

Efecto del fosfito sobre el crecimiento y la concentración foliar de nutrientes de *Solanum lycopersicum* L.

Effect of phosphite on growth and foliar nutrient concentration of *Solanum lycopersicum* L.

Anabel Coello Pérez ^{1,2}, Eduardo Antonio Chinae Correa ^{1,3}, Miguel Corbella Tena ^{1,4}.

¹Universidad de La Laguna (ULL). La Laguna, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería (Sección de Ingeniería Agraria). Santa Cruz de Tenerife, España. ²  abcpl1996@gmail.com; ³  echinea@ull.edu.es; ⁴  mcorbell@ull.edu.es



<https://doi.org/10.15446/acag.v71n3.105925>

2022 | 71-3 p 295-302 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2021-11-21 Acep.: 2023-05-02

Resumen

El fosfito (PO_3^3 ; Phi) es una forma reducida del fosfato (PO_4^3 ; Pi) y es utilizado en agricultura como fungicida, fertilizante y bioestimulador. En este estudio se valora la capacidad fertilizante del Phi en un cultivo hidropónico de tomates (*Solanum lycopersicum* L.) en sustrato inerte y con iluminación artificial. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con seis tratamientos y cinco repeticiones. Los tratamientos se asignaron siguiendo un modelo factorial (3×2) con tres niveles de Pi (0.05, 1.00 y 2.00 mmol L^{-1}) y presencia (1.00 mmol L^{-1}) o ausencia de Phi. La existencia de diferencias significativas entre variables se estableció mediante ANOVA y, en su caso, se aplicó el test de Duncan ($P < 0.05$) para la separación de medias. El peso seco medio (parte aérea) de las plántulas cultivadas con 2 mmol L^{-1} de Pi fue superior (4.40 g) al de las cultivadas con 0.05 mmol L^{-1} de Pi (2.24 g) ($P < 0.05$), y el de las cultivadas sin Phi (0.00 mmol L^{-1}) fue superior (3.93 g) al de las cultivadas con 1 mmol L^{-1} de Phi (2.80 g) ($P < 0.05$). La concentración de Pi en la solución nutritiva influyó sobre la concentración foliar de P, Zn, Cu y Mn, y la de Phi influyó sobre la de P. La interacción Pi x Phi fue significativa para los niveles foliares de P y Zn. Los resultados indican que las plántulas tomaron P en forma de Pi y Phi, pero que únicamente el P suministrado como Pi favoreció su crecimiento.

Palabras claves: arena, fertilización, fósforo, nutrición, toxicidad.

Abstract

Phosphite (PO_3^3 ; Phi) is a reduced form of phosphate (PO_4^3 ; Pi) used in agriculture as a fungicide, fertilizer and biostimulator. In this study, the fertilizing capacity of Phi was assessed in a hydroponic tomato crop (*Solanum lycopersicum* L.) with different levels of Pi, in an inert substrate and with artificial lighting. A randomized complete block experimental design with six treatments and five replications was used. The treatments were assigned following a factorial model (3×2) with three levels of Pi (0.05, 1.00 and 2.00 mmol L^{-1}) and presence (1.00 mmol L^{-1}) or absence of Phi. The existence of significant differences between the variables was established by an ANOVA test and, when appropriate, Duncan's Test ($P < 0.05$) was applied to separate the means. The average dry weight (aerial part) of the seedlings cultivated with 2 mmol L^{-1} of Pi was higher (4.40 g) than that of those cultivated with 0.05 mmol L^{-1} of Pi (2.24 g) ($P < 0.05$), and the average dry weight of the seedlings cultivated without Phi (0.00 mmol L^{-1}) was higher (3.93 g) than that of those cultivated with 1 mmol L^{-1} of Phi (2.80 g) ($P < 0.05$). The concentration of Pi in the nutrient solution influenced the foliar concentration of P, Zn, Cu and Mn, and the concentration of Phi influenced that of P. The interaction Pi x Phi was significant for the foliar levels of P and Zn. The results indicate that the seedlings took Pi and Phi, but only the P supplied as Pi favored their growth.

Keywords: sand, fertilization, phosphorus, nutrition, toxicity.

Introducción

La FAO estima que en los próximos 40 años la población mundial superará los 9 billones de personas, lo que supondrá posiblemente un incremento del 60 % en la demanda de alimentos (Mouél y Forslund, 2017). La agricultura moderna depende del P (Cordell *et al.*, 2009), un elemento que no se encuentra en estado libre en la naturaleza, que es muy reactivo, y que se combina rápidamente con otros elementos como hidrógeno (H) y oxígeno (O). El P es un nutriente que se obtiene a partir de la roca fosfórica, un recurso no renovable cuyas reservas mundiales pueden agotarse en los próximos 50 a 100 años, y no es sustituible (Cordell *et al.*, 2009). A nivel mundial muchos suelos son deficientes en formas solubles de fósforo inorgánico (Pi) (Yang y Finnegan, 2010). Por todo ello, se hace necesario para la agricultura, además de utilizar tecnologías que permitan una mejora de la conservación del P en el suelo, encontrar fuentes de P alternativas. Por ello, en los últimos 20 años se ha estado utilizando una forma reducida de Pi, conocida como Phi, para mejorar las propiedades agronómicas de muchos cultivos (Achary *et al.*, 2017).

