

Biodisponibilidad de fósforo en un suelo del sur de Santa Fe (Argentina). Efectos de dos fuentes fosfatadas y sus mezclas con urea

Silva Rossi, M. M.; A. A. Rollán y O. A. Bachmeier

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo fueron: *i*) determinar en qué medida las fuentes fosfatadas y sus mezclas con urea afectan la biodisponibilidad de P, *ii*) analizar los efectos de interacción urea/fuente fosfatada, y *iii*) analizar el efecto de la urea sobre el P nativo del suelo. El experimento se condujo en un Hapludol típico Serie Santa Isabel (pH 6,1; 29 g kg⁻¹ de materia orgánica; 12,4 mg kg⁻¹ de P extractable; P total, 446 mg kg⁻¹; MBC 35,8 L kg⁻¹). Se hicieron ensayos de fertilización de trigo con dos fuentes fosfatadas: fosfato monoamónico y fosfato diamónico en dosis de 0, 9 y 17 kg P/ha, en mezclas físicas con urea en dosis de 0, 19 y 37 kg N/ha. Se concluyó que la aplicación de urea no causa efectos sobre los tenores de fósforo nativo en la zona de aplicación. Además, la disponibilidad del fósforo aplicado varía con la dosis y fuente fosfatada utilizada: la aplicación de fosfato monoamónico aumenta significativamente la biodisponibilidad del nutriente en este suelo, con respecto al fosfato diamónico. La utilización de mezclas de fertilizantes fosfatados, con bajas dosis de urea, aumenta la biodisponibilidad del nutriente para el trigo, con relación a las aplicaciones fosfatadas puras.

Palabras clave: fertilización, trigo, Hapludol, interacción N/P

Silva Rossi, M. M.; A. A. Rollán and O. A. Bachmeier, 2006. Phosphorus bioavailability in a soil of the south of Santa Fe (Argentina). Effects of two phosphate sources and their mixtures with urea. Agriscientia XXIII (2): 91-97

SUMMARY

The aims of this work were: *i*) to determine to what extent the phosphorus sources and the mixtures with urea affect P bioavailability, *ii*) to test interaction of urea/phosphate-source effects, and *iii*) to test the effect of urea on the native P of the soil. The experiment was performed in a Santa Isabel Typic Hapludoll (soil organic matter: 29 g kg⁻¹; pH: 6.1; extractable P: 12.4 mg kg⁻¹; and total P: 446 mg kg⁻¹; CBM 35.8 L kg⁻¹). Fertilization assays of wheat with two phosphate sources were carried out: monoammonium phosphate and diammonium phosphate in rates of 0.9 and 17 kg P/ha, in physical mixtures with urea in rates of 0.19 and 37 kg N/ha. It was concluded that in the soil tested, the use of urea causes no effects on the native phosphorus in the application band. Besides, the availability of the applied

Fecha de recepción: 30/11/05; fecha de aceptación: 30/10/06

phosphorus varies with the dose and phosphate source used: the application of monoammonium phosphate increases the bioavailability of the nutrient in this soil, in relation to the same rates of diammonium phosphate. When compared to pure phosphate applications, the use of mixtures of phosphate fertilizers with low doses of urea increases the bioavailability of the nutrient for wheat.

Key words: fertilization, wheat, Hapludoll, N/P interaction

M. M. Silva Rossi. Estudio Agronómico. Alvear 1244, 2600 Venado Tuerto, Argentina. A. A. Rollán y O. A. Bachmeier. Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNC, C.C. 509, 5000 Córdoba, Argentina. eagronom@cevt.com.ar

INTRODUCCIÓN

El fósforo es un elemento químicamente muy reactivo en la naturaleza y se lo encuentra en más de 170 compuestos minerales; éstos varían ampliamente en su solubilidad, ya que naturalmente evolucionan en el tiempo desde formas químicas moderadamente solubles a especies muy poco solubles. En consecuencia, es el menos móvil y con más problemas de biodisponibilidad de todos los macronutrientes. Esta característica le da una alta resistencia a ser lavado en la mayoría de los suelos, pero al mismo tiempo causa frecuentes deficiencias nutricionales en la producción agrícola (Holford, 1997).

