

# CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA RADICAL DE PLÁNTULAS DE MAÍZ (*Zea mays* L.), Y PAPA (*Solanum tuberosum* L.) Y SU RELACIÓN CON EL MÉTODO DE APLICACIÓN DEL FERTILIZANTE FOSFATADO

M. E. Álvarez-Sánchez<sup>1\*</sup>; J. D. Etchevers<sup>2</sup>; A. Martínez-Garza<sup>3</sup>; J. Z. Castellanos<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México, México. C. P. 56230. Correo-e: ealvares@taurus1.chapingo.mx (\*Autor responsable).

<sup>2</sup>Programa de Edafología, IRENAT. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. C. P. 56230. México.

<sup>3</sup>Estadística, ISEL. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. C. P. 56230. México.

<sup>4</sup>Campo Experimental Bajío-INIFAP. Apartado Postal 112, Celaya, Estado de Guanajuato. C. P. 38000. México.

## RESUMEN

En los días siguientes a la germinación, al agotarse las reservas de la semilla y el crecimiento radical es lento; es posible que ocurra un estrés por déficit de fósforo (P), que repercutiría en el desarrollo posterior de la planta y en su rendimiento. Las especies vegetales difieren en su habilidad para absorber P, la cual depende de la cantidad de P disponible en el suelo y la capacidad del sistema radical para adquirirlo. El objetivo de este trabajo fue comparar, en condiciones controladas, la absorción de P, las características morfológicas radicales (longitud, superficie y densidad) y fisiológicas (intensidad de absorción de P) de plántulas de maíz (cv. Batán-92) y papa (cv. FL795), cuando el fertilizante fosfatado se aplica localizadamente. El suelo utilizado en el experimento fue un Andisol migajón arenoso. Los tratamientos fueron P localizado: a 2, 5 y 8 cm a un lado de la semilla (L), abajo de la semilla a 2, 5 y 8 cm de profundidad (Pr), incorporado (I) y un testigo sin P. Las cantidades de P fueron 81 y 54 mg·kg<sup>-1</sup> de suelo para papa y maíz, respectivamente. La concentración de P en los tratamientos varió de 7.8 a 792 mg·kg<sup>-1</sup>, en función de las formas de aplicación. El maíz se cosechó a los 17 y 30 días, y la papa 34 días después de la germinación. El comportamiento del crecimiento radical del maíz y la papa tratados con P localizado de diferentes maneras, no fue el mismo. La papa desarrolló una relación promedio de densidad radical en la fracción fertilizada con P, con respecto al resto del suelo, 2.2 veces superior a la del maíz, i.e. la papa depende más del P aplicado como fertilizante que el maíz. La acumulación de P y la producción de materia seca en el maíz y la papa fueron función de las características radicales y de la disponibilidad de P en el suelo. La densidad radical total media del maíz fue 2.7 veces superior a la de la papa. Para compensar la menor densidad radical y tasa de alargamiento radical, la papa requirió de mayor P disponible en el suelo que el maíz y desarrolló una mayor intensidad de absorción de este elemento [100 nmol·cm<sup>-1</sup> (34 días) vs. 24 nmol·cm<sup>-1</sup> (30 días), respectivamente].

**PALABRAS CLAVE ADICIONALES:** longitud radical, superficie radical, densidad radical, tasa de alargamiento radical, intensidad de absorción de fósforo.

## ROOT SYSTEMS CHARACTERISTICS OF MAIZE (*Zea mays* L.) AND POTATO (*Solanum tuberosum* L.) SEEDLINGS AND ITS RELATIONSHIP WITH THE PHOSPHATE FERTILIZER APPLICATION METHODS

## SUMMARY

During the days following germination, when the seed's reserves run out and root growth is slow, stress may occur due to a deficit of phosphorus (P), which has repercussions in later development of the plant and its yield. Plant species differ in their ability to absorb P, and this depends on the amount of available P in the soil and the capacity of the root system to acquire it. The objective of this study was to compare, under controlled conditions, the absorption of P, the morphological (length, surface area, and density) and physiological (intensity of P absorption) root characteristics of maize seedlings (cv. Batán-92) and potato (cv. FL795) when phosphate fertilizer is applied locally. The soil used in the experiment was a sandy loam-textured Andisol. The treatments were P localized at 2, 5, and 8 cm to one side of the seed (L), below the seed at 2, 5, and 8 cm deep (Pr), incorporated (I), and a control without P. The amounts of P were 81 and 54 mg·kg<sup>-1</sup>, in function of the forms of application. The maize was harvested at 17 and 30 days after germination, and potato was harvested 34 days after germination. The growth behavior of the maize and potato roots treated with P localized in the different forms was not the same. Potato developed an average ratio of radical density in the fraction fertilized with P, compared to the rest of the soil, 2.2 times higher than maize, i.e. potato depends more on P applied as a fertilizer than maize. The accumulation of P and the production of dry matter in maize and potato were in function of the root characteristics and the availability of P in the soil. The total mean root density in maize was 2.7 times higher than in potato. To compensate the lower root density and rate of root lengthening, potato required more available P in the soil than maize and developed a greater intensity of absorption of this element [100 nmol·cm<sup>-1</sup> (34 days) vs. 24 nmol·cm<sup>-1</sup> (30 days), respectively].

**ADDITIONAL KEY WORDS:** root length, root surface area, root density, rate of root elongation, intensity of phosphorus absorption.

