

DINAMICA DEL FÓSFORO CON FERTILIZANTE LÍQUIDO Y GRANULADO EN SUELOS DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA PAMPEANA

Lucila Álvarez ¹, Elke Noellemeyer ^{1*}

¹ Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Agronomía

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de un fertilizante fosforado líquido y otro granulado sobre la disponibilidad de P bajo dos condiciones de humedad edáfica, en suelos de distintas posiciones en el paisaje, en la Planicie con tosca de la Región Semiárida Central (RSC). Se realizó un ensayo de incubación con polifosfato líquido (PL) y con superfosfato triple (SPT) en suelo de ambientes de loma, media loma (Paleustoles petrocálcicos) y bajo (Haplustol típico). Posteriormente, con suelo de los mismos ambientes se realizó un ensayo en invernáculo con cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) con (H2) y sin limitación (H1) de humedad edáfica, fertilizando con PL y con SPT. En el primer ensayo se halló una ventaja del PL sólo en la loma, la cual presentó menor nivel de carbono orgánico (CO) y una mayor saturación de calcio intercambiable respecto al bajo donde no se observaron diferencias entre fuentes. En el ensayo en invernáculo, en H1 no se observó una ventaja clara del PL, mientras que cuando la humedad fue limitante, el PL favoreció la producción de materia seca sólo en el suelo de loma y media loma. El uso de PL sería recomendable en suelos calcáreos con bajo nivel de CO y alta saturación de Ca, en condiciones donde la humedad es limitante. Un adecuado nivel de CO podría contribuir a mejorar la eficiencia en el uso de los fertilizantes fosforados.

Palabras claves: suelos calcáreos, polifosfato, superfosfato triple.

PHOSPHORUS DYNAMICS WITH LIQUID AND GRANULAR FERTILIZER IN SOILS OF THE SEMIARID PAMPAS

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effect of the application of a liquid and a granulated phosphorous (P) fertilizer on the availability of P under two conditions of soil moisture, in soils of different positions in the Calcareous Plain landscape of the Central Semiarid Region (RSC). An incubation test was carried out with liquid polyphosphate (PL) and with triple superphosphate (SPT) in soil from top-slope, mid-slope (Petrocalcic Paleustoll) and foot-slope (Typic Haplustoll) environments. Subsequently, a greenhouse experiment was carried out using the same soils with PL and SPT fertilization on wheat (*Triticum aestivum* L.), with (H2) and without (H1) soil moisture limitation. In the first experiment the advantage of PL was limited to the top-slope position, with lower organic carbon (CO) and higher calcium saturation, compared to the foot-slope position where no differences between sources were observed. In the greenhouse experiment, under H1, a clear advantage of PL was not observed, while when moisture was limiting, PL favoured the production of dry matter only in top-slope and mid-slope soil. The use of PL would be recommended in calcareous soils with a low level of CO and high calcium saturation, in conditions where edaphic moisture is limiting. An adequate level of CO could contribute to improve the efficiency in the use of P fertilizers.

Keywords: calcareous soils, polyphosphate, triple superphosphate.

* Autor de contacto:
enoellemeyer@gmail.com

Recibido:
07-01-22

Recibido con revisiones:
09-05-22

Aceptado:
09-05-22

INTRODUCCIÓN

La eficiencia de uso del fósforo (P) aplicado como fertilizante generalmente es muy baja debido a diferentes procesos fisicoquímicos que fijan este elemento en el suelo. En términos generales, la respuesta no supera 200 kg ha⁻¹ de trigo (*Triticum aestivum* L.) por cada kg de P aplicado (Syers et al., 2008), y solo entre el 10-20% del P aplicado es absorbido por las plantas (Holford, 1997). Esto se debe a que el P reacciona con los constituyentes del suelo produciendo compuestos de distinto grado de solubilidad, pudiendo quedar adsorbido a la superficie de partículas minerales, incorporarse dentro de las estructuras minerales (formando variscitas o apatitas) o precipitar para formar nuevos sólidos (Hedley y McLaughlin, 2005). Estos procesos dependen de las características físico-químicas edáficas y condicionan la disponibilidad de P para los cultivos en los distintos tipos de suelo (Jalali y Ranjbar, 2010). En suelos neutros, el balance positivo de P a lo largo de los años, a través de la fertilización, puede incrementar los niveles de P disponible (Sucunza et al., 2018). Sin embargo, en suelos ácidos, calcáreos y alcalinos, la disponibilidad de P puede ser limitante. Mientras que en los suelos ácidos las interacciones con cationes ácidos como hierro (Fe) y aluminio (Al) producen la adsorción y eventualmente la fijación u oclusión de P en los minerales (goetita y variscita), en suelos calcáreos los procesos de sorción y desorción involucran el CaCO₃ y la precipitación de fosfato de calcio y su estabilización como apatita (Bertrand et al., 2003; Schoumans, 2014). La fertilidad fosforada y la disponibilidad de P para las plantas puede verse reflejada en respuestas en la calidad y el rendimiento del cultivo, mejorando la absorción de otros nutrientes, y contribuyendo a la tolerancia a sequía (Rubio et al., 2012; Suñer y Galantini, 2012). Sin embargo, los resultados de varios estudios indican que parte de los aportes de P con los fertilizantes se acumula en los suelos (Renneson et al., 2015; Wang et al., 2015), sugiriendo una baja eficiencia en el uso de este fertilizante y poca respuesta en términos de rendimiento por parte de los cultivos (Daroub et al., 2003). Además, con el tiempo, incluso las formas más lábiles de P maduran a formas menos disponibles, especialmente en suelos que contienen altas proporciones de Ca (Jalali y Ranjbar, 2010). En este tipo de suelos se ha observado que los aportes de P mediante los fertilizantes solubles granulares resultaron en muy bajas eficiencias de uso del elemento por parte de los cultivos (Khan et al., 2018; Lombi et al., 2006) y que las formulaciones líquidas presentan ventajas sobre las granuladas (Bertrand et al., 2006; Hettiarachchi et al., 2008; McBeath et al., 2007), encontrando una mejora en la disponibilidad y difusión del P proveniente de fuentes líquidas solamente en suelos calcáreos (Holloway et al., 2001; Khatiwada et al., 2014; Lombi et al., 2005, 2004). Yu et al. (2021) en un reciente trabajo de meta-análisis indican que existe un gran potencial para mejorar la eficiencia de uso de fertilizantes fosforados, sobre todo en cereales de invierno. En el mismo sentido, Weeks y Hettiarachchi (2019) analizaron posibilidades y nuevas tecnologías para incrementar la eficiencia en el uso del P dentro de las cuales consideran las formulaciones líquidas. En suelos calcáreos, la probabilidad de transformación de los fosfatos aplicados como fertilizante a fosfatos de calcio con muy baja solubilidad, o su adsorción a las calcitas presentes en la masa de suelos sería muy alta, sobre todo en suelos agrícolas con bajos contenidos de materia orgánica (Achat et al., 2016; Harrell y Wang, 2006). A su vez, los bajos contenidos de humedad en estos suelos también favorecerían la fijación de los fosfatos formando compuestos de muy baja biodisponibilidad (Du et al., 2013). En estas condiciones edáficas y climáticas, la aplicación de fertilizantes líquidos, como el polifosfato, podría resultar en mejor disponibilidad y eficiencia de uso de P, dando como resultado una mayor producción de materia seca y rendimiento de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de un fertilizante fosforado líquido y otro granulado sobre la disponibilidad de P para un cultivo de trigo bajo dos condiciones de humedad edáfica, en suelos de distintas posiciones en el paisaje en la Planicie con tosca de la RSC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinaciones físico- químicas