Las plantas absorben el fósforo como iones fosfato diácido o monoácido de la solución del suelo. Debido a la baja solubilidad de los compuestos fosfatados, hay una tendencia de desplazamiento del equilibrio hacia la fase sólida, por lo que la concentración de fósforo en solución en un instante dado es muy baja. El continuo suministro de fósforo a los cultivos depende de la capacidad del suelo de reponer la concentración en solución. Esta capacidad depende de la cantidad de fósforo lábil que hay en el suelo y de la "habilidad" de éste para mantener la concentración en solución (Kuo, 1991).

Ante la adición de fertilizantes, es necesario considerar las reacciones que ocurren cuando se usan fuentes fosfatadas de distinta naturaleza química. Así, los efectos de la aplicación de compuestos de reacción alcalina (por ej. fosfato diamónico) son distintos a los de reacción ácida, como el fosfato monoamónico, cuyo pH de la solución saturada es de 3,5.

Lindsay & Stephenson (1959) y Lindsay *et al.* (1962) afirman que su empleo en suelos débilmente ácidos a ácidos provoca que, luego de su hidrólisis, la solución inicial sea muy ácida. El bajo pH favorecerá la solubilización de calcio, magnesio, hierro, aluminio y manganeso, que reaccionaran rápidamente con los iones fosfato, adsorbiendo y/o precipitando el fósforo soluble. De este modo, se verá afectada la disponibilidad del nutriente proveniente del fertilizante.

Dado que en el área triguera del sur de la provincia de Santa Fe la fertilización con distintos compuestos fosfatados en mezcla con dosis variables de urea es una práctica común, resulta necesario conocer su impacto sobre la biodisponibilidad del fósforo edáfico, a los efectos de ajustar la dosis del nutriente y seleccionar la formulación más adecuada para combinar con urea.

Sobre la base de lo expuesto, se planteó como hipótesis de trabajo que la biodisponibilidad del fósforo aplicado varía con la fuente fosfatada y con la proporción de urea utilizada en la mezcla. A efectos de corroborarla se formularon los siguientes objetivos: *i)* determinar en qué medida las fuentes fosfatadas y sus mezclas con urea afectan la biodisponibilidad de P, *ii)* analizar eventuales efectos de interacción urea/fuente fosfatada, y *iii)* analizar el efecto de la urea sobre el P nativo edáfico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se llevó a cabo sobre un

suelo Hapludol típico, según *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2003), perteneciente a la Serie Santa Isabel (Gorgas *et al.*, 1983), (arcilla: 15,7%, limo: 43,4%; arena: 40,9%), con 29 g kg⁻¹ de materia orgánica, pH (en H₂O, relac. 1:1), 6,1; 12,4 mg kg⁻¹ de P extractable (Bray & Kurtz N°1); P total, 446 mg kg⁻¹ (ácido perclórico; Kuo, 1996); P total inorgánico, 193 mg kg⁻¹ (ácido sulfúrico 1 N; Kuo, 1996), MBC de P, 35,8 kg L⁻¹ (Kuo, 1991).

El diseño experimental fue un factorial completamente aleatorizado (3 dosis de P x 3 dosis de U x 2 fuentes fosfatadas x 3 momentos de muestreo), con tres repeticiones por tratamiento. Los tratamientos consistieron en dos fuentes fosfatadas: fosfato monoamónico (MAP) y fosfato diamónico (DAP) en dosis de 0, 9 y 17 kg P/ha, las cuales se aplicaron en mezclas físicas con urea (U) en dosis de 0, 19 y 37 kg N/ha. Se fertilizó en la línea de siembra de un cultivo de trigo Klein Brujo (ciclo intermedio).

En inicios de encañazón, antesis y madurez fisiológica, escalas 31, 64 y 91 de Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974) se recolectaron muestras de suelo compuestas (por 25 submuestras) de 0 a 5 cm de profundidad en la línea de aplicación de los fertilizantes, para la determinación de P extractable (Bray & Kurtz N°1). Estas determinaciones permitieron evaluar cambios en la disponibilidad y la variación en la fracción de P recuperado, mediante la tasa de recuperación del fósforo aplicado (TRP). La TRP se calculó a partir de la pendiente de la relación P-aplicado/P-recuperado en suelo, para cada fuente fosfatada, tipo de mezcla con urea y momento de muestreo.

En estos mismos estadios fenológicos se recolectaron muestras de plantas, en un total de 20 por parcela (Jones *et al.*, 1971). Se eliminaron las partículas de suelo adheridas lavando con agua destilada, y se secaron en estufa a 70 °C durante 48 horas, para las determinaciones de fósforo en planta, y hasta obtener peso constante, para determinar materia seca (Bhargava & Raghupathi, 1993).