## INTRODUCCIÓN

El escaso desarrollo de raíces que ocurre en los días siguientes a la germinación (Costigan, 1987) y el movimiento casi exclusivamente por difusión del P en el suelo (Barber, 1994), hacen suponer que la nutrición de las plantas con P no es óptima durante el periodo inmediato al agotarse las reservas seminales. El interés por la nutrición de las plantas con P en este periodo, se debe a que promueve el desarrollo temprano de las raíces (Barber, 1995) y el crecimiento radical se relaciona con el de la parte aérea (Lu y Miller, 1993). Se espera que el crecimiento temprano de las raíces tenga un efecto en el desarrollo posterior de la planta. Por consiguiente, es altamente deseable contar con un abastecimiento adecuado de P durante los primeros días de vida del vegetal. La importancia relativa del fenómeno ha sido escasamente estudiada en especies con hábitos contrastantes de crecimiento radical, como es el caso de maíz y papa.

Para contrarrestar el escaso abastecimiento de P que tiene la planta durante dicho período (Costigan, 1984, 1987), en particular, en los suelos de origen volcánico (Vanderdeelen *et al.*, 1973), es común que el fertilizante fosfatado se aplique en forma localizada en el momento de la siembra. Al colocar el fertilizante en la cercanía de la semilla, se incrementa la posibilidad de contacto con las raíces y se aumenta la concentración de P disponible en un volumen reducido de suelo, lo cual hace mayor el potencial de difusión de este elemento y las posibilidades de absorción por la planta (Barber y Kovar, 1985; Sleight *et al.*, 1984). La eficiencia con que las plantas absorben el P depende tanto de las características radicales de la especie (longitud, superficie, densidad e intensidad de absorción) como de algunas características del suelo (concentración de P disponible y difusión) (Noordwijk, 1983; Noordwijk y Willigen, 1979; Rodríguez, 1993). A este respecto, Rodríguez (1993) y Rodríguez *et al.* (2001) relacionaron el P absorbido por algunos cultivos con distinta densidad radical, con un índice químico de disponibilidad de P del suelo (P-Olsen), para establecer un indicador de eficiencia de absorción de P por las plantas (Ec). El Ec les permitió clasificar algunos cultivos en tres grupos discretos: a) tubérculos, b) remolacha, leguminosas de grano y colza, y c) cereales. El Ec de estos grupos resultó ser 1.0, 1.3 y 1.7 kg de P absorbible por cada miligramo por kilogramo de suelo de P-Olsen, respectivamente. Estos valores indican que los cereales son los cultivos con mayor eficiencia para absorber P desde el suelo y, los tubérculos, con la menor. El intervalo de densidad radical reportado para estos tres grupos de cultivos son 1 a 2, 2 a 3 y 4 a 5  $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , respectivamente (Rodríguez, 1993).

Los modelos diseñados para explicar la absorción de P por los cultivos han seleccionado como una de las principales variables explicativas del fenómeno, a la proporción de contacto de la raíz con el fertilizante (Anghinoni y Barber, 1980a; Anghinoni y Barber, 1980b;

Borkert y Barber, 1985; Costigan, 1987). Tal decisión se explica por el efecto benéfico que se logra al colocar el fertilizante fosfatado en una banda cercana a la semilla; ello favorece el contacto físico con las raíces activas, el cual sería más importante que el logrado por el aumento de la disponibilidad de P. No obstante, la profundidad de estos estudios, no es clara la relación que se establece entre las características radicales al inicio del desarrollo de los cultivos, con la localización del P.

El objetivo del presente estudio fue comparar la absorción de P, las características morfológicas radicales (longitud, superficie y densidad) y fisiológicas (intensidad de absorción) de plántulas de maíz y papa, cuando el fertilizante fosfatado es colocado en el suelo de diferente manera (lateralmente o en profundidad).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se condujo en un invernadero localizado a una altitud de 2241 m, latitud 19° 30' norte y longitud 98° 51' oeste, entre los meses de agosto a octubre (Álvarez-Sánchez *et al.*, 2001). Se prepararon dos series de cajas (dimensiones de 30 x 30 x 11.5 cm) que se llenaron con 7 y 5.8 kg, de un Andisol (0 a 20 cm) de textura franco arenosa, secado previamente al aire y tamizado (5 mm), respectivamente. El análisis de suelo arrojó 7.8  $\text{mg kg}^{-1}$  P-Olsen, valor considerado intermedio para cultivos de cereales, pero bajo para papas, y pH 6.4. La primera serie se sembró con maíz (*Zea mays*) cv. Batán 92 y, la segunda, con papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. FL795.

Se ensayaron tres tratamientos de colocación del fertilizante fosfatado (Cuadro 1). El lateral (L), que consistió en mezclar el producto con un volumen de suelo que luego se colocó a 2, 5 u 8 cm a un costado de la semilla (L-2, L-5 y L-8, respectivamente). El profundo (Pr) o abajo de la semilla, aquí el fertilizante se mezcló con un volumen de suelo retirado previamente de la caja (2 cm de espesor por el área de ésta), que luego se localizó de acuerdo con el diseño de tratamientos: a 2, 5 y 8 cm abajo de la semilla (Pr-2, Pr-5 y Pr-8, respectivamente); la mezcla se esparció homogéneamente en una capa de 2 cm de espesor sobre toda el área de la caja. El incorporado (I), que consistió en mezclar íntimamente el fertilizante con el volumen de suelo correspondiente a los primeros 10 cm de la caja. Las semillas de maíz y papa en todos los casos, se sembraron a 2 cm de profundidad. Se cultivó una planta por maceta. La cantidad de P que se aplicó a los cultivos de papa y maíz, fue 81 y 54  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectivamente. Se usó superfosfato simple finamente molido (60 % había pasado por la malla 100) como fuente de P. Los volúmenes de suelo tratados con el fertilizante fosfatado no fueron los mismos en cada caso, por lo que las concentraciones de P en esos volúmenes resultaron distintas. Como referencia se estableció un testigo sin P. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente

al azar. El número de repeticiones empleadas fueron tres y seis, para maíz y papa, respectivamente. En el Cuadro 1 se indican los valores de P-Olsen extraído (Olsen y Sommers, 1982) después de la aplicación del fertilizante. Otros detalles de este experimento se describen en el trabajo de Álvarez-Sánchez *et al.* (2001).