Se definió una toposecuencia en un sitio ubicado al sur de la subregión Planicie con Tosca (PT) de la Provincia de La Pampa (36° 45' 351"S; 64° 20' 445"O). Se consideraron tres posiciones en el relieve: loma, media loma y bajo, y se tomaron muestras compuestas de suelo de 0-20 cm de profundidad con tres submuestras de cada posición. Las mismas fueron secadas al aire y tamizadas por 2 mm. Se determinó CaCO₃ por el método del calcímetro presurizado (Goh y Mermut, 2006), C orgánico (CO) por digestión con dicromato de potasio y ácido sulfúrico y determinación colorimétrica (Skjemstad et al., 2003), cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método de acetato de amonio pH 7,0 y acetato de sodio pH 8,2, respectivamente, y determinación colorimétrica de Ca²⁺ y Mg²⁺, y de Na⁺ y K⁺ por fotometría de llama (Hendershot y Lalonde, 2006). La textura fue determinada por el método de la pipeta de Robinson (Gee y Bauder, 1986). El pH se midió potenciométricamente en suspensiones de suelo: agua de 1:2,5. Se determi-

nó la concentración de P extractable mediante extracción con membrana de intercambio aniónico (18 h de agitado) y posterior colorimetría por el método de Murphy y Riley (Murphy y Riley, 1962). Los contenidos de Fe y Al extractables se determinaron por extracción con oxalato de amonio ácido (pH=3) en oscuridad (Fe, Al) (Courchesne y Turmel, 2006), y posterior lectura por ICP (Inductively coupled plasma). Se determinó el porcentaje de agua retenido a capacidad de campo mediante la técnica de Humedad Equivalente.

Fertilizantes fosforados utilizados

- Superfosfato triple de Ca (SPT) grado equivalente 0-46-0 con 20,5% de P y 14% de Ca. Presentación en gránulos.
- Polifosfato líquido (PL) grado equivalente 11-37-0 con 16,1% de P. Presentación líquida de densidad 1,41 g cm⁻³.

Ensayo de incubación con fertilizante

Se colocaron 78 g de suelo seco más la humedad correspondiente (80% de la capacidad de campo), en cada caja de Petri y se compactó a una densidad aparente de 1,25 g cm⁻³ (adaptado de Lombi et al., 2004). Para los suelos de cada ambiente se realizaron los siguientes tratamientos, con cuatro repeticiones cada uno: 1) testigo sin aplicación de P (T); 2) fertilizado con (SPT): Se colocó un gránulo de fertilizante (20,5 mg ±0,2, equivalente a 9,43 mg de P por caja de Petri) en un hoyo en el suelo en el centro de la caja de Petri; y 3) fertilizado con PL: Se aplicó una gota de 17,6 µl (equivalente a 9,43 mg P por caja de Petri) sobre el suelo en el centro de la caja de Petri.

Se dejó incubar el suelo por cinco semanas manteniendo el nivel de humedad. Transcurrido este tiempo se tomaron cuatro secciones de suelo concéntricas de las cajas de Petri tratadas con fertilizante (Figura 1) y en cada una se determinó la concentración de P disponible mediante membranas de intercambio aniónico (18 h de agitado) y posterior colorimetría por el método de Murphy y Riley (Murphy y Riley, 1962).



Figura 1. Esquema de muestreo de suelo por anillos concéntricos de las secciones en el ensayo de difusión.

Figure 1. Soil sampling scheme by concentric rings of the sections in the diffusion test.

La eficiencia de recuperación de P (ER, %) fue calculada como $(\sum P \text{ final en cada sección (mg)} - P \text{ testigo (mg)}) * 100 / P \text{ aplicado (mg)}$. En la Figura 2, la ER fue calculada para cada sección.