Cuando el P se encuentra en su máximo estado de oxidación, la molécula que se forma se denomina fosfato (PO_4^{3-} ; Pi), y cuando no lo está, la molécula se denomina fosfito (PO_3^{3-} ; Phi), fosfonato o ácido fosforoso (Thao y Yamakawa, 2009). Aunque el uso del Phi en la agricultura puede tener potenciales ventajas en cuanto a fertilización, agotamiento de recursos minerales, contaminación, eutrofización, bioestimulación, control de patógenos como *Phytophthora* spp. y *Pythium* spp. (Orbović *et al.*, 2008; Ramallo *et al.*, 2019) y/o el control de malas hierbas (Achary *et al.*, 2017), los ensayos de fertilización con Phi en ocasiones presentan resultados que pueden parecer contradictorios, ya que pueden variar dependiendo del cultivo (especie vegetal), de la técnica de cultivo (hidropónico o en suelo), del modo de aplicación (foliar o radicular), del estado nutricional de planta (deficientes o suficientes en P), del posible efecto combinado (fertilizante y fungicida) o de la relación Pi/Phi suministrada a la planta. Moor *et al.* (2009) encontraron que cuando se emplea Phi en la fertilización de fresas no se produce una disminución del crecimiento, pero tampoco se produce un aumento del rendimiento con respecto a la fertilización tradicional con Pi. Araujo *et al.* (2016) señalan que, en frijol común, en condiciones de deficiencia de P, el Phi suministrado con la solución nutritiva ocasiona una disminución de la acumulación de P. Por otra parte, López-Arredondo y Herrera-Estrella (2012) encuentran que plantas transgénicas capaces de expresar el ptxD de *Pseudomonas stutzeri* precisan entre un 30 y un 50 % menos de P cuando son fertilizadas con Phi que cuando son fertilizadas con Pi. Todo ello ha motivado la realización de este ensayo, donde se ha estudiado el efecto que la presencia

(1 mmol L⁻¹) o ausencia de Phi (0 mmol L⁻¹) tiene sobre el crecimiento y la concentración foliar de macro y micronutrientes de plantas de tomate cultivadas con diferentes niveles de Pi (0.05, 1.00 y 2 mmol L⁻¹). De tal manera, el estudio fue realizado en hidroponía, con solución nutritiva recirculante, con iluminación artificial y en condiciones de laboratorio.

Materiales y métodos

Cultivo: el ensayo se realizó en España, en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería (Sección de Ingeniería Agraria) de la ULL (28°28'44"N, 16°19'07"O) en San Cristóbal de La Laguna (544 m s. n. m.). Durante el tiempo que duró la experiencia la temperatura se mantuvo entre 22 y 25 °C y la humedad relativa entre el 60 y el 65 %. Se cultivaron plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L. var. Marmande) en un sistema hidropónico con solución nutritiva recirculante, suministrada a los correspondientes recipientes de cultivo a intervalos de 30 min (de 06.00 h a 24.00 h) y 60 min (de 0.00 h a 06.00 h) por subirrigación. Los recipientes utilizados fueron macetas plásticas (PE) de 1000 mL de capacidad, que se llenaron con arena de sílice de entre 1 y 2 mm Ø, lavada previamente con agua corriente, desinfectada con hipoclorito de sodio (NaClO al 5 %) durante 60 min y aclarada finalmente con agua desionizada ($\text{CE}_{25^\circ\text{C}} < 4 \mu\text{S cm}^{-1}$). El sistema de iluminación estaba formado por tubos Grolux Sylvania T8 (36W, 120 cm, Ø 26 mm) suspendidos a una distancia de 20 cm sobre el cultivo, y se fueron elevando a medida que las plantas crecieron; además proporcionaron una radiación PAR alrededor de 200 $\mu\text{mol de fotones cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. El fotoperiodo aplicado fue de 16 h de luz y 8 h de oscuridad (16/8). La solución nutritiva aportada a cada tratamiento fue esencialmente la indicada por Hoagland y Arnon (1950), con modificaciones puntuales de las concentraciones de K y S dependiendo de los niveles de Pi (0.05, 1.00 y 2.00 mmol L⁻¹) y Phi (0.00 y 1.00 mmol L⁻¹) establecidos para cada tratamiento (Tabla 1). La concentración de macronutrientes de cada una de ellas varió en función de los tratamientos aplicados (TI, TII, TIII, TIV TV y TVI), y fue, respectivamente de: 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00 mmol L⁻¹ de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 2.00, 2.00, 2.00, 2.00, 2.00, 2.00 mmol L⁻¹ de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0.475, 0.475, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00 mmol L⁻¹ de K_2SO_4 ; 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00 mmol L⁻¹ de KNO_3 ; 0.05, 0.05, 1.00, 1.00, 2.00, 2.00 mmol L⁻¹ de KH_2PO_4 ; y 0.00, 1.00, 0.00, 1.00, 0.00, 1.00 mmol L⁻¹ de H_3PO_4 (Tabla 2). La concentración de micronutrientes fue igual en todos los casos: 46.253 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de B, 9.102 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn, 0.764 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, 0.314 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Cu y 0.104 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Mo. El Fe se aportó en forma Fe-EDDHA (Sequestrene 138 Fe®, Syngenta) a razón de 3.61 g L⁻¹ de producto comercial (4.525 mmol L⁻¹ de Fe). Salvo en el caso del Fe, las sales utilizadas fueron de calidad analítica (PA) de Panreac® o Merck®. La concentración deseada de Phi de las disoluciones

Tabla 1. Concentraciones de Pi (mmol L⁻¹) y de Phi (mmol L⁻¹) de las soluciones nutritivas suministradas a las plantas de seis tratamientos (TI, TII, TIII, TIV, TV y TVI)

Compuesto	TI*	TII	TIII	TIV	TV	TVI
Pi (mmol L ⁻¹)	0.05	0.05	1.00	1.00	2.00	2.00
Phi (mmol L ⁻¹)	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

* TI, TII, TIII, TIV, TV, TVI: tratamientos aplicados.