**CUADRO 1. Métodos de aplicación y concentración de P en el suelo en maíz y papa.**

Método de Aplicación <sup>2</sup>	Volumen de suelo fertilizado		P Extractable (P-Olsen)	
	Maíz <sup>1</sup> ——%——	Papa <sup>1</sup> ——%——	Maíz ——mg kg <sup>-1</sup> ——	Papa
Testigo	0	0	7.8	7.8
Incorporado (I)	40.8	48.1	35	79
L-2	5.4	6.2	240	480
L-5	3.9	4.9	343	675
L-8	2.6	3.3	445	792
Pr-2	12.3	15.5	120	238
Pr-5	12.3	15.5	120	238
Pr-8	12.3	15.5	120	238

<sup>2</sup> L-2, 5 y 8 y Pr-2, 5, 8, lateral y profundo a 2, 5 y 8 cm de la semilla, respectivamente.

<sup>1</sup> P aplicado, 570 mg y 310 mg maceta<sup>-1</sup> de P para papa y maíz, respectivamente.

Se evaluaron variables de respuesta correspondientes a la parte aérea y a la raíz. El maíz se cosechó a los 17 y 30 días y la papa a los 34 días, después de la germinación. En cada cosecha se separó la parte aérea de la raíz. A su vez las raíces que crecieron en la fracción de suelo fertilizada con P se cosecharon y se mantuvieron separadas de aquellas que se desarrollaron en el suelo sin fertilizar. Se determinó el peso fresco de las raíces después de remover con agua el suelo adherido, así como el radio medio y la superficie radical, conforme a la metodología descrita por Schenk y Barber (1979). Para estimar la longitud se empleó el procedimiento de Newman (1966). La densidad radical se estimó multiplicando longitud por la densidad aparente del suelo ( $1.054 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) y dividiendo por el peso seco del volumen de suelo de donde se extrajo la masa de raíz. La tasa de alargamiento radical se calculó dividiendo la longitud entre el peso seco de la raíz y el período transcurrido entre la germinación y la cosecha. La producción de materia seca, los porcentajes y los contenidos de P fueron medidos y reportados por Álvarez-Sánchez *et al.* (2001). La concentración de P se midió en un digerido (mezcla de  $\text{HClO}_4$  72 % y  $\text{HNO}_3$  concentrado, relación 1:2) mediante el método del fosfovanadomolibdato (Jackson, 1970).

La intensidad de absorción de P correspondiente a la zona fertilizada con P se calculó restando al P acumulado por la planta el absorbido por el testigo sin P y éste se expresó en  $\text{nmol}\cdot\text{cm}^{-1}$  de longitud radical. En el caso del maíz, la intensidad de absorción se calculó para el período

de 0 a 17 y de 17 a 30 días después de la germinación y para la papa de 0 a 34 días (Römer *et al.*, 1988).

Los datos se sometieron a análisis de varianza y a una prueba de diferencia mínima significativa (DMS) entre medias según Tukey (Steel y Torrie, 1960), con una  $P \leq 0.05$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Crecimiento radical

Las raíces del maíz que se cosecharon en el volumen de suelo fertilizado con P, 17 días después de la germinación, tuvieron longitud, superficie y densidad medias 1.9, 1.4 y 3.2 veces mayores, respectivamente, que las que se encontraron en la fracción del suelo sin fertilizar (Cuadro 2). Estas diferencias muestran el efecto positivo que tuvo el P en el desarrollo temprano de las raíces. Las raíces de la fracción fertilizada con P se caracterizaron por presentar mayor longitud y superficie radical, pero menor radio ( $2.5 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ) que las de la zona sin fertilizar con P ( $3.4 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ). La adición de P no sólo tuvo un efecto en el crecimiento radical, sino también en su tasa de alargamiento, por la producción de raíces más finas. En promedio, las raíces que crecieron en las fracciones de suelo fertilizadas con P, lo hicieron al doble de la velocidad de aquéllas en la zona sin P.

A los 30 días, el crecimiento radical del maíz también fue mayor en las fracciones de suelo que recibieron P, aunque las diferencias fueron menores que las observadas a los 17 días (Cuadro 2). Para este período la longitud y la densidad radicales en la fracción de suelo fertilizada con P, fueron 1.6 y 1.9 veces mayor que en aquellas que no recibieron P, mientras que la superficie radical se mantuvo casi sin cambio en relación con la primera cosecha (1.3 veces superior a la que creció sin P). Asimismo, el radio promedio de la raíz en los tratamientos con P no cambió ( $2.5 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ) con relación al radio radical en la primera cosecha. Las raíces que crecieron en la zona fertilizada con P siguieron siendo más finas ( $2.5 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ) que las que lo hicieron en el resto del suelo ( $3.1 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ). La mayor producción de raíces finas en la fracción del suelo fertilizada con P, es el mecanismo que la planta desarrolla para abastecerse de P, ya que así incrementa la superficie radical hacia la cual el P puede difundir y ser absorbido. Esto no necesariamente significa que se incremente la absorción de P, ya que este fenómeno también está influenciado por la demanda de P ejercida por la parte aérea de la planta (Barber, 1980).

