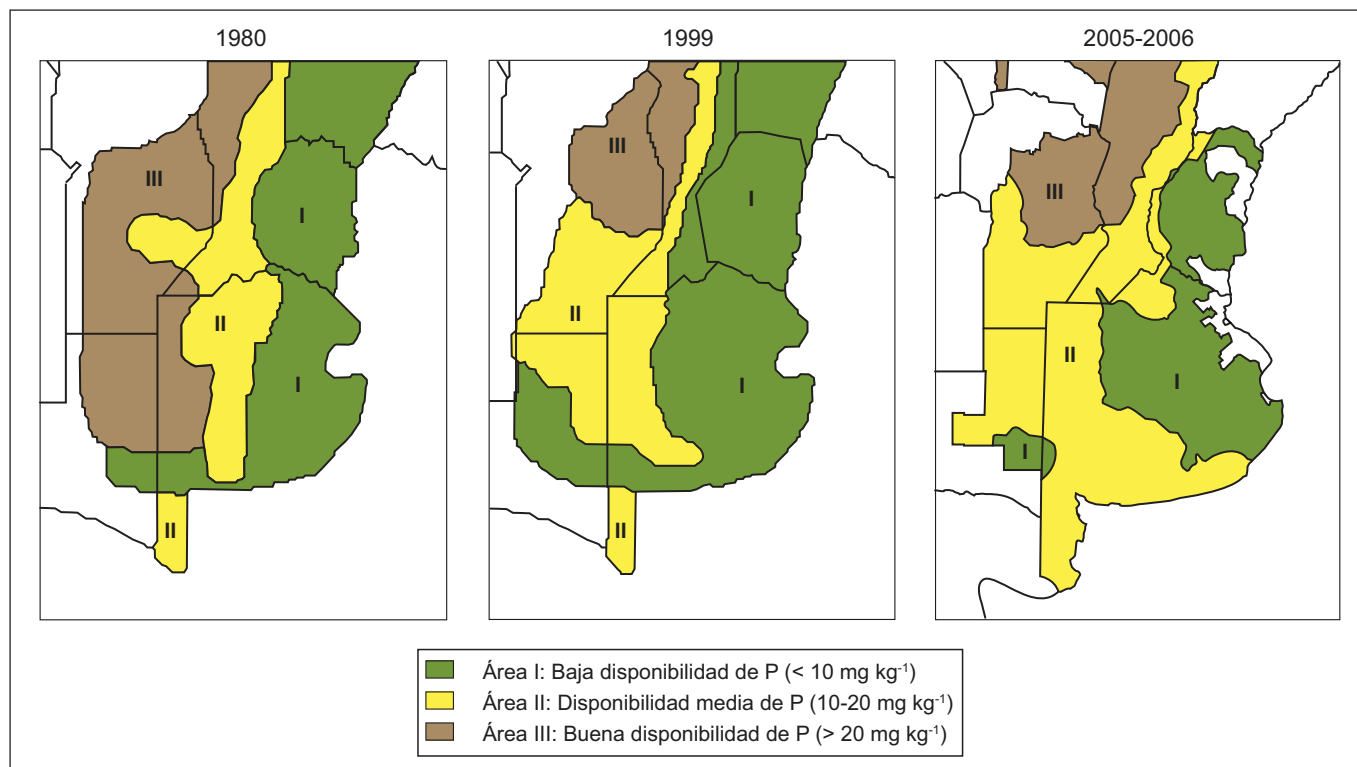


Figura 3. Rangos de concentración de P-Bray I (Bray y Kurtz, 1945) en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana argentina en 1980 (Darwich, 1983) y en 1999 (Darwich 1999, citado por García et al., 2007) y rangos de concentración de P-Bray I en el muestreo realizado en 2005-06 (interpolado con el método Kriging).

Ciampitti (2007). Estos resultados sugieren que para algunas zonas y cultivos sería necesario incrementar las dosis de P a fin de lograr una adecuada nutrición de los cultivos. No obstante, las mismas deben surgir de una adecuada evaluación del P extractable, condición indispensable para un uso racional de los fertilizantes.

**Conclusiones**

- La mayor parte de los suelos del oeste, norte y sur de la región pampeana presentan rangos de P-Bray I de

muy bajos a bajos, por lo que este nutriente podría ser limitante para la producción de los cultivos. Por el contrario, la mayoría de los suelos de la región extrapampeana presentan contenidos de P extractable altos o muy altos.