Con los resultados de materia seca y fósforo en planta en cada estadio fenológico se determinó la absorción de fósforo en cada estadio, según dosis, fuente fosfatada y mezcla aplicada. La digestión de los tejidos vegetales se realizó por oxidación húmeda con ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno (Jones & Case, 1990). El fósforo presente en el digesto se determinó por el método del complejo vanadomolibdofosfórico (Bhargava & Raghupathi, 1993).

Los resultados fueron analizados mediante ANOVA, y las diferencias entre medias comparadas con la prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher con InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Disponibilidad del P aplicado: efecto de la fuente

En las Tablas 1 a 3 se incluyen los tenores de fósforo recuperado en los distintos estadios fenológicos. Las variaciones de dichos tenores en inicios

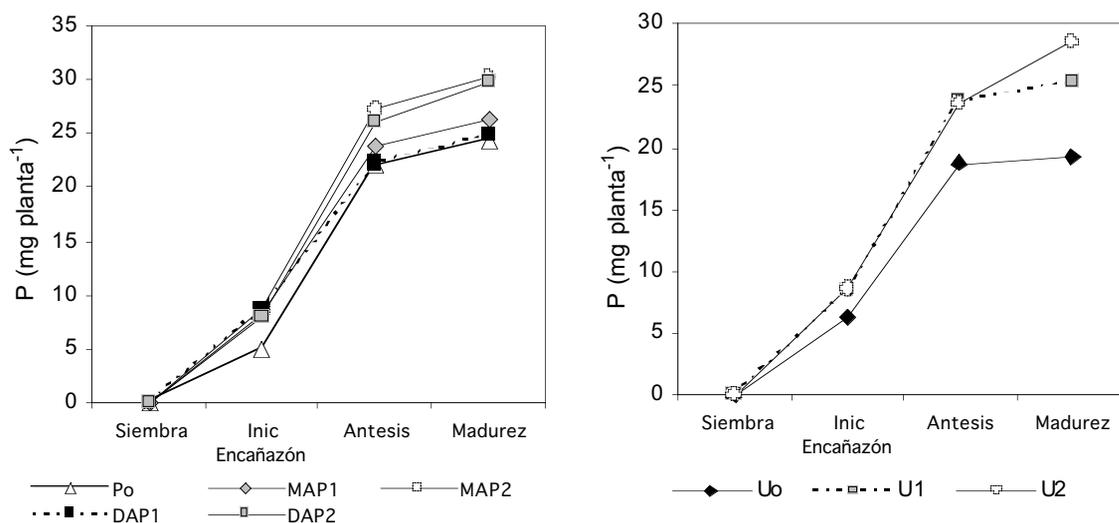


Figura 1. Valores medios de absorción de fósforo durante el ciclo del cultivo para las distintas fuentes fosfatadas, dosis de fósforo y urea utilizadas.

Tabla 1. Valores medios de fósforo recuperado en la línea de aplicación del fertilizante por Bray1, en inicios de encañazón del cultivo de trigo, según dosis, fuente de fósforo y dosis de urea. Comparaciones LSD Fisher.

Inicios de encañazón P-Bray1 (mg kg ⁻¹)		Dosis de Urea			Media
Dosis de P y Fuente	U ₀	U ₁	U ₂		
P ₀	13,8	14,1	12,8	13,6	
DAP ₁	16,2	19,8	19,8	18,6	
MAP ₁	22,9	24,5	20,8	22,7	
DAP ₂	24,1	21,9	24,9	23,6	
MAP ₂	31,7	27,9	26,4	28,7	
Media	20,9	21,6	20,9		

Valores de P y diferencia mínima significativa (dms)		
Fuente	P	dms
Fósforo	<0,001	1,76
Urea	0,425	1,37
Fósforo x Urea	0,004	3,35

P_{dms} = 0,05

de encañazón y madurez fisiológica se explican por un efecto de interacción fósforo x urea (P<0,05). En antesis la aplicación de fósforo y urea, afectan en forma independiente los tenores de fósforo recuperado (P<0,05).