La tasa de alargamiento de las raíces en la zona fertilizada con P, en la cosecha hecha a los 30 días, también fue mayor 1.6 veces que la que no recibió P; sin embargo, esta tasa fue menor que la tasa promedio de crecimiento de raíz correspondiente al primer muestreo ( $682 \text{ cm}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$  y  $706 \text{ cm}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$ , respectivamente). En contraste, la tasa de

CUADRO 2. Efecto del método de aplicación de P en las características radicales de maíz (17 y 30 días después de la germinación).

Tratamientos <sup>z</sup>	Longitud Radical (m·g <sup>-1</sup> )		Superficie Radical (dm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )		Densidad Radical (cm·cm <sup>-3</sup> )		Radio de la Raíz (cm·10 <sup>-2</sup> )		Tasa de Alargamiento Radical <sup>w</sup> (m·planta <sup>-1</sup> )		Longitud Radical Total (μmol)	Acumulado de P (μmol)	Intensidad de Absorción de P <sup>y</sup> (nmol·cm <sup>-1</sup> )
	-P <sup>x</sup>	+P <sup>x</sup>	-P	+P	-P	+P	-P	+P	-P	+P			
17 días													
Testigo (T)	54	—	10.20	—	0.31	—	3.08	—	315	—	20.4	37.9	—
	77	63.2	14.26	11.96	0.32	0.49	2.95	3.03	455	372	26.2	58.9	8.0
Incorporado (I)													
Lateral (L)													
L-2	53	157.8	10.83	20.73	0.21	1.44	3.26	2.10	314	928	18.6	71.0	17.8
L-5	46	140.9	9.93	19.10	0.23	1.17	3.53	2.19	268	829	17.5	73.4	20.3
L-8	53	117.5	10.84	14.67	0.21	0.72	3.29	3.41	310	493	14.9	55.6	11.9
Media	51	138.7	10.54	18.17	0.22	1.11	3.36	2.57	297	750	17.0	66.7	16.7
Profundo (Pr)													
Pr-2	47	144.5	9.99	18.54	0.22	0.90	3.47	2.07	274	850	20.3	69.2	15.4
Pr-5	54	132.5	11.00	20.15	0.27	0.95	3.38	2.42	315	779	23.5	70.8	14.0
Pr-8	42	117.5	9.47	15.94	0.25	0.85	3.58	2.31	248	691	21.4	75.3	17.5
Media	47	131.5	10.15	18.21	0.24	0.90	3.48	2.27	279	773	21.7	71.8	15.6
Prob. F	0.024	0.007	0.003	0.049	0.160	0.036	0.31	0.087	0.024	0.045	0.044	0.14	0.77
DMS 1 <sup>y</sup>	18	57.0	1.95	7.14	0.099	0.632	0.574	1.02	105.1	359.6	6.4	27.7	15.7
DMS 2	15	46.6	1.59	5.83	0.081	0.516	0.469	0.83	85.85	293.6	5.2	22.6	12.8
DMS 3	10	32.9	1.12	4.12	0.057	0.365	0.331	0.59	60.70	207.6	3.7	16.0	9.0
DMS 4	29	93.1	3.18	11.66	0.162	1.031	0.94	1.62	171.7	572.5	10.4	45.3	24.9
30 días													
Testigo (T)	61	—	10.79	—	1.4	—	2.85	—	469.1	—	93.9	195.6	—
	55	95.2	10.01	13.93	2.1	3.6	3.02	2.34	418.9	732.3	182.1	372.6	9.7
Incorporado (I)													
Lateral (L)													
L-2	49.6	95.0	10.65	13.84	2.0	4.8	3.44	2.34	381.1	730.7	142.6	608.9	28.9
L-5	47.8	88.8	9.92	13.26	2.7	4.8	3.30	2.41	368.0	682.7	186.4	709.2	27.6
L-8	61.4	101.0	10.77	15.32	3.8	7.0	2.79	2.42	472.1	776.7	256.4	574.3	14.8
Media	53.0	94.9	10.45	14.14	2.8	5.6	3.18	2.39	407.1	730.0	195.1	630.8	23.8
Profundo (Pr)													
Pr-2	63.6	86.2	11.55	13.12	3.2	4.9	2.89	2.45	489.5	663.4	227.7	733.7	23.6
Pr-5	51.5	87.3	10.88	13.49	2.1	4.8	3.39	2.48	395.7	671.4	161.2	737.3	33.6
Pr-8	56.6	66.9	11.22	11.82	1.8	2.9	3.16	2.85	435.2	514.5	127.4	487.8	22.9
Media	57.2	80.1	11.22	12.81	2.4	4.2	3.15	2.59	440.1	616.4	172.1	652.9	26.7
Prob. F	0.223	0.046	0.219	0.05	0.012	0.003	0.057	0.11	0.223	0.23	0.011	0.001	0.013
DMS 1 <sup>y</sup>	14.2	25.5	1.32	2.53	1.21	2.2	0.475	0.36	109.2	203.0	80.3	229.6	13.1
DMS 2	11.6	20.9	1.08	2.07	0.98	1.8	0.388	0.295	89.2	165.8	65.6	187.5	10.7
DMS 3	82.0	14.8	0.76	1.46	0.696	1.28	0.274	0.208	63.1	117.2	46.4	132.6	7.6
DMS 4	23.2	41.72	2.16	4.13	1.97	3.61	0.78	0.57	178.4	323.2	131.1	375.0	20.9