Ensayo en invernáculo con cultivo de trigo

Se realizó un ensayo en maceta utilizando trigo variedad ACA 315, con muestras de suelo de loma, media loma y bajo de los mismos puntos a las utilizadas anteriormente. Previo a la siembra se humedeció el suelo a capacidad de campo y se aplicó una dosis de nitrógeno (N) a razón de 30 kg ha⁻¹ y 5 kg ha⁻¹ de P por tonelada de rendimiento esperado, estimándose un rinde de 4000 kg ha⁻¹. Los tratamientos fueron: 1) testigo sin agregado de fertilizante (T); 2) fertilizado con PL, aplicado superficialmente en forma de gotas; 3) fertilizado con SPT ubicando el gránulo de fertilizante por debajo y al costado de la semilla a una distancia de 5 cm de ésta. Además, se introdujo como una nueva variable la condición de humedad: 80 % de capacidad de campo (manteniéndola constante en el tiempo mediante un control por peso de la maceta) (H1); y períodos de secado y humedecimiento para simular las condiciones medias de humedad del suelo durante el periodo del cultivo en la Región semiárida, teniendo en cuenta las frecuencias de precipitaciones (H2). Se realizaron cuatro repeticiones de cada tratamiento, con un total de 72 macetas. Al momento de la cosecha del material vegetal y del muestreo de suelo las plantas se encontraban en Z.4 de la escala de Zadoks (Zadoks et al., 1974). Se determinó peso seco de la biomasa aérea por corte al ras del suelo y el contenido de P y N total de la parte aérea por espectrometría ICP (*Inductively Coupled Plasma*) y la biomasa de raíces por tamizado un húmedo de la masa de suelo de cada maceta y determinación del peso seco de la biomasa de raíces.

Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de la varianza (ANOVA) mediante el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2013) considerando los factores posición topográfica y fertilizante, y para el ensayo en invernáculo se incluyó además el factor humedad. Se utilizó el Test de Tukey con un nivel de significancia de 0,05. Se realizaron correlaciones utilizando el coeficiente de correlación de Pearson.

RESULTADOS

Los suelos fueron clasificados según Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) como Haplustol típico en el bajo y Paleustol petrocálcico en la media loma y la loma. En todos los casos el suelo presentó una textura franco-arenosa en las tres posiciones topográficas, con un contenido más alto de CO en el bajo (10,7 g kg⁻¹), respecto a la media loma (9,6 g kg⁻¹) y la loma (9,4 g kg⁻¹). La concentración de P en la loma (4,4 mg kg⁻¹) y la media loma (4,8 mg kg⁻¹) fue significativamente inferior a la observada en el bajo (8,8 mg kg⁻¹). Los resultados de los análisis físico-químicos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo de loma, media loma y bajo. (CO: carbono orgánico; P- MIA: P determinado mediante membrana de intercambio aniónico; CIC: capacidad de intercambio catiónico; SB: saturación de bases).

Table 1. Chemical physical properties of the top-slope (loma), mid-slope (media loma) and foot-slope (bajo) soil. (Arena: sand; Limo: silt; Arcilla: clay; CO: organic carbon; P-MIA: P determined by anion exchange membrane; CIC: cation exchange capacity; SB: base saturation).

Propiedades físico- químicas		Loma	Media Loma	Bajo
Arena		663 a	619 b	581 c
Limo		314 b	343 a	381 a
Arcilla	g kg ⁻¹	23 b	38 a	38 a
CO		9,4 b	9,6 b	10,7 a
CaCO ₃		9,3 a	10,5 a	11,4 a
P- MIA	mg kg ⁻¹	4,4 b	4,8 b	8,8 a
Ca		22,2 a	16,8 b	14,2 b
Mg	cmol.kg ⁻¹	0,6 b	1,2 a	1,4 a
Na		0,1 a	0,1 a	0,1 a
K		1,4 b	1,8 a	2,1 a
Al	mg kg ⁻¹	840,0 a	885,1 a	844,2 a
Fe		875,4 a	747,8 b	860,3 a
CIC	g kg ⁻¹	16,1 b	23,7 a	19,4 b
SB	%	100 a	84,1 b	92,2 b
pH		7,4 a	7,5 a	7,3 a

Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada variable ($p < 0,05$).

Ensayos de incubación con fertilizante

En general, las ER halladas en estos suelos fueron bajas, con una media del 30%, encontrándose interacciones significativas entre el tipo de fertilizante y la posición topográfica ($p < 0,0001$). En el suelo del bajo no se observaron diferencias entre fertilizantes y la ER media fue de 35,0%, mientras que en el suelo de media loma el SPT mostró una mejora en la disponibilidad respecto a PL, y en el suelo de la loma el PL fue superior al SPT, con valores de ER de 28,8% y 25,3%, respectivamente. Por otro lado, en el suelo del bajo se encontró una mayor disponibilidad de P respecto a la loma, independientemente del fertilizante aplicado. La ER de P estuvo relacionada principalmente con el contenido de Ca, con el cual se asoció de manera negativa ($r = -0,69$; $n=24$; $p < 0,05$) y con el CO, asociado de manera positiva ($r = 0,66$; $n=24$; $p < 0,05$).

Tabla 2. Precipitaciones por períodos dentro de cada campaña (2010/11, 2011/12 y 2012/13).

Table 2. Rainfall by periods within each campaign (2010/11, 2011/12 y 2012/13).

Posición topográfica	Sección (mm)	P- MIA (mg kg ⁻¹)	
		PL	SPT
Loma	0-7,5	909,8 B	1142,4 A
	7,5-13,5	111,2 A	45,4 B
	13,5-25,5	16,6 A	7,9 B
	25,5-43	14,6 A	7,4 B
	Testigo	6,5	
Media Loma	0-7,5	857,5 B	1356,3 A
	7,5-13,5	139,9 A	104,5 B
	13,5-25,5	19,6 A	16,6 B
	25,5-43	15,7 A	16,2 A
	Testigo	10,9	
Bajo	0-7,5	1039,4 A	1162,5 A
	7,5-13,5	171,9 A	91,9 B
	13,5-25,5	25,4 A	26,8 A
	25,5-43	23,8 A	23,1 A
	Testigo	11,2	

Letras mayúsculas indican diferencias entre PL Y SPT para cada sección. (p<0,05).