El efecto de la aplicación de urea fue positivo sobre los tenores de fósforo recuperado en los tratamientos en que se aplicó este nutriente, no así sobre el P del suelo. Zhang *et al.* (2004) observaron, también en trigo, un aumento en la solubilidad del fósforo adicionado al emplear fertilizantes nitrogenados con base amoniacal, debido al efecto rizos-

férico acidificante derivado de la absorción de N-NH₄⁺, lo que habría estimulado la solubilización local del fertilizante. En el experimento que aquí se describe, la presencia del NH₄⁺ liberado en la mineralización de la urea, y la capacidad de las gramíneas invernales para absorber este ión (Heyland & Werner, 1999), puede haber ejercido un efecto similar.

En los tratamientos en los que se aplicó fertilizantes fosfatados sin urea el tenor de fósforo recuperado fue mayor al utilizar MAP como fuente fosfatada. Este hecho se relaciona con la acidificación local de la solución de suelo que provocan los fertilizantes de reacción ácida (Lindsay *et al.*, 1962), que facilitan, al menos inicialmente, la solubilidad del fósforo aportado por este formulado fertilizante. Dicha acidificación, por otra parte, no parece haber favorecido la solubilización de metales capaces de fijar fósforo en el suelo en estudio, a diferencia de lo que proponen como regla general Lindsay & Stephenson (1959). Ello puede corroborarse en estudios posteriores mediante cálculos de especiación iónica en solución (Schulthess, 2005).

Absorción de P por la planta de trigo

La absorción de P por el cultivo siguió la típica curva de absorción de nutrientes (Heyland & Werner, 1999). Se observó un bajo ritmo de absorción hasta inicios de encañazón; de aquí a antesis la absorción aumentó considerablemente y luego disminuyó hasta madurez fisiológica (Figura 1). En todos los estadios fenológicos evaluados, la aplicación de mezclas físicas de fertilizantes fosfatados con urea aumentó la absorción de P por el cultivo de trigo, debido a un efecto de interacción. En aquellos tratamientos sin aplicación de P se observó un

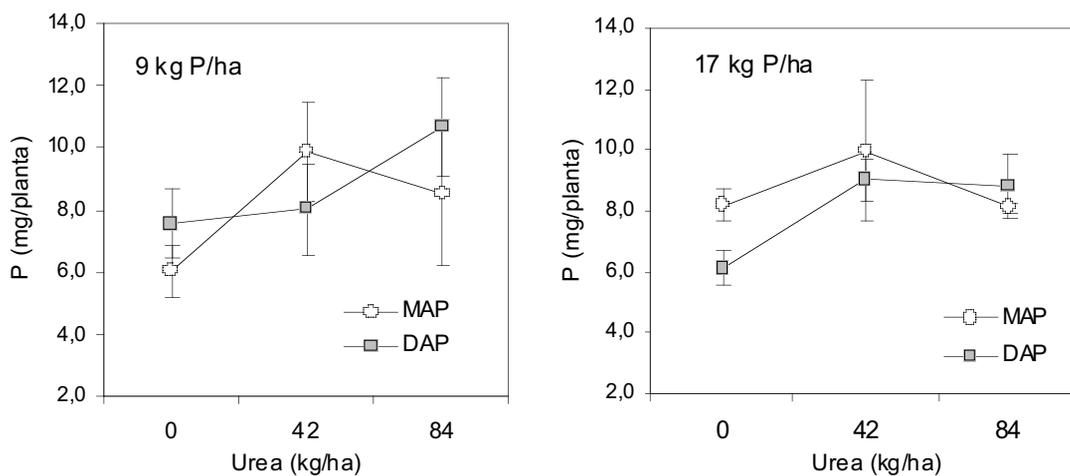


Figura 2. Valores medios de absorción de P en plantas de trigo en inicios de encañazón, con dosis de 0, 9 y 17 kg P/ha como MAP y DAP y dosis de urea. Las barras de error representan el desvío estándar de los datos experimentales.