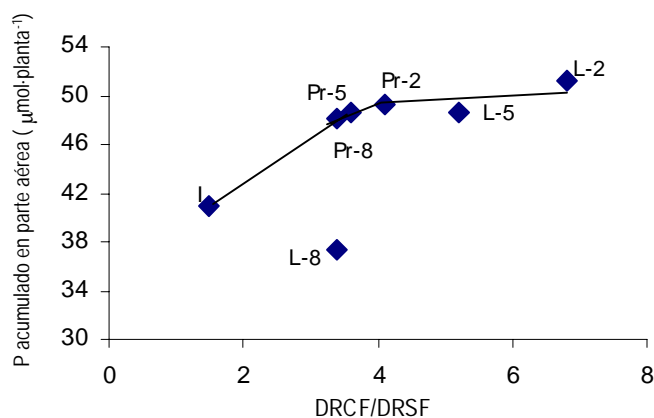
<sup>z</sup> L-2, L-5, L-8 y Pr-2, Pr-5, Pr-8, aplicación lateral y profunda a 2, 5 y 8 cm de la semilla, respectivamente.<sup>y</sup> DMS1 para comparar T vs. I, DMS2 para comparar T o I vs. L o Pr, DMS3 para comparar L vs. Pr, DMS4 para cualquier comparación entre tratamientos.<sup>x</sup> -P, +P, sin P y con P, respectivamente.<sup>w</sup> Calculado como se señaló en Materiales y Métodos.<sup>v</sup> Del volumen fertilizado (P tot acumulado-P tot acum. por testigo) / longitud radical total.



alargamiento radical en las fracciones de suelo sin fertilización fosfatada se incrementó de  $312 \text{ cm} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$  a los 17 días, a  $423 \text{ cm} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$  a los 30 días. Resultados similares fueron obtenidos por Zhang y Barber (1992) en maíz en una etapa semejante de crecimiento.

En papa, la longitud, la superficie y la densidad radicales media, fueron 1.6, 1.2 y 4.1 veces mayor, respectivamente en las fracciones de suelo fertilizadas con P, que en la fracción sin fertilización fosfatada (Cuadro 3). Los dos primeros valores fueron prácticamente iguales que en el caso del maíz, sin embargo, la proporción de la densidad radical en papa fue más del doble que en ese cultivo. Las raíces de la papa que crecieron en la fracción de suelo fertilizada se caracterizaron por ser más finas (radio promedio de  $2.4 \times 10^{-2}$  vs.  $3.2 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ) y lo hicieron a una velocidad promedio 1.6 veces mayor que aquéllas que crecieron en la zona sin fertilizar con P (Cuadro 3).

El comportamiento del crecimiento radical exhibido por el maíz y la papa, en las fracciones de suelo fertilizado y sin fertilizar con P, no fue el mismo. Una vez que las raíces del maíz (30 días después de la germinación) alcanzaron la banda del fertilizante, el crecimiento radical se estimuló en las fracciones con y sin P. En papas, una vez que las raíces alcanzaron la banda del fertilizante, aquellas que crecieron en la fracción sin P, lo hicieron a una velocidad incluso significativamente menor que las raíces del tratamiento testigo que no recibió fertilización fosfatada. La relación de la densidad radical de la papa en el volumen fertilizado con P con respecto a aquella observada en el volumen sin fertilizar, fue muy superior a la del maíz (4.1 vs. 1.9, respectivamente), indicando con esto que la papa tiene una mayor dependencia del P aplicado como fertilizante que el maíz.

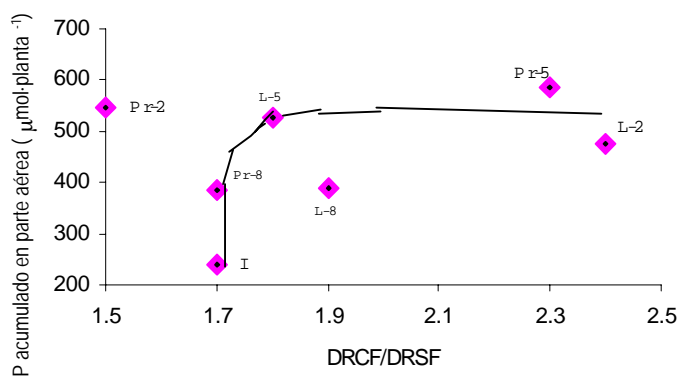


**Figura 1.** Relación entre el grado de proliferación de raíces (DRCF/DRSF) y el P acumulado en la parte aérea del maíz a 17 días de la germinación (DRCF y DRSF: densidad radical en el volumen de suelos con y sin fertilizante fosfatado, respectivamente). ♦ L-2, 5 y 8, aplicación lateral y profunda a 2, 5 y 8 cm de la semilla, respectivamente (línea trazada corresponde a la tendencia de los datos).

## Relación entre el crecimiento radical y el P acumulado por la planta

El grado de proliferación de raíces, es decir, la relación densidad radical encontrada en idéntico volumen de suelo con y sin P, da una idea del estímulo que tuvo la adición de P en el crecimiento de este órgano. El grado de proliferación se asoció con la acumulación de P en la parte aérea de la planta. A los 17 días, la máxima acumulación de P en la parte aérea del maíz se alcanzó con grados de proliferación 6.6 y 4.0 (Figura 1), logrados con la colocación del fertilizante en L-2 y Pr-2, respectivamente. En L-2 la fracción del volumen de suelo fertilizado con P fue menor que en Pr-2 (5.4 vs. 12.3 %), pero la concentración de P fue mayor (equivalente a  $240$  vs.  $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Estos datos muestran que, a pesar que sólo una fracción del suelo se fertilizó con P (esto es, que sólo una parte de todo el sistema radical del maíz creció en la fracción fertilizada), la combinación de P disponible y grado de proliferación, produjeron un incremento en el P absorbido por la planta. A los 30 días, hubo una interacción entre el grado de proliferación con la distancia y el método de localización (Figura 2). En Pr-2 la proliferación de raíces de este cultivo fue escasa (1.5), pero con ese tratamiento se logró casi la máxima acumulación de P en la parte aérea. La explicación pudiera encontrarse en que el fertilizante fosfatado, aunque favoreció escasamente el desarrollo de las raíces de maíz en la fracción de suelo fertilizada, produjo un aumento de éstas en la fracción sin fertilizar, lo que favoreció la explotación del P nativo del suelo.