Tabla 2. Composición (mmol L⁻¹) de las soluciones nutritivas suministradas a las plantas de seis tratamientos (TI, TII, TIII, TIV, TV y TVI)

Compuesto	TI*	TII	TIII	TIV	TV	TVI
Ca(NO ₃) ₂ 4H ₂ O	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Mg(SO ₄) 7H ₂ O	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
K ₂ SO ₄	0.475	0.475	0.00	0.00	0.00	0.00
KNO ₃	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
KH ₂ PO ₄	0.05	0.05	1.00	1.00	2.00	2.00
H ₃ PO ₃	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

*TI, TII, TIII, TIV, TV, TVI: (0.05 Pi, 0.00 Phi; 0.05 Pi, 1.00 Phi; 1.00 Pi, 0.00 Phi; 1.00 Pi, 1.00 Phi; 2.00 Pi, 0.00 Phi; 2.00 Pi, 1.00 Phi).

que contenían Phi se consiguió mediante la adición de 1 mL L⁻¹ de disolución concentrada (1 M) de H₃PO₃ (82 g L⁻¹), neutralizada previamente con KOH. Las disoluciones estaban contenidas en depósitos plásticos (PE) de 5 L de capacidad y fueron renovadas completamente cada 3 o 6 días dependiendo del estado de desarrollo de las plántulas. Antes de ser suministradas al cultivo, el pH se ajustó a 6.4 con KOH 1 M. La siembra se realizó el 3/05/18 colocando 5 semillas de tomate en cada maceta y directamente en la arena, a una profundidad de entre 5 y 10 mm. Durante el periodo de germinación, que duró 8 días, las semillas se regaron con agua desionizada (CE_{25°C} < 4 μS cm⁻¹) y después, una vez que las plántulas tuvieron una o dos hojas verdaderas, con las soluciones nutritivas correspondientes a cada tratamiento. A los 12 días de la siembra se procedió a retirar las plántulas innecesarias dejando una sola por contenedor, procurando que el cultivo presentara la mayor uniformidad posible. Durante el tiempo que duró el ensayo se tomaron medidas diarias de la CE (conductímetro WTW inoLab Cond level 1) y del pH (pH-metro Meterlab PHM 210), y se realizaron controles periódicos del volumen de su consumo.

Toma de muestras y determinaciones analíticas: la toma de muestras se realizó a los 61 días de la siembra, de una sola vez, tratamiento por tratamiento. Las plantas se extrajeron de sus contenedores con el cepellón, que se introdujo brevemente en un recipiente con agua desionizada para facilitar el desprendimiento de los restos de arena y se extendió sobre láminas de papel de filtro para absorber el exceso de humedad. Cada planta se seccionó separando raíces, tallos y hojas. Cada órgano se midió (diámetro y longitud del tallo,

área foliar, longitud radicular), se pesó y se introdujo en bolsas de malla plástica, que se pusieron a secar en una estufa de aire forzado (Selecta) a 65° C durante 48 h. Las muestras secas se pasaron a un desecador, se dejaron enfriar a temperatura ambiente, se pesaron nuevamente y se molieron con un molino de hojas (Culatti) provisto de un tamiz de 1 mm de luz de malla. Se pesaron entre 1 y 2 g de muestra seca (con aproximación de ± 1 mg) en crisoles de porcelana, se calcinaron a 480° C durante 5 h en un horno mufla (CSF 1100 Carbolite Furnaces), se atacaron con HCl 6 M, se filtraron y se diluyeron a un volumen adecuado (Jones *et al.*, 1991). En el mineralizado obtenido se determinaron Na, K, por fotometría de emisión (espectrofotómetro Corning), Ca, Mg, Fe, Zn, Cu y Mn por espectrometría de absorción atómica (EAA Thermo Series) y P, por espectrofotometría UV/VIS (espectrofotómetro Perkin-Elmer 551S) según el método del molibdato-vanadato amónico. El N se determinó por el método Kjeldahl (Digestion unit Block Digest Selecta, Distillation unit 2100 Kjeltec FOSS).

Diseño experimental y tratamiento estadístico de los datos: el ensayo consistió en un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos y cinco repeticiones. Los tratamientos se distribuyeron siguiendo un diseño factorial con dos factores (3 niveles de Pi x 2 niveles de Phi), en el que cada unidad experimental estaba constituida por una sola planta. Los resultados obtenidos se organizaron en varias hojas de cálculo (Microsoft Excel 2013). Las posibles diferencias entre los valores que tomó cada variable en los distintos tratamientos se estableció mediante análisis de la varianza (ANOVA), habiéndose comprobado previamente los supuestos de normalidad (Test de Kolmogorov-Smirnov) y homocedasticidad de las varianzas (Test de Levenne) y, en los casos necesarios, haciendo las transformaciones oportunas. En los casos en que se apreciaron diferencias significativas entre tratamientos se procedió a hacer la separación de las medias a través los Tests de Duncan (alfa = 0.05) y Tukey (alfa = 0.05) (IBM SPSS Statistics 20).

