

Interacción nitrato/potasio en la solución nutritiva y el rendimiento de papa en hidroponía

Saúl Parra Terraza^{1§}
Werner Rubio Carrasco²
Sergio Hernández Verdugo¹
Pedro Sánchez Peña¹
Pablo Preciado Rangel³

¹Universidad Autónoma de Sinaloa-Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-El dorado km 17.5, Culiacán, Sinaloa, México. (sergioh2002mx@yahoo.com.mx; spenap@hotmail.com). ²Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo AC. Culiacán, Sinaloa, México. (wrubio@ciad.mx). ³Instituto Tecnológico de Torreón (ITT)-DEPI. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Anna, Torreón, Coahuila, México. (ppreciador@yahoo.com.mx).

§Autor para correspondencia: saul.parra@uas.edu.mx.

Resumen

Las interacciones de los nutrimentos en las plantas pueden ser cuantificadas mediante las concentraciones nutrimentales en los órganos vegetales, sin embargo, hay pocos estudios que evalúen la interacción de más de un nutrimento en el mismo experimento, y escasos reportes de la interacción N/K en la solución nutritiva en el rendimiento y la composición mineral de papa (*Solanum tuberosum* L.). El objetivo de esta investigación fue evaluar en invernadero e hidroponía la interacción de tres relaciones porcentuales NO₃⁻/aniones (40/100, 60/100 y 80/100) y tres de K⁺/cationes (15/100, 35/100 y 55/100) sobre la composición mineral de hojas, tallos, tubérculos y el rendimiento de papa cv Agatha. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos 3². La interacción NO₃⁻/aniones x K⁺/cationes fue significativa para las concentraciones de P, K, Ca y Mg en hojas; K, Ca y Mg en tallos; y Ca y Mg en tubérculos. Las relaciones NO₃⁻/aniones y K⁺/cationes, y la interacción NO₃⁻/aniones x K⁺/cationes no afectaron estadísticamente el diámetro de tubérculo, la materia seca del tubérculo, el número de tubérculos y el rendimiento. Estos resultados indican que la producción de papa en un sistema hidropónico cerrado y sustrato de fibra de coco las relaciones NO₃⁻/aniones y K⁺/cationes no deben ser mayores a 60/100 y 15/100, respectivamente, ya que relaciones altas de NO₃⁻/aniones (80/100) y K⁺/cationes (55/100) reducen el rendimiento de tubérculos 16.7% y 12.8%, cada una.

Palabras clave: *Solanum tuberosum* L., relación nitrato-aniones, relación potasio-cationes.

Recibido: febrero de 2018

Aceptado: abril de 2018

Introducción

En México, en el año 2016 se sembraron 64 466 ha de papa (42 027 ha de riego y 22 439 ha de temporal), de las cuales 13 635 ha de riego fueron sembradas en Sinaloa, con rendimiento promedio de 26.42 t ha⁻¹, consolidándose como el primer productor a nivel nacional (SIAP, 2016). En Sinaloa, el cultivo de papa se realiza en campo abierto, donde las plantas están expuestas a limitantes físicas, químicas y biológicas del suelo y a condiciones ambientales, que afectan el rendimiento.

En contraste, la agricultura protegida ofrece ventajas, respecto a la producción a campo abierto como: cierta independencia del clima, el uso de sustratos como sustitutos del suelo, mayor eficiencia en el uso del agua y de los nutrimentos (Sánchez *et al.*, 2014), entre otras, lo que permite obtener mayores rendimientos. En México, el cultivo de papa en invernadero se limita a la obtención de tubérculo-semilla, en la cual la progenie de material prenuclear (prebásico I), obtenida *in vitro*, es indispensable que sea multiplicada en ambiente protegido, en sustrato y diagnosticada libre de plagas y enfermedades (DOF, 2003).