En la papa, la mayor acumulación de P (parte aérea+tubérculo) se alcanzó cuando el grado de proliferación fue 3.5 (Figura 3). Esto se logró con la colocación en Pr-2, donde 90 % del P acumulado por la planta fue derivado del fertilizante, esto es, casi todo P provino del fertilizante aplicado (Álvarez-Sánchez *et al.*, 2001).

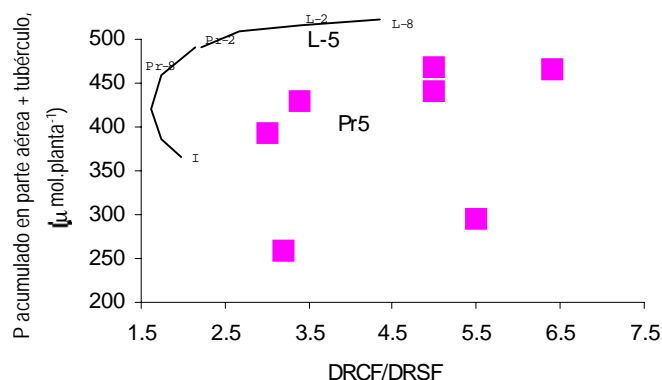


**Figura 2.** Relación entre el grado de proliferación de raíces (DRCF/DRSF) y el P acumulado en la parte aérea del maíz a 30 días de la germinación (DRCF y DRSF: densidad radical en el volumen de suelo con y sin fertilizante fosfatado, respectivamente). ♦ L-2, 5 y 8, aplicación lateral y profunda a 2, 5 y 8 cm de la semilla, respectivamente (línea trazada corresponde a la tendencia de los datos).

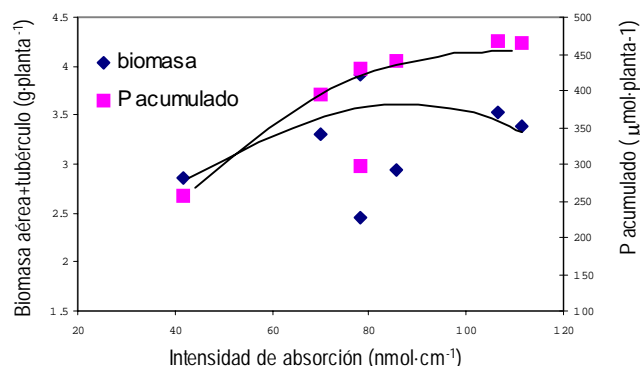
CUADRO 3. Efecto del método de aplicación de P en las características radicales de papa (34 días después de la germinación).

Tratamiento <sup>z</sup>	Longitud Radical (m·g <sup>-1</sup> )		Superficie Radical (dm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )		Densidad Radical (cm·cm <sup>-3</sup> )		Radio de la Raíz (cm·10 <sup>-2</sup> )		Tasa de Alargamiento Radical <sup>w</sup> (cm·g <sup>-1</sup> ·día <sup>-1</sup> )		Longitud Radical Total (m·planta <sup>-1</sup> )	Total Acumulado de P (μmol)	Intensidad de Absorción de P <sup>v</sup> (nmol·cm <sup>-1</sup> )
	-P <sup>x</sup>	+P <sup>x</sup>	-P	+P	-P	+P	-P	+P	-P	+P			
Testigo (T)	80.1	—	13.2	—	0.4	—	2.6	—	236	—	19.6	51.1	—
Incorporado (I)	70.9	68.6	14.1	11.5	0.6	1.9	3.2	2.7	209	202	67.8	331.5	41.8
Lateral (L)													
L-2	48.5	110.7	9.7	15.4	0.7	3.5	3.2	2.2	143	326	48.0	559.4	106.5
L-5	59.0	124.0	11.3	16.4	0.9	4.5	3.1	2.2	173	365	56.3	540.4	85.7
L-8	48.3	102.2	9.9	15.7	0.7	4.5	3.3	2.5	142	301	45.9	551.3	111.2
Media	51.9	112.3	10.3	15.8	0.8	4.2	3.2	2.3	153	331	50.1	550.4	101.1
Profundo (Pr)													
Pr-2	54.2	100.3	10.2	13.5	0.8	2.7	3.0	2.1	159	295	58.5	511.3	78.4
Pr-5	47.3	114.5	9.5	15.6	0.4	2.2	3.2	2.2	139	337	38.4	361.2	78.4
Pr-8	53.8	83.8	9.9	12.5	0.9	2.7	3.0	2.4	158	247	62.2	486.6	70.2
Media	51.8	99.5	9.9	13.9	0.7	2.5	3.1	2.2	152	293	53.0	453.1	75.7
Prob. F	0.0001	0.0002	0.0001	0.0047	0.021	0.0001	0.0005	0.004	0.0001	0.0005	0.0009	0.0001	0.0001
DMS1 <sup>y</sup>	11.6	23.0	1.7	2.7	0.32	1.20	0.27	0.30	34.0	68.7	20.7	184.5	22.8
DMS2	9.4	18.7	1.4	2.2	0.26	0.98	0.22	0.24	27.8	56.1	16.9	150.6	18.6
DMS3	6.7	13.3	0.98	1.6	0.185	0.69	0.15	0.17	19.6	39.6	12.0	106.5	13.2
DMS4	18.3	36.3	2.7	4.3	0.506	1.90	0.42	0.46	53.8	105.7	32.8	291.8	35.0