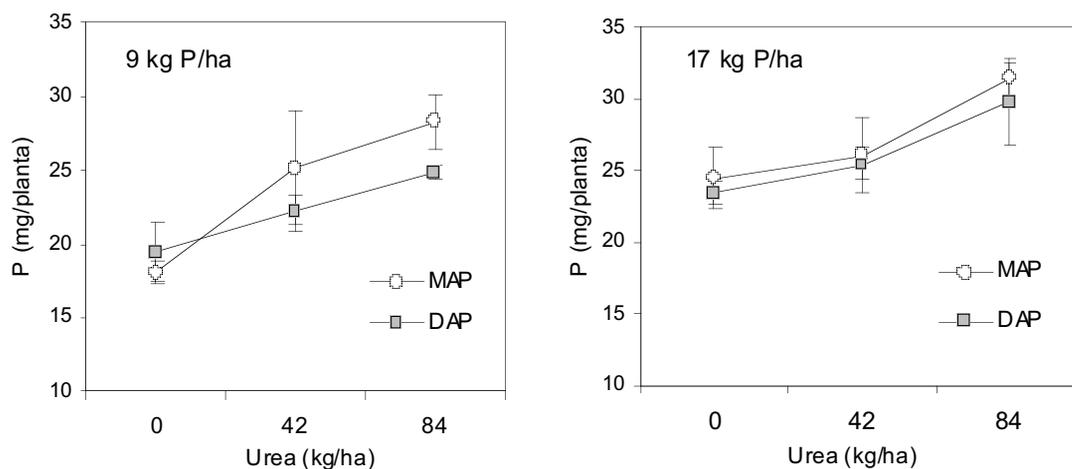


Figura 3. Valores medios de absorción de P en plantas de trigo en antesis, con dosis de 0, 9 y 17 kg P/ha como MAP y DAP y dosis de urea. Las barras de error representan el desvío estándar de los datos experimentales.

efecto similar por efecto de la adición de urea.

En inicios de encañazón, el efecto de interacción se observó al aplicar 9 kg P/ha como MAP con la primer dosis de urea (Figura 2). Con DAP el efecto de interacción positivo se observó al aplicarlo en mezcla con la dosis más alta de urea. Este efecto de interacción se mantuvo al aumentar la dosis de P en mezcla con urea, sin diferencia entre fuentes fosfatadas.

Independientemente de la fuente fosfatada, la

aplicación de bajas dosis de P aumentó la absorción del cultivo en el estadio de antesis, debido a la incorporación de la urea en la mezcla (Figura 3). Con una mayor dosis de P la absorción también aumentó, aunque sólo en las aplicaciones con las dosis más altas de urea.

En madurez fisiológica (Figura 4), la absorción del nutriente aumentó por efecto de interacción entre la urea y la dosis más baja de P. Al aumentar la dosis de este nutriente, el efecto de interacción se observó particularmente con el uso de DAP como fuente fos-

Tabla 2. Valores medios de fósforo recuperado en la línea de aplicación del fertilizante por Bray1, en antesis del cultivo de trigo, según dosis, fuente de fósforo y dosis de urea. Comparaciones LSD Fisher.

Antesis P-Bray1 (mg kg ⁻¹)				
Dosis de P y Fuente	Dosis de Urea			Media
	U ₀	U ₁	U ₂	
P ₀	15,1	14,2	14,3	14,5
DAP ₁	17,9	20,6	21,4	20,0
MAP ₁	22,3	26,7	22,7	23,9
DAP ₂	23,5	28,2	29,5	27,1
MAP ₂	29,1	33,6	31,8	31,5
Media	21,6	23,9	24,7	

Valores de P y diferencia mínima significativa (dms)		
Fuente	P	dms
Fósforo	<0,001	2,74
Urea	0,016	2,12
Fósforo x Urea	0,39	4,74

P_{dms} = 0,05

Tabla 3. Valores medios de fósforo recuperado en la línea de aplicación del fertilizante por Bray1, en madurez fisiológica del cultivo de trigo, según dosis, fuente de fósforo y dosis de urea. Comparaciones LSD Fisher.

Madurez fisiológica P-Bray1 (mg kg ⁻¹)				
Dosis de P y Fuente	Dosis de Urea			Media
	U ₀	U ₁	U ₂	
P ₀	12,1	13,7	15,1	13,6
DAP ₁	15,9	15,4	20,9	17,4
MAP ₁	25,5	27,4	19,2	24,1
DAP ₂	26,3	26,5	29,5	27,4
MAP ₂	32,4	24,4	28,7	28,5
Media	21,5	22,4	22,7	

Valores de P y diferencia mínima significativa (dms)		
Fuente	P	dms
Fósforo	<0,001	1,79
Urea	0,19	1,39
Fósforo x Urea	<0,001	3,09