Se encontró que la mayor parte del fertilizante quedó confinado en los primeros 7,5 mm, superando en la mayoría de los casos el 80% del P recuperado luego del periodo de incubación (Figura 2). Sin embargo, se observaron diferencias entre fertilizantes principalmente en el suelo de la loma donde la ER en la sección de 0- 7,5 mm concentró el 95% del P en el caso de SPT y el 86 % en el caso de PL, mientras que en el suelo del bajo la diferencia fue menor, ya que quedó confinado el 83% (PL) y 89 % (SPT), hallándose una situación intermedia en la media loma (83% y 91% para PL y SPT, respectivamente). Por otro lado, en la sección más alejada del punto de aplicación (25,5 - 43 mm), en el suelo de la loma el PL presentó una mayor disponibilidad de P que el SPT, mientras que en la media loma y el bajo no se encontraron diferencias significativas entre fertilizantes.

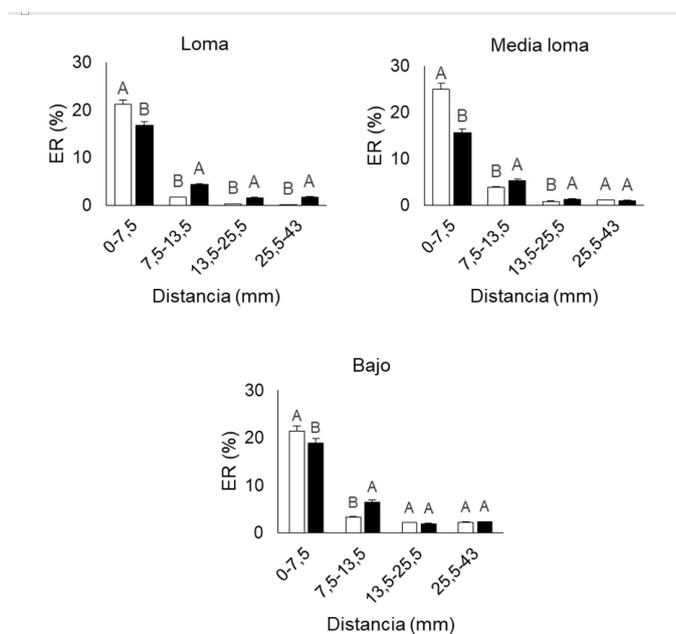


Figura 2. Eficiencia de recuperación (ER) de P luego de la incubación con PL y SPT en suelo de loma, media loma y bajo a cuatro distancias del punto de aplicación del fertilizante. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre SPT y PL en cada sección (p< 0,05).

Figure 2. Recovery efficiency (ER) of P after incubation with PL and SPT in top-slope, mid-slope, and foot-slope soil at four distances from the fertilizer application point. Bars indicate standard error. Different letters indicate significant differences between SPT and PL in each section (p<0.05).

En la última sección (25,5 - 43 mm) se observaron incrementos de P respecto al testigo (6,5 mg kg⁻¹) de diferente magnitud según el fertilizante aplicado, hallándose un aumento del 14% en el caso del SPT (7,4 mg kg⁻¹), mientras que con la aplicación de PL este llegó al 125% (14,6 mg kg⁻¹) en el suelo de la loma. En el caso de la media loma los incrementos respecto al testigo (10,9 mg kg⁻¹) se encontraron entre el 44% (15,7 mg kg⁻¹) para PL y 48% (16,2 mg kg⁻¹) para SPT, superando en el suelo del bajo 100% de aumento con ambos fertilizantes (23,8 mg kg⁻¹ y 23,1 mg kg⁻¹ para PL y SPT, respectivamente). (Tabla 3)

Tabla 3. Fósforo determinado por membrana de intercambio aniónico (P-MIA) en las cuatro secciones de suelo en la caja de Petri (0-7,5 mm; 7,5-13,5 mm; 13,5-25,5 mm; 25,5-43 mm) para las tres posiciones topográficas (loma, media loma y bajo) y los dos fertilizantes (PL y SPT) y el testigo.

Table 3. Phosphorus determined by anion exchange membrane (P-MIA) in the four soil sections in the Petri dish (0-7.5 mm; 7.5-13.5 mm; 13.5-25.5 mm; 25.5-43 mm) for the three topographic positions (top-slope, mid-slope, and foot-slope) and the two fertilizers (PL and SPT) and the control (testigo).

Posición topográfica	Sección (mm)	P- MIA (mg kg ⁻¹)	
		PL	SPT
Loma	0-7,5	909,8 B	1142,4 A
	7,5-13,5	111,2 A	45,4 B
	13,5-25,5	16,6 A	7,9 B
	25,5-43	14,6 A	7,4 B
	Testigo	6,5	
Media Loma	0-7,5	857,5 B	1356,3 A
	7,5-13,5	139,9 A	104,5 B
	13,5-25,5	19,6 A	16,6 B
	25,5-43	15,7 A	16,2 A
	Testigo	10,9	
Bajo	0-7,5	1039,4 A	1162,5 A
	7,5-13,5	171,9 A	91,9 B
	13,5-25,5	25,4 A	26,8 A
	25,5-43	23,8 A	23,1 A
	Testigo	11,2	

Letras mayúsculas indican diferencias entre PL Y SPT para cada sección. ($p < 0,05$).

Se analizó la correlación entre algunas propiedades edáficas y la ER en la última sección como indicador de la tasa de difusión de cada tipo de fertilizante en el suelo. La ER en la última sección estuvo asociada con el aumento de CO, hallándose una correlación más alta cuando se aplicó SPT ($r = 0,93$, $n = 12$, $p < 0,05$), respecto a la aplicación de PL ($r = 0,69$, $n = 12$, $p < 0,05$). A su vez, el contenido de Ca afectó negativamente a la disponibilidad de P en la última sección de SPT mostrando un alto coeficiente de correlación ($r = -0,95$, $n = 12$, $p < 0,05$), sin observarse esta asociación en el caso de PL.