<sup>z</sup> L-2, L-5, L-8 y Pr-2, Pr-5, Pr-8, aplicación lateral y profunda a 2, 5 y 8 cm de la semilla, respectivamente.  
<sup>y</sup> DMS1 para comparar T vs. I, DMS2 para comparar T o I vs. L o Pr, DMS3 para comparar L vs. Pr, DMS4 para cualquier comparación entre tratamientos.  
<sup>x</sup> -P, +P: sin P y con P, respectivamente.  
<sup>w</sup> Calculado como se señaló en Materiales y Métodos.  
<sup>v</sup> Del volumen fertilizado( P tot acumulado-P tot acum. por testigo)/longitud radical total.



**Figura 3.** Relación entre el grado de proliferación de raíces (DRCF/DRSF) y el P acumulado en la parte aérea+tubérculo por papa, 34 días después de la germinación (DRCF y DRSF: densidad radical en el volumen de suelo con y sin fósforo, respectivamente). ■ L-2, 5 y 8; Pr-2, 5 y 8, aplicación lateral y profunda a 2, 5 y 8 cm de la semilla, respectivamente (línea trazada corresponde a la tendencia de los datos).



**Figura 5.** Relación entre la la intensidad de absorción de P con la biomasa y el P acumulado (parte aérea + tubérculo) por la papa, 34 días después de la germinación (líneas trazadas corresponden a la tendencia de los datos).

Al relacionar la intensidad de absorción de P que tuvieron las raíces de la fracción de suelo fertilizada con P, con el peso seco y el P acumulado por maíz, 30 días después de la germinación, se observó que las máximas producciones de peso seco de la parte aérea (aproximadamente  $6.0 \text{ g.planta}^{-1}$ ) se consiguieron cuando la intensidad de absorción de P fue  $24 \text{ nmol.cm}^{-1}$  [30días] (Figura 4), valor que alcanzó con una disponibilidad de P-Olsen de  $120 \text{ mg.kg}^{-1}$ . En contraste, la papa presentó intensidades de absorción aproximadamente cuatro veces superiores a las del maíz [ $100 \text{ nmol.cm}^{-1}$  (34días)] (Figura 5). Para alcanzar esos valores fue necesario que la disponibilidad de P-Olsen fuese de aproximadamente  $220 \text{ mg.kg}^{-1}$ .

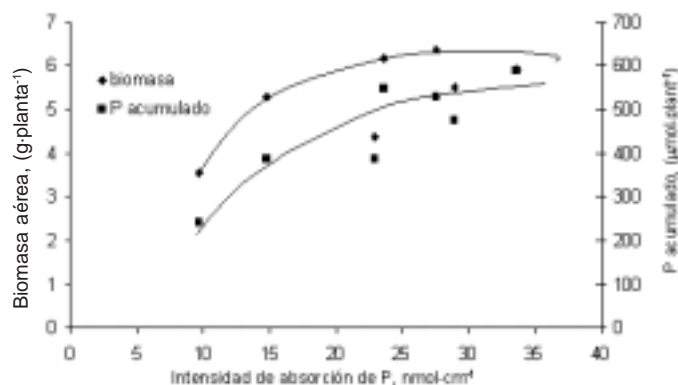
La máxima producción de peso seco del maíz se obtuvo con una disponibilidad de este elemento en el suelo,

dos veces inferior a la que se necesitó para alcanzar máxima producción en la papa. Esta menor necesidad de disponibilidad de P en el suelo que tiene el maíz se explica, por una parte, por el menor requerimiento interno que tiene este cultivo durante la etapa inicial ( $2.3 \text{ g.kg}^{-1} \text{ P}$ ), en contraste con el de la papa ( $3.5 \text{ g.kg}^{-1} \text{ P}$ ) (Álvarez-Sánchez *et al.*, 2001) y, por otra parte, por el mayor desarrollo radical que muestra el primer cultivo. En promedio, la densidad radical total del maíz (sumatoria ponderada de la densidades medidas en las fracciones de suelo fertilizadas y sin fertilizar con P) fue superior ( $2.8 \text{ cm.cm}^{-3}$ ) a la de la papa ( $1.0 \text{ cm.cm}^{-3}$ ) para el mismo período de crecimiento. Esta condición hace que el maíz tenga eficiencias de absorción de P (esto es,  $\mu\text{moles}$  de P que un cultivo puede absorber por cada  $\text{mg.kg}^{-1}$  de P-Olsen en el suelo) mayores que la papa, aunque la intensidad de absorción es menor. Para compensar el escaso desarrollo radical, la papa generó una mayor intensidad de absorción que el maíz, como se explicó anteriormente, pero esas intensidades de absorción sólo se pueden alcanzar cuando se cuenta con mayores concentraciones de P disponible en el suelo.

Los resultados anteriores permiten entender mejor los mecanismos que el maíz y la papa, cultivos con sistemas radicales contrastantes, desarrollan para allegarse P durante la etapa inicial de desarrollo.