P_{dms} = 0,05

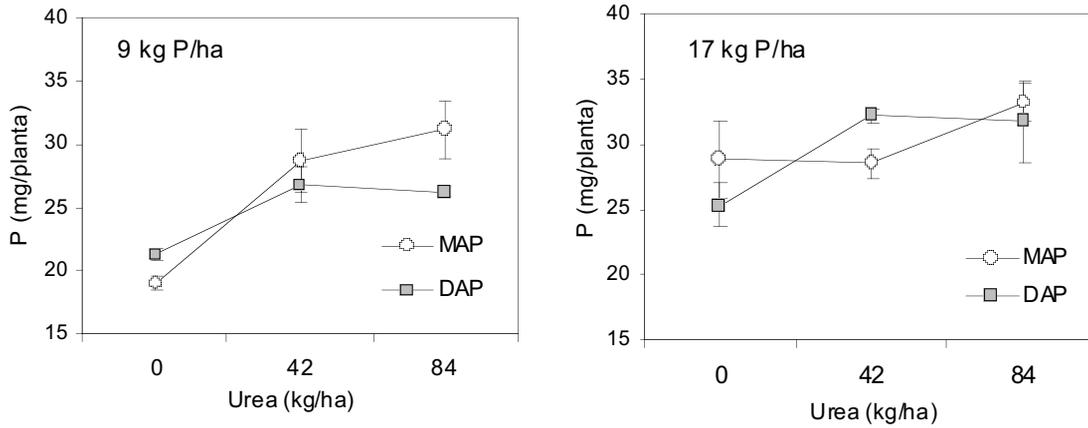


Figura 4. Valores medios de absorción de P en plantas de trigo en madurez fisiológica, con dosis de 0, 9 y 17 kg P/ha como MAP y DAP y dosis de urea. Las barras de error representan el desvío estándar de los datos experimentales.

fatada en mezcla con las dos dosis de urea. En este último estadio fenológico, como en antesis, no se observaron diferencias entre fuentes fosfatadas a $P < 0,05$.

Las variaciones observadas en la absorción del nutriente como resultado de las distintas técnicas de fertilización utilizadas, permiten estimar los cambios generados en la biodisponibilidad del fósforo.

Variaciones en la fracción de P recuperado

Las variaciones en la fracción de P recuperado durante el ciclo del cultivo y para cada una de las aplicaciones, se evaluaron a través de la tasa de recuperación de P aplicado (TRP), cuyos valores se presentan en la Tabla 4. Una mayor tasa de recuperación indica que se requiere una menor dosis de P aplicado para aumentar en una unidad la disponibilidad del P en el suelo. Este parámetro estima la inversa de la capacidad buffer del nutriente agregado, por lo cual un mayor valor indica una mayor disponibilidad del fertilizante aplicado (Holford & Mattingly, 1979). Con la aplicación de una fuente fos-

fatada sin urea, se observó una mayor TRP en inicios de encañazón y una disminución en el período de antesis, etapa en la que el cultivo alcanzó los máximos requerimientos nutricionales (Heyland & Werner, 1999); volvió a aumentar al cesar la absorción de nutrientes. Al aplicar las mismas dosis en mezcla con urea, y para ambas fuentes, se observó una menor TRP con respecto a las aplicaciones sin urea en inicios de encañazón y un aumento en antesis, para luego disminuir al finalizar el ciclo del cultivo.

La TRP fue superior —y en algunos casos, mayor a la unidad— cuando se utilizó MAP como fuente de P en lugar de DAP. Esto indica que la tasa de recuperación es mayor a la de aplicación; es decir, la reacción acidificante de dicho fertilizante produjo una mayor solubilización de los compuestos fosfatados, facilitando la extracción de formas de fósforo que en otras situaciones no estarían disponibles (Schulthess, 2005).

La aplicación de mezclas físicas P-urea produjo un aumento de la disponibilidad de fósforo cuando el cultivo alcanzó los máximos requerimientos, en el período de antesis. La mayor TRP en este estado se puede atribuir, de acuerdo con Fan *et al.* (1993), a un aumento del "pool lábil" de fósforo, ya que la reacción producida por la hidrólisis de la urea incrementa rápidamente la adsorción inicial de fósforo por el suelo, pero reduce la conversión de fósforo lábil a no lábil, con lo que el nutriente queda disponible para períodos posteriores.

Tabla 4. Tasa de recuperación del P aplicado, en inicios de encañazón, antesis y madurez fisiológica del cultivo de trigo. Efecto de la dosis de urea y fuente fosfatada.