Resultados

Concentración foliar de P: la concentración foliar de P analizada en las plantas de tomate varió dependiendo de la concentración de Pi (H₂PO₄⁻) y de Phi (H₂PO₃⁻) de las soluciones nutritivas (sn) suministradas al cultivo. Estuvo comprendida entre 1.54 g kg⁻¹ sobre materia seca (ms) en plantas cultivadas con 0.05 mmol L⁻¹ de Pi y 0.00 mmol L⁻¹ de Phi, y 2.11 g kg⁻¹ ms en plantas cultivadas con 1 mmol L⁻¹ de Pi y 1.00 mmol L⁻¹ de Phi (Figura 1). Las plantas cultivadas con 0.05 mmol L⁻¹ de Pi presentaron niveles foliares de P (1.72 g kg⁻¹ ms) más bajos (P < 0.01) que las cultivadas con 1 y 2 mmol L⁻¹ de Pi (1.98 y 2.01 g kg⁻¹ ms respectivamente) (P > 0.05) (Tabla 3), y las cultivadas en ausencia de Phi, arrojaron

Tabla 3. Concentración foliar media y error típico de la media de N, P, K, Ca y Mg (g kg^{-1} ms) analizados en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas con diferentes niveles de Pi (mmol L^{-1}) y Phi (mmol L^{-1})

Concentración de Pi x Concentración de Phi	Principales macronutrientes (g kg^{-1} de materia seca)				
	N	P (g kg^{-1})	K (g kg^{-1})	Ca (g kg^{-1})	Mg (g kg^{-1})
Concentración de Pi†					
0.05 (mmol L^{-1})	62.9±1.1	1.72±0.09 ^b	20.51±1.73	30.77±1.61	7.16±0.53
1.00 (mmol L^{-1})	61.2±1.0	1.98±0.07 ^a	19.62±1.05	27.40±0.44	6.18±0.46
2.00 (mmol L^{-1})	60.3±0.7	2.01±0.04 ^a	20.08±1.32	28.22±0.91	7.84±0.66
Concentración de Phi‡					
0.00 (mmol L^{-1})	61.7±0.8	1.75±0.06 ^b	19.86±0.99	28.50±0.76	6.70±0.40
1.00 (mmol L^{-1})	60.8±0.9	2.05±0.04 ^a	20.35±1.31	29.35±1.32	7.50±0.58
ANOVA Parámetros (gl)					
F (nivel de significación)					
Concentración Pi (2)	1.031 (ns)	14.369**	0.253 (ns)	2.278 (ns)	2.354 (ns)
Concentración Phi (1)	0.225 (ns)	40.569**	0.038 (ns)	0.457 (ns)	1.597 (ns)
Pi x Phi (2)	0.958 (ns)	3.860 *	3.118 (ns)	0.298 (ns)	1.022 (ns)

Por columnas, los valores seguidos de distintas letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$). ** Diferencias muy significativas ($P < 0.01$). * Diferencias significativas ($P < 0.05$). † P en forma de ortofosfato (PO_4H_2) ‡ P en forma de fosfito (PO_3H_2)

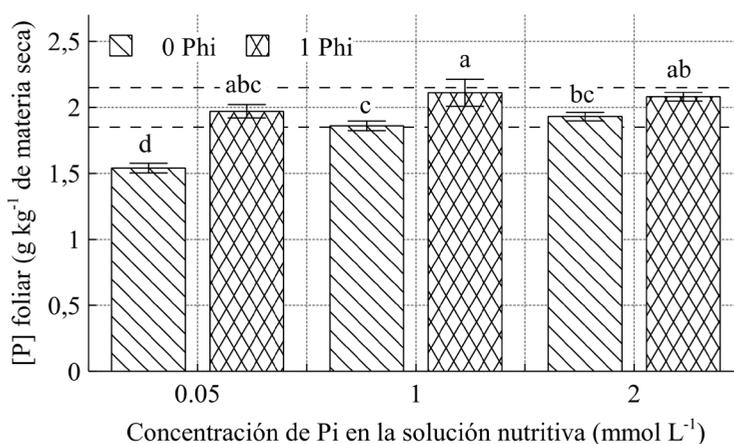


Figura 1. Efecto de la ausencia (0.00 mmol L^{-1}) o presencia (1.00 mmol L^{-1}) de Phi sobre la concentración de foliar de P en plantas de tomate cultivadas con diferentes niveles de Pi (0.05 , 1.00 y 2.00 mmol L^{-1}). Las barras de error corresponden al error típico ($n=3$). Sobre cada barra, y para cada nivel de Pi, letras diferentes señalan diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos (+ Phi, - Phi). Las líneas horizontales discontinuas limitan el rango de suficiencia para los niveles foliares de P.

concentraciones foliares de P (1.75 g kg^{-1} ms) inferiores ($P < 0.01$) a las cultivadas en presencia de Phi (2.05 g kg^{-1} ms) (Tabla 3). En los tratamientos sin Phi se encontró una elevada correlación entre la concentración de Pi de la solución nutritiva y la concentración foliar de P ($r = 0.91$, $P < 0.05$), que se pudo expresar mediante una función cuadrática ($P = 0.130\text{Pi}^2 + 0.469\text{Pi} + 1.518$; $R^2 = 0.913$) (Basirat *et al.*, 2011; Martins *et al.*, 2017).

Parámetros fisiológicos: el crecimiento (pesos secos) de raíces, tallos y hojas estuvo condicionado por la concentración de Pi ($P < 0.05$) y de Phi ($P < 0.05$) de la sn (Tabla 4). En el caso de las raíces, y debido posiblemente a la amplia variabilidad de los pesos obtenidos, aunque se observaron diferencias entre

algunos tratamientos, estas no fueron significativas ($P > 0.05$). Tampoco fue significativa, para ningún órgano, la posible interacción Pi_x_Phi ($P > 0.05$). Es interesante mencionar que, cuando la concentración de Pi aumentó de 0.05 mmol L^{-1} a 2 mmol L^{-1} , el peso seco medio de la parte aérea (PSA) se incrementó en un 49 %, pero cuando la concentración de Phi aumentó de 0 mmol L^{-1} a 1 mmol L^{-1} , el PSA disminuyó en un 28 % (Tabla 4). Para concentraciones de Pi en la sn de 0.05 mmol L^{-1} y ausencia de Phi, el PSA fue de 2.47 g , mientras que para la misma concentración de Pi y presencia de Phi este PSA fue de tan solo 1.95 g .