Ensayos en invernáculo con cultivo de trigo

Producción de materia seca: Para la materia seca aérea se encontró interacción significativa ($p < 0,01$) entre humedad, posición topográfica y fertilizante. En el testigo sin limitación de humedad (H1), la loma presentó menor producción de MS que la media loma, hallándose en el bajo la mayor producción. En ambos tratamientos fertilizados también se halló la menor producción de MS en la loma, no diferenciándose la media loma y el bajo en el caso de SPT, mientras que en PL la media loma fue superior en MS respecto al bajo. En el suelo de la loma y de la media loma en general hubo una respuesta a la fertilización, independientemente del tipo de fertilizante, mientras que en el suelo del bajo no se hallaron diferencias significativas en la producción de MS entre testigo y fertilizados, y tampoco entre tipos de fertilizantes (Figura 3).

La ER de SPT de los ensayos de incubación se correlacionó ($r = 0,94$, $n = 12$, $p < 0,0001$) con la producción de MS en H1, donde la condición de humedad fue la misma (80% CC).

Bajo la condición de limitación de humedad (H2), la producción de MS en los testigos se incrementó significativamente desde la loma hacia el bajo. Al fertilizar con SPT el bajo presentó mayor producción, mientras que entre loma y media loma no hubo diferencias. Sin embargo, con la aplicación de PL, no se observaron diferencias significativas entre posiciones topográficas, lo que podría indicar un efecto de homogeneización de la producción con este fertilizante. En los suelos de loma y media loma, el SPT no produjo una respuesta significativa en MS respecto al testigo, sin embargo, con la aplicación de PL hubo un incremento significativo de MS. Por otro lado, el suelo del bajo al igual que cuando la humedad no fue limitante, no presentó diferencias significativas entre testigo y fertilizados, ni entre fertilizantes.

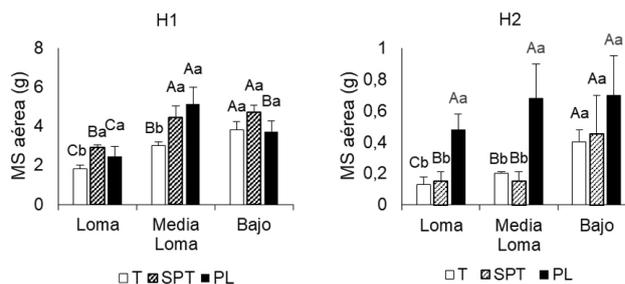


Figura 3. Materia seca aérea (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento sin limitación (H1) y con limitación de humedad (H2) en suelo de loma, media loma y bajo. Barras indican error estándar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada tratamiento fertilizante, letras minúsculas entre tratamientos dentro de cada posición ($p < 0,05$).

Figure 3. Aerial dry matter (g) in the control (T), fertilized with triple superphosphate (SPT) and with liquid phosphate (PL) in the treatment without limitation (H1) and with moisture limitation (H2) in soil of top-slope, mid-slope, and foot-slope. Bars indicate standard error. Capital letters indicate significant differences between topographic positions for each fertilizer treatment, lowercase letters between treatments within each position ($p < 0.05$).

La materia seca radicular presentó menor variación entre posiciones topográficas y fertilizantes que la materia seca aérea (Figura 4). En general no se hallaron diferencias entre testigo y fertilizados en ninguna de las dos condiciones de humedad y sólo se encontraron diferencias entre posiciones topográficas en el caso de H1 donde los tratamientos con aplicación de SPT presentaron mayor materia seca radicular en la media loma y bajo, respecto a la loma, mientras que con la aplicación de PL la media loma fue superior a la loma y el bajo. Los efectos de la topografía y la condición de humedad fueron significativos ($p < 0,05$ y $p < 0,0001$, respectivamente) para la relación tallo: raíz, hallándose una relación más alta en H1 (0,87), respecto a H2 (0,17) e incrementándose de la loma (0,30) a la media loma (0,41) y el bajo (0,66).

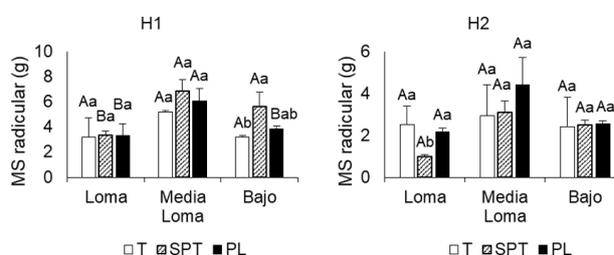


Figura 4. Materia seca radicular (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento sin limitación (H1) y con limitación de humedad (H2) en suelo de loma, media loma y bajo. Barras indican error estándar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada tratamiento fertilizante, letras minúsculas entre tratamientos dentro de cada posición ($p < 0,05$).

Figure 4. Root dry matter (g) in control (T), fertilized with triple superphosphate (SPT) and with liquid phosphate (PL) in the treatment without limitation (H1) and with moisture limitation (H2) in top-slope, mid-slope, and foot-slope. Bars indicate standard error. Capital letters indicate significant differences between topographic positions for each fertilizer treatment, lowercase letters between treatments within each position ($p < 0.05$).

N y P en el material vegetal: La determinación de los contenidos de P y N en el material vegetal se realizó en los ensayos con suelo de loma ya que fue en este caso donde se observaron mayores variaciones entre tratamientos, siendo además el ambiente más limitante para la disponibilidad de P (Tabla 4). Se encontró una interacción significativa entre fertilizante y humedad ($p < 0,05$). En H2 la concentración de N y P disminuyó con el aumento de materia seca (N: $r = -0,88$, $n = 8$, $p < 0,01$; P: $r = -0,87$, $n = 8$, $p < 0,01$), indicando un efecto de dilución, mientras que en H1 la concentración de P aumentó con el incremento en materia seca ($r = 0,76$, $n = 8$, $p < 0,01$), sin hallarse una correlación significativa con N (Tabla 4). El material vegetal presentó menor relación N:P en H1 respecto a H2 en el caso del testigo y SPT, mientras que al fertilizar con PL no se hallaron diferencias significativas entre las dos condiciones de humedad. En H1 el testigo tuvo una relación N:P más

alta (19,1) que los tratamientos fertilizados, pero no se observaron diferencias significativas entre la aplicación de PL (16,6) y SPT (16,5). Sin embargo, en H2 los tratamientos testigo (24,0) y SPT (23,8) presentaron un comportamiento similar, mientras que el tratamiento fertilizado con PL mostró una disminución de la relación N:P en el material vegetal (18,7).