- La disminución de los contenidos de P-Bray I en los últimos 25 años ha sido más importante hacia el oeste y norte que al sur de la región pampeana.

**Tabla 3. Área estimada para cada rango de concentración de P extractable (Bray y Kurtz, 1945) y dosis de P estimadas (promedio para la mayoría de los cultivos) según Echeverría y García (1998) para que el P no limite la producción de los cultivos.**

Rango de P-Bray I	Valoración agronómica	----- Superficie relevada* -----	Dosis de P	Cantidad de P a aplicar**
mg kg <sup>-1</sup>	-	%	Mha	t
0-10	Muy Bajo	28.3	7 916	237 480
10.1-15	Bajo	26.1	7 911	146 220
15.1-20	Medio	14.5	4 052	40 520
20.1-25	Alto	8.7	2 425	-
> 25	Muy Alto	22.5	6 297	-

\* Producto del área sembrada estimada en 2006-07 (28 Mha) reportada por Ramírez y Porstman (2009) y del porcentaje ocupado por cada rango.

\*\* Producto de área por dosis de P ha<sup>-1</sup>.

### Agradecimientos

A los que aportaron información sobre los análisis de suelos: José Lamelas y Luis Berasategui (Tecnoagro), Roberto Rotondaro (Suelofertil), Graciela Cordone (INTA Casilda), Carlos Galarza (INTA Marcos Juárez), Alfredo Bono (INTA Anguil), Juan Galantini (UNS), Luis Ventimiglia (INTA 9 de Julio), Sebastián Gambaudo (INTA Rafaela), Mirian Barraco (INTA Gral. Villegas) y Laboratorio Tecnosuelo del NOA. A la responsable del Laboratorio de Geomática de INTA Balcarce Karina Zelaya.

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto INTA AERN 295561 y AGR 319/10 de la UNMP.

### Bibliografía

Bray, R.H., y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil. *Soil Sci* 59:360-361.

Darwich, N.A. 1983. Niveles de fósforo asimilable en los suelos pampeanos. *IDIA* enero-abril: 1-5.

Echeverría, H.E., G.N. Ferraris, G. Gerster, F.H. Gutiérrez 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. Fertilizar – INTA. [www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)

Echeverría, H.E., y F.O. García. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico* 149. Est. Exp. Agrop. INTA Balcarce. 18 p.

García, F.O. 2001. Balance de fósforo en los suelos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 9:1-3.

García, F.O., y I.A. Ciampitti. 2007. Requerimientos nutricionales y balances de nutrientes. *Agromercado Temático*. Año 27. Bs. As., Argentina. pp. 2-6.

García, F.O., K.P. Fabrizzi, M. Ruffo, y P. Scarabicchi. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. VI Congreso Nacional de

Maíz. Pergamino, Buenos Aires. Tomo III: 137-143.

García, F.O., y M.F. González Sanjuan. 2010. Balances de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos? *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 48:1-5.

García, F.O., L.I. Picone, y A. Berardo. 2007. Fósforo. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, pp. 99-121.

Kravchenko, A. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of American J.* 67:1564-1571.

Montoya, J., A. Bono, A. Suárez, N.A. Darwich, y F. Babinec. 1999. Cambios en el contenido de fósforo asimilable en los suelos del este de la provincia de La Pampa, Argentina. *Ciencia del Suelo*. 17:45-48.

Ramírez, L., y J.C. Porstman. 2009. Evolución de la frontera agrícola. *Campañas* 80/81-06/07. [Online]. *Revista Agromensajes de la Facultad*. <http://www.fcagr.unr.edu.ar>

Schloeder, C.A., N.E. Zimmerman, y M.J. Jacobs. 2001. Comparison of methods for interpolating soils properties using limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:470-479.

Tiessen, H., J.W.B. Stewart, y C.V. Cole. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:853-858.

Villatoro, M., C. Enríquez, y F. Sancho. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32:95-105.

White, J.G., R.M. Welch, y W.A. Norvell. 1997. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:185-194.

Zamuner, E.C., L.I. Picone, y H.E. Echeverría. 2006. Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for wheat under no-tillage. *Soil and Tillage Research* 89:70-77.

Zubillaga, M., y L. Giuffrè. 1998. Pathways of native and fertilizer phosphorus in Argentine soils. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 51:101-105. ○