En ese sentido, se desconoce si la producción de papa en invernadero puede ser una alternativa viable para el mercado nacional. En el cultivo de papa, el N es el nutrimento más limitante del crecimiento (Errebhi *et al.*, 1998), mientras que el K es el más absorbido (Panagiotopoulos, 1995), cantidades inadecuadas de N y K reducen la materia seca del tubérculo, característica importante en la calidad de la papa (Alison *et al.*, 2001) y un suministro inapropiado de N afecta el número de tubérculos (O'Brien *et al.*, 1998). La aplicación conjunta de N y K es importante para obtener altos rendimientos de papa; Sifuentes *et al.* (2013) reportan que para producir 1 t ha⁻¹ de papa se requiere una extracción total de 6.3 kg N ha⁻¹ y 7 kg K ha⁻¹, mientras que Berstch (2009), mediante recopilación de información a nivel mundial, menciona promedios de 6.2 y 8.7 kg N y K ha⁻¹.

Una práctica común de los productores de papa de Sinaloa es aplicar cantidades excesivas de N y K, porque generalmente no se utilizan los análisis químicos del suelo y del agua de riego para conocer los aportes de estos nutrimentos en la demanda del cultivo y se desconoce los porcentajes de eficiencia de la fertilización con N y K en los distintos suelos de Sinaloa. Por ello, excesos de N y K pueden reducir los rendimientos, incrementar los costos de producción y contaminar con N las aguas superficiales y las subterráneas (Vitosh y Jacobs, 1990). Una forma de reducir el impacto negativo en el ambiente de los excesos de N y de otros nutrimentos (P principalmente) es utilizar sistemas hidropónicos cerrados donde la solución nutritiva drenada se recoge para volverse a usar en el cultivo, previa medición y ajuste, si fuera necesario, de pH y CE (Sánchez *et al.*, 2014).

La interacción N-K se presenta en los ecosistemas agrícolas (Johnston y Milford, 2009), aunque la mayoría de las interacciones son complejas, ya que un nutrimento al interactuar con otro puede inducir deficiencias, toxicidades, modificar la respuesta en el crecimiento y alterar la concentración de nutrimentos en las plantas. En general los experimentos de nutrición vegetal realizados se investigó el efecto de un nutrimento en el crecimiento, por lo que estudios de interacción realizados con más de un nutrimento en el mismo experimento son limitados (Fageria, 2001). En los cultivos hidropónicos una forma de evaluar el efecto del N, K y de la interacción NxK es mediante el uso de relaciones relativas de iones en la solución nutritiva, donde una concentración alta de NO₃⁻, respecto a los aniones H₂PO₄⁻ y SO₄²⁻, y una baja concentración de K⁺, respecto a los cationes Ca²⁺ y Mg²⁺, indica una relación alta de NO₃⁻/K⁺, mejor conocida como la relación N/K.

En México y en Latinoamérica no hay estudios en papa, utilizando relaciones NO_3^- /aniones y K^+ /cationes en la solución nutritiva, ya que para definir estas relaciones es necesario considerar la metodología propuesta por Steiner (1984); sin embargo, esta técnica no es de conocimiento usual o no tiene una aceptación general, por ello los objetivos de este estudio fueron determinar la interacción de tres relaciones porcentuales [NO_3^- /aniones (NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-})] y tres relaciones porcentuales [K^+ /cationes (K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+})] en la solución nutritiva en la composición mineral y el rendimiento de papa cultivada en un sistema hidropónico cerrado.

Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en 2014 en un invernadero, con ventilación lateral y mallas antiáfidos en las paredes, ubicado en Culiacán, Sinaloa, México, a $24^\circ 37' 24.40''$ y 38 m de altitud, las temperaturas mínima y máxima promedio fueron 15.2 y 29.6 °C, respectivamente. Se utilizó papa variedad Agatha, cultivada en un sistema hidropónico de subirrigación en circuito cerrado, integrado por 72 recipientes de plástico con capacidad de 20 L cada uno, conectados cada par de recipientes con manguera de hule de 1.25 cm de diámetro. Uno de los recipientes contenía 15 L de fibra de coco como sustrato y en el otro 10 L de la solución nutritiva (SN) correspondiente. En los recipientes que contenían la fibra se colocaron los tubérculos, a 10 cm de profundidad, uno por recipiente. La separación entre las hileras fue 1 m y entre plantas en cada hilera fue 0.3 m, con una densidad de siembra de 33 333.3 plantas ha^{-1} .