Tabla 4. Concentración de N (g kg^{-1}) y P (g kg^{-1}) y relación N:P en el material vegetal aéreo bajo dos condiciones de humedad (sin limitación, H1 y con limitación, H2) en tratamientos Testigo (T), superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en suelo de loma.

Table 4. Concentration of N (g kg^{-1}) and P (g kg^{-1}) and N:P ratio in aerial plant material under two moisture conditions (without limitation, H1 and with limitation, H2) in control (T), triple superphosphate (SPT) and with liquid phosphate (PL) treatments, in top-slope soil.

Tratamiento	N (g kg^{-1})		P (g kg^{-1})		N:P	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
T	16,9 B	31,4 A	0,89 B	1,31 A	19,1 Ab	24,0 Aa
SPT	19,7 A	28,6 B	1,19 A	1,20 B	16,5 Bb	23,8 Aa
PL	15,1 B	17,5 C	0,91 B	0,94 C	16,6 Ba	18,7 Ba

Letras mayúsculas indican diferencias entre T, SPT y PL para cada condición de humedad, letras minúsculas indican diferencias entre condición de humedad para T, SPT y PL. ($p < 0,05$).

DISCUSIÓN

Las ER alcanzadas en los ensayos de incubación en general fueron bajas en las tres posiciones topográficas, aunque en el suelo de la loma la disponibilidad de P fue más limitada. En este caso, el menor contenido de CO y la mayor abundancia de Ca intercambiable en la loma limitaron la difusión y la disponibilidad de P al aplicar SPT, mientras que el PL mostró un mejor comportamiento, sugiriendo que la presencia de polifosfatos inhibe la precipitación de los fosfatos de calcio en suelos alcalinos calcáreos (Bertrand et al., 2006). La menor difusión de P aplicado como SPT podría deberse a que la alta concentración de P alrededor del gránulo favorece la precipitación de fosfatos de calcio. Lombi et al. (2004) encontraron que, al aplicar una formulación granulada de fosfato monoamónico, la mayor parte del P quedó en cercanías del gránulo, mientras que con la formulación líquida el P difundió mejor, disminuyendo o evitando la precipitación. Sin embargo, las diferencias halladas entre la formulación líquida y la granular en este trabajo son pequeñas, encontrándose, por ejemplo, en la sección central en la media loma 857 mg kg^{-1} P en PL y 1356 mg kg^{-1} en SPT, en comparación con otros trabajos que han hallado ventajas más claras de los fertilizantes líquidos. En relación a esto, McBeath et al. (2007) sugieren que las diferencias entre formulaciones líquidas y granulares se dan en suelos con contenidos de CaCO_3 superiores al 5%. Erenoğlu y Dündar (2020) también hallaron una mejora en la movilidad del P en el suelo y en la tasa de absorción al utilizar fertilizantes líquidos versus granulares en plantas de trigo, en un suelo calcáreo con 17,8% de CaCO_3 . Si bien los suelos de las posiciones de loma y media loma analizados en este trabajo fueron clasificados como Paleustoles petrocálcicos, presentaron contenidos de CaCO_3 por debajo de estos valores. En el suelo de la loma, el 87% del P recuperado se halló en los primeros 13,5 mm cuando fue aplicado como PL, mientras que al ser aplicado como SPT el 98% del P se concentró en esta sección. Sin embargo, en el suelo del bajo el P recuperado hasta los 13,5 mm alcanzó el 85% para ambas fuentes. Esto coincide con lo hallado en varios trabajos donde la difusión de P aplicado en forma granular queda confinada en un radio de 13,5 mm del punto de aplicación (Lombi et al., 2004a). Las condiciones de los suelos de la Planicie con tosca resultaron en una incompleta disolución del gránulo de SPT aplicado, similar a lo hallado por Lombi et al. (2005) en fertilizantes como fosfato mono y di amónico y SPT. Mengel (2018) también observó mayor formación de P-Ca en formulaciones granuladas respecto a líquidas y Suñer y Galantini (2013) describieron que suelos con menores contenidos de P extraíble terminaron formando más P-Ca cuando se le aplicó fertilizante granulado. En suelos no calcáreos, la zona de difusión del fertilizante granular crece con el tiempo, mientras que en suelos calcáreos se observó una disminución de la zona de difusión entre el día 1 y el 7, sugiriendo que actúan procesos de precipitación sobre carbonatos de calcio (Degryse y McLaughlin, 2014). De esta manera se favorece la precipitación de fosfatos de Ca que podrían ir convirtiéndose en formas más estables con el tiempo (Perassi y Borgnino, 2014). Por otro lado, en el suelo del bajo la influencia del calcáreo fue menor, contribuyendo a una saturación de Ca más baja. Sumado a esto, el contenido más alto de CO, permitió que se dieran condiciones más favorables para la disponibilidad de P, ya que los ácidos orgánicos de bajo peso molecular pueden favorecer la liberación de P a la solución del suelo debido a que las sustancias húmicas reducen la adsorción de fosfatos sobre calcita (Moradi et al., 2014; Taghipour y Jalali, 2012; Yang et al.,

2019), pudiendo además inhibir la transformación de fosfatos de Ca en compuestos termodinámicamente más estables (Alvarez et al., 2004). Esto podría explicar que el PL no haya presentado ventajas sobre el SPT en esta posición topográfica.