Un efecto similar, pero mucho más acusado, se observó para concentraciones de 1 y 2 mmol L^{-1} de Pi en la sn y ausencia (0 mmol L^{-1}) o presencia de Phi

Tabla 4. Valores medios y error típico de la media de algunos parámetros fisiológicos determinados en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas con diferentes niveles de Pi (mmol L⁻¹) y de Phi (mmol L⁻¹): peso seco de la raíz (PSR), peso seco del tallo (PST), peso seco foliar (PSH), peso seco de la parte aérea (PSA) y relación raíz-parte aérea (RRA), PSR, PST, PSH y PSA (g)

Concentración de Pi x Concentración de Phi	Producción de biomasa (g de materia seca planta ⁻¹)					
	PSR	PST	PSH	PSA	RRA	
Concentración de Pi†						
0.05 (mmol L ⁻¹)	0.19±0.03	0.73±0.10 ^b	1.51±0.23 ^b	2.24±0.33 ^b	0.08±0.006	
1.00 (mmol L ⁻¹)	0.43±0.16	1.18±0.20 ^b	2.60±0.58 ^{ab}	3.78±0.77 ^{ab}	0.10±0.018	
2.00 (mmol L ⁻¹)	0.41±0.07	1.34±0.14 ^a	3.06±0.41 ^a	4.40±0.54 ^a	0.09±0.008	
Concentración de Phi‡						
0.00 (mmol L ⁻¹)	0.39±0.10	1.23±0.15	2.70±0.40	3.93±0.55	0.09±0.010	
1.00 (mmol L ⁻¹)	0.27±0.07	0.89±0.13	1.95±0.34	2.84±0.46	0.09±0.009	
ANOVA Parámetros (g)		F (nivel de significación)				
Concentración Pi (2)		2.017 (ns)	5.849 *	4.363 *	4.858 *	0.594 (ns)
Concentración Phi (1)		1.455 (ns)	6.034 *	3.578 *	4.266 *	0.051 (ns)
Pi x Phi (2)		0.377 (ns)	0.479 (ns)	0.641 (ns)	0.593 (ns)	0.009 (ns)

Por columnas, valores seguidos de distintas letras indican diferencias significativas (P < 0.05). *Diferencias significativas (P < 0.05). † P en forma de ortofosfato (PO₄H₂). ‡ P en forma de fosfito (PO₃H₂)

Tabla 5. Concentración foliar media (g kg⁻¹ sobre materia seca) y error típico de la media obtenidos para Fe, Zn, Cu, Mn (mg kg⁻¹ ms) y Na (g kg⁻¹ ms), analizados en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) según los niveles de Pi (mmol L⁻¹) y Phi (mmol L⁻¹) suministrados a las plantas

Concentración de Pi x Concentración de Phi	Micronutrientes (mg kg ⁻¹ materia seca) y Na (g kg ⁻¹ materia seca)					
	Fe	Zn	Cu	Mn	Na	
Concentración de Pi†						
0.05 (mmol L ⁻¹)	314.2±13.6	182.5±13.1 ^a	42.5±1.6 ^a	112.2±5.1 ^a	2.1±0.2	
1.00 (mmol L ⁻¹)	295.7±7.1	139.1±11.1 ^b	28.3±1.6 ^b	91.2±4.9 ^b	1.7±0.2	
2.00 (mmol L ⁻¹)	292.7±19.0	157.7±6.9 ^{ab}	26.0±1.1 ^b	88.2±2.9 ^b	1.8±0.1	
Concentración de Phi‡						
0.00 (mmol L ⁻¹)	301.5±10.2	168.8±10.9	32.8±2.8	99.0±6.1	1.8±0.1	
1.00 (mmol L ⁻¹)	301.6±13.2	148.4±7.8	31.6±2.8	96.9±3.8	1.9±0.2	
ANOVA Parámetros (g)		F (nivel de significación)				
Concentración Pi (2)		0.828 (ns)	3.556 *	32.266 **	8.229 **	1.681 (ns)
Concentración Phi (1)		0.000 (ns)	2.674 (ns)	0.379 (ns)	0.000 (ns)	0.444 (ns)
Pi x Phi (2)		1.014 (ns)	3.739 *	0.581 (ns)	1.904 (ns)	1.197 (ns)

Por columnas, valores seguidos de distintas letras indican diferencias significativas (P < 0.05). ** Diferencias muy significativas (P < 0.01). * Diferencias significativas (P < 0.05). † P en forma de ortofosfato (PO₄H₂). ‡ P en forma de fosfito (PO₃H₂)

(1 mmol L⁻¹) (Figura 2). La relación raíz/parte aérea (RRA) tomó valores comprendidos entre 0.083 y 0.103 y no se vio afectada por los niveles de Pi en la sn ni por la presencia o ausencia de Phi, lo que mostró, en ambos casos, pequeñas diferencias que no fueron significativas (P > 0.05) (Tabla 4). En el ensayo se midieron otros parámetros como la longitud de la raíz (LR), el diámetro del tallo (DT) o la longitud de la parte aérea (LA). En los tratamientos con Pi, la LR tomó valores comprendidos entre 27.7 y 30.5 cm, el DT entre 0.80 y 0.86 cm, y la LA entre 54.6 y 62.3 cm. En los tratamientos con Phi, la LR tomó valores de 28.8 y 31.2 cm, el DT de 0.82 y 0.86 cm, y la LA de 53.8 y 62.3 cm. De estas variables, la única que mostró diferencias significativas entre los tratamientos fue la longitud de la planta, que fue inferior en los que se aportó Phi (F=6.455, P < 0.05).