El diseño experimental fue bloques completos al azar con arreglo factorial de tratamientos 3^2 y cuatro repeticiones para un total de 36 unidades experimentales, donde cada unidad consistió de una planta de papa. Los factores y niveles evaluados fueron: 1) tres relaciones (40/100, 60/100 y 80/100) porcentuales NO_3^- /aniones (NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-}); y 2) tres relaciones (15/100, 35/100 y 55/100) porcentuales K^+ /cationes (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) (Cuadro 1). Al combinar las tres relaciones porcentuales NO_3^- /aniones con las tres relaciones porcentuales K^+ /cationes resultaron nueve SN, las cuales se diseñaron a partir de modificaciones de la solución universal de Steiner (1984), cuya relación porcentual entre los aniones NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-} , es 60, 5 y 35 y entre los cationes K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} es 35, 45 y 20 y consistieron en variar la concentración de NO_3^- con relación a H_2PO_4^- y SO_4^{2-} , así como la concentración de K^+ con respecto a Ca^{2+} y Mg^{2+} (Cuadro 1).

Cuadro 1. Relaciones porcentuales entre los iones de las soluciones nutritivas utilizadas.

NO_3^- (%)	H_2PO_4^- (%)	SO_4^{2-} (%)	K^+ (%)	Ca^{2+} (%)	Mg^{2+} (%)
40	7.5	52.5	15	58.85	26.15
60	5	35	15	58.85	26.15
80	2.5	17.5	15	58.85	26.15
40	7.5	52.5	35	45	20
60	5	35	35	45	20
80	2.5	17.5	35	45	20
40	7.5	52.5	55	31.15	13.85
60	5	35	55	31.15	13.85
80	2.5	17.5	55	31.15	13.85

Las SN se prepararon con agua de riego con una CE de 0.3 dS m^{-1} y pH de 7, clasificada C1S1 (riesgo bajo de salinización y sodificación) (Ayers y Westcot, 1985), considerando en la formulación de las SN los nutrientes presentes en el agua. Como fuentes de macronutrientes se usaron fertilizantes: nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, fosfato monopotásico. Los micronutrientes se aportaron como reactivos químicos (ácido bórico, sulfato de zinc, sulfato de manganeso, sulfato de cobre y quelato de hierro).

A las SN se les añadieron las concentraciones de micronutrientes (mg L^{-1}) siguientes: Fe 2.5, Mn 0.5, B 0.5, Cu 0.02 y Zn 0.05 (Parra *et al.*, 2010). Las SN se ajustaron a un potencial osmótico de -0.072 MPa (Cuadro 2), de acuerdo con Steiner (1984). Se aplicó un riego diario a la fibra de coco y diariamente se repuso el agua evapotranspirada, mediante aforo con agua de riego, sin ajustar el pH de las SN, las cuales se renovaron cada 15 d, utilizando como criterio de cambio una reducción del 50% de la CE inicial de las SN. A los 85 d después de la siembra se evaluó: rendimiento (kg ha^{-1}), número y diámetro de tubérculos (diámetros menores de 12 mm no fueron contabilizados), materia seca de tubérculos (MST) y la concentración nutrimental en hojas, tallos y frutos.

Cuadro 2. Composición química (molc m^{-3}) de las soluciones nutritivas empleadas en el experimento.

NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
9.14	1.71	12	3.43	13.45	5.98
12.86	1.07	7.5	3.21	12.61	5.6
16.13	0.5	3.53	3.03	11.87	5.27
8.5	1.59	11.15	7.43	9.56	4.25
12	1	7	7	9	4
15.12	0.47	3.31	6.61	8.5	3.78
7.93	1.49	10.41	10.91	6.18	2.75
11.25	0.94	6.56	10.31	5.84	2.6
14.22	0.44	3.11	9.78	5.54	2.46

La MST se cuantificó considerando los pesos frescos y secos del tubérculo, los cuales se obtuvieron al secar los tubérculos frescos a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 48 h. La biomasa fue separada en sus componentes: hojas, tallos y tubérculos, los cuales se secaron a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante, se molieron y se pasaron por un tamiz de 0.5 mm de diámetro. El N se determinó por el procedimiento semi-micro Kjeldahl (Etchevers, 1987) modificado para incluir nitratos. El fósforo se cuantificó por el método amarillo vanadato molibdato (Rodríguez y Rodríguez, 2002), calcio y magnesio por titulación con EDTA (Chavira y Castellanos, 1987) y el potasio por flamometría (Alcántar y Sandoval, 1999). El análisis de varianza y de correlación de las variables consideradas se realizó para los factores principales y para su interacción, con el paquete estadístico SAS, versión 9.4 (SAS, 2013). Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

Resultados y discusión

Análisis nutrimental en hojas. La interacción entre NO_3^- /aniones y K^+ /cationes fue significativa para las concentraciones de P, K, Ca y Mg y la relación NO_3^- /aniones afectó ($p \leq 0.01$) la concentración de N (Cuadro 3).

Cuadro 3. Efecto de la relación NO_3^- /aniones y K^+ /cationes en la solución nutritiva y la concentración de N, P, K, Ca y Mg en hojas de plantas de papa.

Factor	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Relación porcentual de NO_3^- /aniones					
40/100	4.3 c	0.34 a	5.8 a	4.8 a	1.4 a
60/100	5.4 b	0.27 ab	5.6 a	3.2 c	1.3 a
80/100	6 a	0.2 b	5.4 a	4 b	1.5 a
Relación porcentual de K^+ /cationes					
15/100	5.3 a	0.29 a	5.8 a	5.2 a	1.8 a
35/100	4.1 a	0.25 a	5.9 a	4.0 b	1.4 b
55/100	5.3 a	0.26 a	5.1 a	2.9 c	1 c
Media	5.23	0.27	5.59	4.02	1.42
Desviación estándar	1.01	0.15	1.02	1.63	0.54
NO_3^- /aniones x K^+ /cationes	ns	**	**	**	**

Medias con letras iguales en cada columna y para cada factor, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

Los porcentajes de P obtenidos con las tres relaciones K^+ /cationes fueron diferentes para las relaciones 40 y 60/100 NO_3^- /aniones. En la relación 40/100 NO_3^- /aniones la mayor concentración de P (0.47%) se obtuvo con 55/100 K^+ /cationes y al aumentar la relación a 60/100 NO_3^- /aniones la concentración de P (0.11%) se redujo significativamente (Cuadro 4), posiblemente por la menor proporción de P (5%) en la relación 60/100 NO_3^- /aniones, comparado con 40/100 NO_3^- /aniones (7.5% de P) (Cuadro 1). Dechassa *et al.* (2003) mencionan que concentraciones bajas de P limitan el transporte de este elemento a las raíces reduciendo la absorción. Los resultados de Soratto *et al.* (2015) en papa (*Solanum tuberosum* L.) coinciden con lo encontrado en este estudio, debido a que ellos también reportaron mayor concentración de P en las hojas con los aumentos de P en la SN.

Con la combinación 80/100 NO_3^- /aniones y 15/100 K^+ /cationes se obtuvo la mayor concentración de K (6.5%) y al incrementar a 35 y 55/100 K^+ /cationes la concentración fue reducida 18.5 y 32.3% al obtener 5.3 y 4.4% de K, lo que puede atribuirse al mayor porcentaje de Ca (58.85%) en la combinación 80/100 NO_3^- /aniones y 15/100 K^+ /cationes, ya que el Ca estimuló la absorción de K al estabilizar el pH de la solución (Marschner, 1995). Este resultado coincide parcialmente con lo reportado por Kavvadias *et al.* (2012), quienes obtuvieron menor concentración de K (3.7%) en las hojas de papa con aplicaciones de 450 kg de K_2O ha⁻¹, respecto a 112 y 225 kg de K_2O ha⁻¹ (5.6 y 4% de K en hojas, respectivamente).