Al introducir el factor humedad y el cultivo en los ensayos en invernáculo, con la condición de humedad no limitante del 80% de capacidad de campo (H1), la producción de MS respondió al agregado de fertilizante (excepto en el bajo) pero no se observó una ventaja del PL. La relación N:P en el material vegetal del suelo de la loma siguió la misma tendencia ya que fue similar entre SPT y PL y se halló cercana al valor de N:P (16) que, según Prado y Silva, (2017) no sugiere deficiencias, indicando que la disponibilidad no fue limitante en estas condiciones. Por otro lado, la presencia de raíces al incorporar el cultivo probablemente modificó las condiciones del suelo de la rizosfera, favoreciendo la disponibilidad de P, factor que no se tuvo en cuenta en los ensayos de incubación. Sin embargo, en la RSC los suelos generalmente atraviesan periodos con déficit de humedad durante el desarrollo de los cultivos. La escasez de humedad en el suelo puede afectar la difusión de P desde el fertilizante hacia las raíces, sobre todo en el caso del gránulo de SPT. En suelos con mayor contenido de materia orgánica, tal como el del bajo, este efecto podría verse atenuado debido al efecto supresor de los compuestos húmicos sobre la precipitación de P-Ca y la adsorción de P sobre calcita (Sindelar et al., 2015), mejorando la disponibilidad de P al aumentar la distancia del movimiento de P y la concentración de P extraíble en el suelo que rodea al fertilizante de P (Du et al., 2013; von Wandruszka, 2006). Sin embargo, en ambientes como la loma y la media loma, con más abundancia de Ca y menor contenido de CO, la disponibilidad de P proveniente del gránulo se encuentra más afectada. En línea con esto, se observó una marcada deficiencia de P en los tratamientos testigo y fertilizado con SPT en el tratamiento con limitaciones en la humedad, considerando el límite por encima del cual se sugiere deficiencia de P (Prado y Silva, 2017), indicando que fertilizar con SPT con contenidos limitantes de humedad limitaría la difusión de P y por lo tanto el P absorbido por el cultivo (Menezes-Blackburn et al., 2018), resultando en la deficiencia de P para el cultivo. En el caso del tratamiento fertilizado con PL, la relación N:P no se diferenció del tratamiento fertilizado con la misma fuente sin limitación de humedad, indicando que la utilización de esta fuente podría atenuar el efecto de la falta de humedad en el suelo. Bajas tasas de aplicación o de disponibilidad de P en condiciones de estrés hídrico pueden generar una gran reducción en el crecimiento de la planta y, por ende, en el rendimiento del cultivo, mientras que un adecuado suministro de P puede compensar el efecto del estrés hídrico (Jones et al., 2005; Mumtaz et al., 2014).

Las plantas de los tratamientos testigo y fertilizado con SPT del suelo de loma, en condiciones limitantes de humedad, fueron las que menor relación tallo: raíz presentaron, coincidiendo con las deficiencias de P más pronunciadas. Bajo deficiencia de P, el crecimiento aéreo puede ser menos inhibido que el crecimiento de la raíz, llevando a una disminución en la relación tallo: raíz (Lamber et al., 2006; Steingrobe et al., 2001), como se observó en este trabajo. Esta disminución es debida a un aumento en la partición de carbohidratos hacia las raíces (Hawkesford et al., 2012).

El mejor comportamiento del PL bajo condiciones limitantes de humedad, las cuales son características de Planicie con tosca, podría traducirse posteriormente en un mayor rendimiento del cultivo en los suelos de ambiente de loma y media loma. Bajo condiciones de deficiencia de P, como las que fueron detectadas en el tratamiento testigo y en el fertilizado con SPT con restricción de humedad, puede verse inhibida además de la tasa de crecimiento de la planta, la formación de órganos reproductivos, retrasarse la iniciación floral, y restringirse la formación de granos (Carstensen et al., 2018). La senescencia prematura de las hojas es otro factor que limitaría el rendimiento del cultivo (Hawkesford et al., 2012). Por otro lado, la fertilización con PL podría generar una mayor homogeneidad en el crecimiento de las plantas dentro de un lote, ya que como se observó en este tratamiento no se hallaron diferencias entre los ensayos con suelos de los tres ambientes.

CONCLUSIONES

La aplicación de P como polifosfato líquido puede mejorar la disponibilidad edáfica de este nutriente respecto a la aplicación de una formulación granulada como superfosfato triple, en condiciones de humedad limitantes y en suelos calcáreos con bajo nivel de materia orgánica, como en los ambientes de loma y media loma analizados en este trabajo. La mejora en la disponibilidad de P contribuye a un incremento en la absorción de P lo cual se ve reflejado en un aumento en la producción de materia seca y por lo tanto incrementaría el rendimiento de grano del cultivo. Sin embargo, al mejorar las condiciones de disponibilidad de agua y el nivel de materia orgánica, no habría diferencias entre el uso de fertilizantes granulados como superfosfato triple y líquidos como polifosfato. Por otro lado, destacando el rol de la materia orgánica en

el suelo, una estrategia a mediano- largo plazo para aumentar la eficiencia de recuperación del fertilizante y su tasa de difusión en el suelo, es la implementación de prácticas de manejo tendientes a incrementar el nivel de materia orgánica. Este trabajo contribuye a entender los factores que pueden limitar la eficiencia en el uso de fertilizantes fosforados en este tipo de suelos, la cual quedó determinada en gran parte por el nivel de materia orgánica y la saturación de Ca. Si bien el alcance de este trabajo, por la cantidad de datos no lo permite, sería interesante poder determinar valores umbrales de estas dos variables que contribuyan a la toma de decisiones sobre el tipo de fertilizante más adecuado a utilizar. Por otro lado, sería necesario llevar adelante ensayos a campo que permitan analizar la respuesta a fertilizantes líquidos y evaluar si la logística y el costo del fertilizante y su aplicación representan un beneficio que supere al tradicional uso de fertilizante granular.