Niveles foliares de macro y micronutrientes: los niveles foliares medios de N estuvieron comprendidos entre 60.3 y 62.9 g kg⁻¹ de ms, los de K entre 19.62 y 20.51 g kg⁻¹ de ms, los de Ca entre 27.40 y 30.77 g kg⁻¹ de ms y los de Mg entre 6.18 y 7.16 g kg⁻¹ de ms (Tabla 3). En los tratamientos con Phi, las concentraciones foliares medias de N, K, Ca y Mg fueron de 60.8, 20.35, 29.35 y 7.5 g kg⁻¹ de ms respectivamente, mientras que en los tratamientos sin Phi fueron de 61.7, 19.86, 28.50 y 6.70 g kg⁻¹ de ms (Tabla 3). En cualquier caso, las pequeñas diferencias que se aprecian no fueron significativas (P > 0.05). Los niveles foliares medios de Fe, Zn, Cu y Mn se muestran en la Tabla 5. Igualmente, se constató que, cuando la concentración de Pi de la sn aumenta, los niveles foliares de Zn, Cu y Mn disminuyen (P < 0.05). Por otra parte, los niveles foliares de Fe y Na no se vieron afectados ni

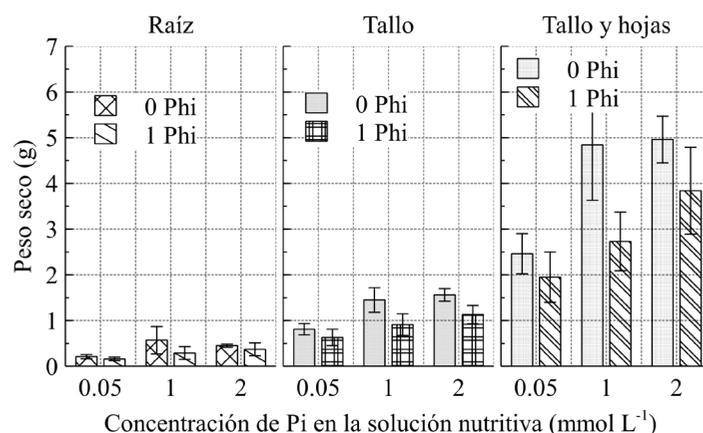


Figura 2. Efecto de la presencia (1.00 mmol L⁻¹) o ausencia de fosfito (0.00 mmol L⁻¹) en la solución nutritiva sobre el peso seco de la raíz, el tallo, y el tallo y las hojas, de plantas de tomate cultivadas en hidroponía con diferentes niveles de Pi (0.05, 1.00 y 2.00 mmol L⁻¹).

por la concentración de Pi, ni por la de Phi de la sn. Únicamente en el caso del Zn, la interacción Pi x Phi fue significativa ($P < 0.05$).

Discusión

Los niveles foliares de P analizados en plantas de todos los tratamientos fueron ligeramente superiores a los señalados por Basirat *et al.* (2011), similares (1.86-2.15 g kg⁻¹ ms) a los indicados por Cole *et al.* (2016) e inferiores (3.30-4.15 g kg⁻¹ ms) a los señalados por Habibzadeh y Moosavi (2014), y en ningún caso se apreciaron síntomas de deficiencia (Figura 1). Se observó que las plantas cultivadas con 0.05 mmol L⁻¹ de Pi presentaron niveles foliares de P inferiores ($P < 0.05$) a las cultivadas con 1 y 2 mmol L⁻¹ de Pi y que, en ambos casos, las que no recibieron Phi presentaron niveles foliares de P inferiores a las que sí lo recibieron (Förster *et al.*, 1998). Comparando los pesos secos medios de los órganos analizados tratamiento por tratamiento (Figura 2), se comprueba que la adición de 1 mmol L⁻¹ de Phi a las soluciones nutritivas deficientes en Pi (0.05 mmol L⁻¹) no tuvo un efecto favorable sobre el crecimiento de las plantas, y tampoco lo tuvo cuando se añadió a las soluciones nutritivas con una concentración suficiente (1.00 mmol L⁻¹) y alta (2.00 mmol L⁻¹) de Pi. En general, el P suministrado al cultivo en forma de Pi tuvo un efecto favorable sobre el crecimiento de todos los órganos, mientras que el suministrado en forma de Phi no lo tuvo o fue desfavorable. Estos resultados son similares a los señalados por Ávila *et al.* (2012) en un ensayo con frijol común en suelo (Oxisol) y difieren de los señalados por Araujo *et al.* (2016), también en un ensayo con frijol común, pero en cultivo hidropónico. La presencia o ausencia de Phi en la sn afectó la concentración foliar de P, pero no la del resto de macronutrientes ($P > 0.05$). El N tomó valores superiores a los señalados por Cole *et al.* (2016) y por Snyder (1992), el K algo inferiores

(30.6 - 35.2 g kg⁻¹ ms), y el Ca y el Mg se mantuvieron dentro del rango considerado adecuado (Snyder, 1992); tampoco afectó la concentración foliar de micronutrientes. Los niveles foliares de Fe, Zn y Cu fueron superiores a los señalados por Rodríguez-Martin *et al.* (2016) y, en el caso del Zn, fueron muy superiores a los señalados por Cole *et al.* (2016). El Zn es el único elemento de los analizados en que se observó una interacción significativa entre los niveles de Pi y de Phi ($P < 0.05$) suministrados a las sn. En este ensayo se ha puesto de manifiesto una vez más la estrecha relación entre la concentración de Pi de la sn y la concentración foliar de P, Zn (Drissi *et al.*, 2015), Mn (Kleiber, 2015) y Cu (Tabla 6), aunque solamente en los tratamientos sin Phi (Tabla 6). En muchos cultivos se ha observado la interacción antagónica entre el P y el Zn, si bien parece que es más del P con el Zn, que del Zn con el P (Kabata-Pendias, 2010; Soltangheisi *et al.*, 2014).