Dosis de Urea (kg ha ⁻¹)	Inicios de Encañazón		Antesis		Madurez fisiológica	
	MAP	DAP	MAP	DAP	MAP	DAP
0	1,03	0,58	0,80	0,48	1,17	0,81
42	0,79	0,46	1,12	0,80	0,62	0,73
84	0,78	0,69	1,01	0,87	0,78	0,83

CONCLUSIONES

En el suelo estudiado la aplicación de urea no causa efectos sobre los tenores de fósforo en la zona de aplicación, pero incrementa la absorción por el cultivo en aquellos tratamientos no fertilizados con fósforo.

Los tenores de fósforo en el suelo varían con la dosis y fuente utilizada; la aplicación de fosfato monoamónico aumenta significativamente los tenores del nutriente en el suelo, con respecto a las mismas dosis de fosfato diamónico.

Los mayores valores de tasa de recuperación de fósforo (TRP) se traducen en un incremento en la biodisponibilidad de fósforo por un efecto de interacción P*urea en estadios tempranos y etapas finales del ciclo del cultivo, y por un efecto del fertilizante nitrogenado en los períodos de anthesis, con respecto a las aplicaciones de fuentes fosfatadas puras.

BIBLIOGRAFÍA

- Bhargava B.S. and H.B. Raghupathi, 1993. Analysis of plant materials for macro and micronutrients. *In*: H.L.S. Tandon (Editor), *Methods of analysis of soil, plant, water and fertilizers*. Fertilizers Development and Consultation Organization, New Delhi, India, pp. 49-82.
- Jones, J.B. Jr., R.L. Large, D.P. Pfeleiderer and H.S. Klosky, 1971. How to properly sample for a plant analysis. *Crops Soil*, 23: 15-18.
- Jones, J.B. Jr. and V.W. Case, 1990. Sampling, Handling, and Analyzing Plant tissue Samples. *In*: R.L. Westerman (Editor). *Soil Testing and Plant Analysis*. SSSA, Madison WI, pp. 389-429.
- Di Rienzo, J.A., C.W. Robledo, M.G. Balzarini, F. Casanoves, L. Gonzalez y M. Tablada, 2004. *InfoStat*, Software Estadístico, Versión 2004.1.
- Fan, M. X., A.F. MacKenzie and I.P. O'Halloran, 1993. Phosphorus sorption as influenced by added urea in two Eastern Canadian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57: 1218-1222.
- Gorgas, J. y R. Sobral, 1983. Cartas de suelos de la República Argentina, Hoja Venado Tuerto. INTA, pp: 19-118.
- Heyland, K.U. and A. Werner, 1999. Wheat. *In*: W. Wichmann (Ed.), *World Fertilizer Use Manual*. IFA. Paris, France. 600 pp.
- Holford, I.C.R., 1997. Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plant. *Aust. J. Soil Res.*, 35: 227-239.
- Holford, I.C.R. and G.E.C. Mattingly, 1979. Effects of phosphate buffering on extraction of labile phosphate by plants and by soil tests. *Aust. J. Soil Res.*, 17: 511-514.
- Kuo, S., 1991. Phosphate buffering and availability in soils. *Trends in Soil Sci.*, 1: 203-213.
- Kuo, S., 1996. Phosphorus. *In*: D.L. Sparks (Editor), *Methods of Soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods*. Chapter 32. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI, pp. 869-920.
- Lindsay W.L., A.W. Frazier and H.F. Stephenson, 1962. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26: 446-452.
- Lindsay, W.L. and H.F. Stephenson, 1959. Nature of the reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils: I. The solution that reacts with the soil. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 23: 12-18.
- Schulthess, C.P., 2005. *Soil Chemistry with Applied Mathematics*. Trafford Publishing, Victoria (Canada). 292 pp.
- Soil Survey Staff, 2003. *Keys to Soil Taxonomy*. 9th Edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 332 pp. Disponible en: http://soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys/ (verificado: 30/09/2006).
- Zadoks, J.C., T.T. Chang and C.F. Konzak, 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.*, 14: 415-421.
- Zhang, F., S. Kang, J. Zhang, R. Zhang and F. Li, 2004. Nitrogen fertilization on uptake of soil inorganic phosphorus fractions in the wheat root zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68 :1890-1895.