REFERENCIAS

- Achat, D.L., Pousse, N., Nicolas, M., Brédoire, F. y Augusto, L. (2016). Soil properties controlling inorganic phosphorus availability: general results from a national forest network and a global compilation of the literature. *Biogeochemistry*, 127, 255–272.
- Bertrand, I., Holloway, R.E., Armstrong, R.D. y McLaughlin, M.J. (2003). Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 41: 61.
- Bertrand, I., McLaughlin, M.J., Holloway, R.E., Armstrong, R.D. y McBeath, T. (2006). Changes in P Bioavailability Induced by the Application of Liquid and Powder Sources of P, N and Zn Fertilizers in Alkaline Soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74, 27-40.
- Carstensen, A., Herdean, A., Schmidt, S.B., Sharma, A., Spetea, C., Pribil, M. y Husted, S. (2018). The Impacts of Phosphorus Deficiency on the Photosynthetic Electron Transport Chain. *Plant Physiology*, 177, 271–284.
- Courchesne, F. y Turmel, M. (2006). Chapter 26: Extractable Al, Fe, Mn, and Si. En: M.R. Carter y E.G. Gregorich. (Eds.). *Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science*.
- Daroub, S.H., Gerakis, A., Ritchie, J.T., Friesen, D.K. y Ryan, J. (2003). Development of a soil-plant phosphorus simulation model for calcareous and weathered tropical soils. *Agricultural Systems*, 76, 1157–1181.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. (2013) *Infostat version 2013 - Software estadístico*. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Du, Z.Y., Wang, Q.H., Liu, F.C., Ma, H.L., Ma, B.Y. y Malhi, S.S. (2013). Movement of Phosphorus in a Calcareous Soil as Affected by Humic Acid. *Pedosphere*, 23, 229-235.
- Erenoğlu, E.B. y Dündar, S. (2020). Application of liquid phosphorus fertilizer improves the availability of phosphorus in calcareous soils. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18, 3615–3626.
- Harrell, D.L. y Wang, J.J. (2006). Fractionation and sorption of inorganic phosphorus in Louisiana calcareous soils. *Soil Science* 171.
- Hedley, M. y McLaughlin, M. (2005). Reactions of Phosphate Fertilizers and By-Products in Soils. En: J.T. Sims, y A.N. Sharpley (Eds.). *Phosphorus: Agriculture and the Environment. American Society of Agronomy. Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*.
- Hettiarachchi, G.M., McLaughlin, M.J., Scheckel, K.G., Chittleborough, D.J., Newville, M., Sutton, S. y Lombi, E. (2008). Evidence for Different Reaction Pathways for Liquid and Granular Micronutrients in a Calcareous Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 72, 98.
- Holford, I.C.R. (1997). Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research*, 35, 227-239.
- Holloway, R., Bertrand, I., Frischke, A. y Brace, D. (2001). Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant and Soil*, 236, 209-219.
- Jalali, M. y Ranjbar, F. (2010). Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma*, 155, 101-106.
- Khan, A., Lu, G., Ayaz, M., Zhang, H., Wang, R., Lv, F., Yang, X., Sun, B. y Zhang, S. (2018). Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 256, 1-11.
- Khatiwada, R., Hettiarachchi, G.M., Mengel, D.B. y Fei, M. (2014). Placement and Source Effects of Phosphate Fertilizers on Phosphorus Availability and Reaction Products in Two Reduced-Till Soils: A Greenhouse Study. *Soil Science*, 179, 141-152.
- Lombi, E., Johnston, C., Armstrong, R. y Holloway, R. (2004a). Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Science Society of America Journal*, 68 (2), 689.
- Lombi, E., McLaughlin, M.J., Johnston, C., Armstrong, R.D. y Holloway, R. (2004b). Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. *Plant and Soil*, 269, 25-34.
- Lombi, E., Scheckel, K.G., Armstrong, R.D., Forrester, S., Cutler, J.N. y Paterson, D. (2006). Speciation and Distribution of Phosphorus in a Fertilized Soil: A Synchrotron-Based Investigation. *Soil Science Society of America Journal*, 70 (6), 2038-2048.

- McBeath, T.M., McLaughlin, M.J., Armstrong, R.D., Bell, M., Bolland, M.D., Conyers, M.K., Holloway, R.E. y Mason, S.D. (2007). Predicting the response of wheat (*Triticum aestivum* L.) to liquid and granular phosphorus fertilisers in Australian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 45 (6), 448-459.
- Murphy, J. y Riley, J.P. (1962). A Single Solution Method for the Determination of Phosphate in in Natural Waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.
- Renneson, M., Vandenberghe, C., Dufey, J., Marcoen, J.M., Bock, L. y Colinet, G. (2015). Degree of phosphorus saturation in agricultural loamy soils with a near-neutral pH. *European Journal of Soil Science*, 66, 33-41.
- Rubio, G., Faggioli, V., Scheiner, J.D. y Gutiérrez-Boem, F.H. (2012). Rhizosphere phosphorus depletion by three crops differing in their phosphorus critical levels. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175, 810-871.
- Schoumans, O.F. (2014). Description of the Phosphorus Sorption and Desorption Processes in Coarse Calcareous Sandy Soils. *Soil Science*, 179, 221-229.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA NRCS.
- Sucunza, F.A., Gutierrez Boem, F.H., Garcia, F.O., Boxler, M. y Rubio, G. (2018). Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy*, 96, 87-95.
- Suñer, L.G. y Galantini, J.A. (2012). Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la Región Sudoeste pampeana. *Ciencia del suelo*, 30, 57-66.
- Syers, J.K., Johnston, A.E. y Curtin, D. (2008). *Efficiency of Soil and Fertilizer Phosphorus: Reconciling Changing Concepts of Soil Phosphorus Chemistry with Agronomic Information*. FAO.
- Von Wandruszka, R. (2006). Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochemical transactions*, 7(1), 6.
- Wang, B., Li, J., Ren, Y., Xin, J., Hao, X., Ma, Y. y Ma, X. (2015). Validation of a soil phosphorus accumulation model in the wheat–maize rotation production areas of China. *Field Crops Research*, 178, 42-48.
- Weeks, J.J. y Hettiarachchi, G.M. (2019). A Review of the Latest in Phosphorus Fertilizer Technology: Possibilities and Pragmatism. *Journal of Environmental Quality*, 48, 1300-1313.
- Yu, X., Keitel, C. y Dijkstra, F.A. (2021). Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. *Global Food Security*, 29, 100545.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T. y Konzak, C.F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415-421.