Lo anterior muestra que la presencia de Phi en las soluciones nutritivas provocó un incremento en la concentración foliar de P, pero no afectó la concentración foliar de otros macro o micronutrientes.

Tabla 6. Coeficientes de correlación (r) entre las variables: concentración de Zn, Cu, Mn, P (foliar) y Pi (sn). Solo se consideran los tratamientos con Phi=0 (mmol L⁻¹)

	Zn†	Cu	Mn	P	Pi
Zn	1	0.851 **	0.874 **	-0.714 *	-0.674 *
Cu	0.851 **	1	0.935 **	-0.878 **	-0.904 **
Mn	0.874 **	0.935 **	1	-0.716 *	-0.769 **
P	-0.714 *	-0.878 **	-0.716 *	1	0.905 **
Pi	-0.674 *	-0.904 **	-0.769 **	0.905 **	1

**La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral); *La correlación es significativa al nivel 0.05 (bilateral); † Zn, Cu, Mn y P: concentraciones foliares (mg kg⁻¹ ms); Pi: concentración en la solución nutritiva (mmol L⁻¹).

Tampoco alteró la relación parte aérea/raíz, que se mantuvo constante e independiente de los tratamientos aplicados ($PFR = 2.51 + 0.150 \cdot PFA$; $R^2 = 0.882$). Se constata que las plantas fueron capaces de tomar Phi de la sn pero que no fueron capaces de metabolizarlo (Schachtman *et al.*, 1998), y por ello, el aporte de Phi no supuso un aumento de biomasa. El efecto negativo que la presencia de Phi en las soluciones nutritivas tuvo sobre el crecimiento de las plantas no se puede atribuir a sinergismos o antagonismos con otros nutrientes distintos del Pi, sino a la capacidad que mostraron las plantas para tomar ambas formas de P, y de hacerlo de un modo poco o nada selectivo, con lo cual, la absorción de cierta cantidad de Phi fue en detrimento de la absorción de cierta cantidad de Pi, ocasionando un aumento de la concentración foliar de P, al tiempo que una disminución de la concentración foliar de Pi (Varadarajan *et al.*, 2002). Cabe señalar que algunos datos de carácter genético apuntan claramente a que son las señales originadas en los brotes las que controlan la absorción de P por parte de las raíces (Raghothama, 2000).

Conclusiones

Se determinó que la presencia o ausencia de Phi en la sn ($0.00-1.00 \text{ mmol L}^{-1}$) influye sobre el crecimiento de las plantas y sobre la concentración foliar de P, pero no sobre la concentración foliar de los macronutrientes N, K, Ca y Mg, de los micronutrientes Fe, Zn, Cu y Mn, o del Na. Aunque en los tratamientos con Phi la concentración foliar de P aumenta con respecto los tratamientos sin Phi, el crecimiento de las plantas no se ve favorecido, por el contrario, se reduce. Con todo ello, consideramos necesario realizar nuevos ensayos, tanto en hidroponía como en suelo, que permitan confirmar estos resultados y extender las conclusiones.