## CONCLUSIONES

El comportamiento del crecimiento radical temprano del maíz y de la papa no fue el mismo cuando el fertilizante fosfatado se localizó en diferentes maneras con respecto a la semilla. La papa desarrolló relaciones de densidad radical en la fracción de suelo fertilizada con P con respecto al resto del suelo sin fertilizar, superiores a la del maíz, lo cual muestra que el primer cultivo tiene una mayor dependencia del P aplicado como fertilizante. Las



**Figura 4.** Relación entre la intensidad de absorción de P con la biomasa y P acumulado 4 en la parte aérea por maíz a los 30 días después de la germinación (líneas trazadas corresponden a la tendencia de los datos).

relaciones de crecimiento radical, en términos de longitud y superficie, entre las mismas condiciones anteriores, fueron similares en ambos cultivos.

La acumulación de P y la producción de materia seca en el maíz y en la papa fueron función de las características radicales específicas y de la disponibilidad de P en el suelo. La densidad radical total media del maíz fue 2.7 veces superior a la de la papa. Este último compensó su menor crecimiento radical desarrollando una mayor intensidad de absorción de este elemento [ $100 \text{ nmol}\cdot\text{cm}^{-1}$  (34 días vs.  $24 \text{ nmol}\cdot\text{cm}^{-1}$  (30 días), respectivamente] pero, condicionada a una alta concentración de P disponible en el suelo. Si estas condiciones no son provistas el crecimiento inicial de la papa se ve disminuido en mayor proporción que el maíz.

### LITERATURA CITADA

- ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, E.; ETCHEVERS B., J. D.; ORTIZ C., J.; NÚÑEZ ESCOBAR, R.; MARTÍNEZ G., A.; CASTELLANOS, J. Z. 2001. Phosphorus nutrition of potato and maize seedlings. *Terra* 19(1): 55-65.
- ANGHINONI, I.; BARBER, S. A. 1980a. Predicting the most efficient P placement for corn. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44(5): 1016-1020.
- ANGHINONI, I.; BARBER, S. A. 1980b. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. *Agron. J.* 72(4): 685-688.
- BARBER, S. A. 1980. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants, pp. 95-99. *In: The Role of Phosphorus in Agriculture*. F. E. Khasawneh; E. C. Sample (eds.). Ed. Am. Soc. of Agron.
- BARBER, S. A. 1994. Root growth and nutrient uptake, pp. 95-99. *In: Physiology and Determination of Crop Yield*. K.J. Boote; J.M. Bennet; G.M. Paulsen (eds.). Ed. ASA, CSSA, SSSA, Madison, USA.
- BARBER, S. A. 1995. *Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach*. Ed. John Wiley and Sons, Inc. New York, USA. 414 p.
- BARBER, S. A.; KOVAR, J. L. 1985. Principles of applying phosphorus fertilizer for greatest efficiency. *J. Fertilizer Issues* 2(1): 91-94.
- BORKERT, C. M.; BARBER, S. A. 1985. Predicting the most efficient phosphorus placement for soybeans. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49(4): 901-904.
- COSTIGAN, P. A. 1984. The effects of placing small amounts of phosphate fertilizer close to the seed on growth and nutrient concentrations of lettuce. *Plant and Soil* 79(2): 191-201.
- COSTIGAN, P. A. 1987. A model to describe the pattern of availability of broadcast phosphorus fertilizer during the growth of a crop. *Plant and Soil* 101(2): 281-285.
- JACKSON, M. L. 1970. *Análisis Químico de Suelos*. Ed. Omega, S. A., Barcelona, España.
- LU, S.; MILLER, M. H. 1993. Determination of the most efficient phosphorus placement for field-grown maize in early growth stages. *Can. J. Soil Sci.* 73(3): 349-358.
- NEWMAN, E.I. 1966. A method to estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* 3(1): 139-145.
- NOORDWIJK, M. VAN. 1983. Functional interpretation of root densities in the field for nutrient and water uptake, pp. 207-226. *In: International Symposium Gumpenstein 1982. Wulzelkologie und ihre nutzanwendung*. Bundesanstalt Gumpenstein, Irdning.
- NOORDWIJK, M. VAN; WILLIGEN, P. 1979. Calculation of the root density required for growth in soils of different P status, pp. 381-390. *In: The Soil-Root Interface*. J. L. Jarley; R. S. Russell (eds.). Ed. Academic Press, London, UK.
- OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E. 1982. Phosphorus, pp. 403-430. *In: Methods of Soil Analysis. Agronomy part 2, 2<sup>nd</sup>*: A. L. Page; R. H. Miller; D. R. Keeney (eds.). Ed. ASA-SSSA, Madison, Wis., USA.
- RODRÍGUEZ, S. J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, Chile. 361 p.
- RODRÍGUEZ S., J.; PINOCHET D., T.; MATUS B., F. 2001. Fertilización de los cultivos. Ed. Lom. Santiago de Chile. de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 117 p.
- RÖMER, W.; AUGUSTIN, J.; SCHILLING, G. 1988. The relationship between phosphate absorption and root length in nine wheat cultivars. *Plant and Soil* 111(2): 199-201.
- SCHENK, H. K.; BARBER, S. A. 1979. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43(5): 880-883.
- SLEIGHT, D. M.; SANDER, D. H.; PETERSON, G. A. 1984. Effect of fertilizer phosphorus placement on the availability of phosphorus. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48(2): 336-340.
- STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. 1960. *Principles and Procedures of Statistics*. McGraw-Hill Book Company. New York, USA. 481 p.
- VANDERDEELEN, J.; PINO, I.; BAERT, L. 1973. Kinetic of phosphate adsorption in a soil derived from volcanic ash. *Turrialba* 23(3): 291-296.
- ZHANG, J.; BARBER, S. A. 1992. Maize root distribution between phosphorus-fertilized and unfertilized soil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 56(3): 819-822.