Referencias

- Achary, V. M. M.; Ram, B.; Manna, M.; Datta, D.; Bhatt, A.; Reddy, M. K. y Agrawal, P. K. (2017). Phosphite: A novel P fertilizer for weed management and pathogen control. *Plant Biotechnology Journal*, 15(12), 1493-1508. <https://doi.org/10.1111/pbi.12803>
- Araujo, J. L.; Ávila, F. W. de y Faquin, V. (2016). Phosphite and phosphate in the accumulation and translocation of nutrients in common bean. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 46(4), 357-366. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4640810>
- Ávila, F. W.; Faquin, V.; Ramos, S. J.; Pinheiro, G. L.; Marques, D. J.; da Silva Lobato, A. K.; Ferreira de Oliveira-Neto, C. y Ávila, P. A. (2012). Effects of phosphite and phosphate supply in a weathered tropical soil on biomass yield, phosphorus status and nutrient concentrations in common bean. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10(2), 312-317. <https://www.wfpublisher.com/Abstract/2972>
- Basirat, M.; Malboobi, M. A.; Mousavi, A.; Asgharzadeh, A. y Samavat, S. (2011). Effects of phosphorous supply on growth, phosphate distribution and expression of transporter genes in tomato plants. *Australian Journal of Crop Science*, 5(5). [chrome-extension://idnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.cropj.com/basirat_5_5_2011_537_543.pdf](http://www.chrome-extension://idnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.cropj.com/basirat_5_5_2011_537_543.pdf)
- Cole, J. C.; Smith, M. W.; Penn, C. J.; Cheary, B. S. y Conaghan, K. J. (2016). Nitrogen, phosphorus, calcium, and magnesium applied individually or as a slow release or controlled release fertilizer increase growth and yield and affect macronutrient and micronutrient concentration and content of field-grown tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 211, 420-430. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.09.028>
- Cordell, D.; Drangert, J. -O. y White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Drissi, S.; Houssa, A.; Bamouh, A.; Coquant, J. -M. y Benbella, M. (2015). Effect of zinc-phosphorus interaction on corn silage grown on sandy soil. *Agriculture*, 5(4), 1047-1059. <https://doi.org/10.3390/agriculture5041047>
- Förster, H.; Adaskaveg, J. E.; Kim, D. H. y Stanghellini, M. E. (1998). Effect of phosphite on tomato and pepper plants and on susceptibility of pepper to phytophthora root and crown rot in hydroponic culture. *Plant Disease*, 82(10), 1165-1170. <https://doi.org/10.1094/PDIS.1998.82.10.1165>
- Habibzadeh, Y. y Moosavi, Y. (2014). Effect of phosphorus levels on growth of tomato plants in presence or absence of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*). *Peak Journal of Agricultural Science*, 2(4), 51-56. 316665704_Effect_of_phosphorus_levels_on_growth_of_tomato_plants_in_presence_or_absence_of_Arbuscular_mycorrhizal_fungi_Glomus_mosseae_and_Glomus_intraradices
- Hoagland, D. R. y Arnon, D. I. (1950). *The water-culture method for growing plants without soil*. Berkeley: University of California. <http://archive.org/details/watercultureme3450hoag>
- Jones, J. B.; Wolf, B. y Mills, H. A. (1991). *Plant analysis handbook: A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. Athens, USA: Micro-Macro Publishing. http://openlibrary.org/b/OL18002303M/Plant_analysis_handbook_a_practical_sampling_preparation_analysis_and_interpretation_guide
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*. Boca Ratón: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Kleiber, T. (2015). Effect of manganese on nutrient content in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) leaves. *Journal of Elementology*, 20, 115-126. <https://doi.org/10.5601/jelem.2014.19.2.580>
- López-Arredondo, D. L. y Herrera-Estrella, L. (2012). Engineering phosphorus metabolism in plants to produce a dual fertilization and weed control system. *Nature Biotechnology*, 30(9), 889-893. <https://doi.org/10.1038/nbt.2346>
- Martins, B.; Candian, J.; Lima, P.; Corrêa, C.; Gouveia, A.; Silva, J.; Santana, F. y Cardoso, A. (2017). Effect of phosphorus (P) doses on tomato seedlings production in poor nutrients substrates and its importance on fruit yield. *Australian Journal of Crop Science*, 11, 567-572. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.05.p379>
- Moor, U.; Pöldma, P.; Tõnutare, T.; Karp, K.; Starast, M. y Vool, E. (2009). Effect of phosphite fertilization on growth, yield and fruit composition of strawberries. *Scientia Horticulturae*, 119(3), 264-269. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.005>
- Mouël, C. y Forslund, A. (2017). How can we feed the world in 2050? A review of the responses from global scenario studies. *European Review of Agricultural Economics*, 44. <https://doi.org/10.1093/erae/jbx006>

- Orbović, V.; Syvertsen, J. P.; Bright, D.; Clief, D. L. V. y Graham, J. H. (2008). Citrus seedling growth and susceptibility to root rot as affected by phosphite and phosphate. *Journal of Plant Nutrition*, 31(4), 774-787. <https://doi.org/10.1080/01904160801928448>
- Raghothama, K. (2000). Phosphate transport and signaling. *Current Opinion in Plant Biology*, 3(3), 182-187. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526600800631>
- Ramallo, A. C.; Cerioni, L.; Olmedo, G. M.; Volentini, S. I.; Ramallo, J. y Rapisarda, V. A. (2019). Control of *Phytophthora* brown rot of lemons by pre- and postharvest applications of potassium phosphite. *European Journal of Plant Pathology*, 154(4), 975-982. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01717-y>
- Rodríguez-Martin, J. A.; Carbonell, G.; Torrijos, M. y Porcel Cots, M. Á. (2016). Uptake and metal transfer from biosolid-amended soil to tomato (*Solanum Lycopersicum* Mill L.) Plants. *Journal of Plant Chemistry and Ecophysiology*, 1, 1-8. <https://austinpublishinggroup.com/jpceonline/fulltext/jpce-v1-id1002.php#References>
- Schachtman, D. P.; Reid, R. J. y Ayling, S. M. (1998). Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiol.*, 116(2), 447-453. <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>
- Snyder, R. G. (1992). *Greenhouse tomato handbook*. Mississippi: Mississippi State University. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9322347>
- Soltangheisi, A.; A Rahman, Z.; Ishak, C.; Musa, M. y Zakikhani, H. (2014). Interaction effects of phosphorus and zinc on their uptake and ³²P absorption and translocation in sweet corn (*Zea mays* var. *Saccharata*) grown in a tropical soil. *Asian Journal of Plant Sciences*, 13, 129-135. <https://doi.org/10.3923/ajps.2014.129.135>
- Thao, H. T. B. y Yamakawa, T. (2009). Phosphite (phosphorous acid): Fungicide, fertilizer or bio-stimulator? *Soil Science and Plant Nutrition*, 55(2), 228-234. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00365.x>
- Varadarajan, D. K.; Karthikeyan, A. S.; Matilda, P. D. y Raghothama, K. G. (2002). Phosphite, an analog of phosphate, suppresses the coordinated expression of genes under phosphate starvation. *Plant Physiology*, 129(3), 1232-1240. <https://doi.org/10.1104/pp.010835>
- Yang, X. J. y Finnegan, P. M. (2010). Regulation of phosphate starvation responses in higher plants. *Annals of Botany*, 105(4), 513-526. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq015>