Referente al Ca, con la combinación 40 NO_3^- /aniones y 15/100 K^+ /cationes se obtuvo la mayor concentración de Ca (6.3%) y la menor (0.6% de Ca) con 60/100 NO_3^- /aniones y 55/100 K^+ /cationes (Cuadro 4). Con la combinación 60/100 NO_3^- /aniones y 15/100 K^+ /cationes se obtuvo la mayor concentración de Mg (2.3%) y la menor (0.6%) con 60/100 NO_3^- /aniones y 55/100 K^+ /cationes (Cuadro 4).

Cuadro 4. Efecto de la interacción NO₃⁻/aniones x K⁺/cationes en la solución nutritiva en la concentración de P, K, Ca y Mg en hojas de papa.

Factor	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
NO ₃ ⁻ /aniones x K ⁺ /cationes				
40/100 x 15/100	0.35 abc	5 ab	6.3 a	1.8 ab
60/100 x 15/100	0.28 abc	5.9 ab	4.3 b	2.2 a
80/100 x 15/100	0.26 abc	6.5 a	4.9 ab	1.5 bc
40/100 x 35/100	0.2 bc	6.5 a	4 b	1.1 c
60/100 x 35/100	0.42 ab	5.9 ab	4.7 ab	1.5 bc
80/100 x 35/100	0.14 c	5.3 ab	3.1 b	1.6 bc
40/100 x 55/100	0.47 a	6 ab	4.2 b	1.3 bc
60/100 x 55/100	0.11 c	5 ab	0.6 c	0.3 d
80/100 x 55/100	0.21 abc	4.4 b	4 b	1.4 bc

Medias con letras iguales en cada columna, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

Las reducciones en las concentraciones de Ca y de Mg en hojas obtenidas con la relación 55/100 K⁺/cationes son atribuidas al antagonismo del K sobre el Ca (Kavvadias *et al.*, 2012) y el Mg (Fageria, 2001), porque a mayor proporción de K en la solución nutritiva (SN), menores concentraciones de Ca y Mg en las hojas. Con la relación 80/100 NO₃⁻/aniones en la SN se obtuvo la mayor concentración de N (6%), mientras que la menor (4.3% de N) con 40 NO₃⁻/aniones (Cuadro 3). Geary *et al.* (2015) reportaron concentraciones de 3.1 a 6.5% de N en hojas de papa cultivar Russets Burbanks al usar 20 a 320 mg N L⁻¹ de solución en un sistema hidropónico cerrado, concentraciones de N parecidas a las obtenidas en el presente trabajo. Los promedios de las concentraciones nutrimentales en hojas tuvieron el orden K > N > Ca > Mg > P y las concentraciones de Ca y K variaron más que las concentraciones de N, Mg y P, basado en sus desviaciones estándares (Cuadro 3).

Kavvadias *et al.* (2012) reportaron promedios de N > K > Ca > Mg > P en hojas de papa cultivar Spunta, cultivada en suelo, valores muy parecidos a los obtenidos en el presente trabajo, además estos autores indican que K y N tuvieron mayor variación respecto a Ca, Mg y P. El N en la hoja fue positiva y significativamente correlacionado con la relación NO₃⁻/aniones ($r = 0.73^{**}$) y negativamente con la concentración de P en la hoja (-0.38^*). Esta correlación positiva indica que al aumentar la concentración de NO₃⁻ en la SN aumentó la concentración de N en hoja, lo que coincide con Kavvadias *et al.* (2012) y con Geary *et al.* (2015), mientras que la correlación negativa encontrada en la concentración de P en hojas se explica porque la concentración de P fue reducida con los aumentos de NO₃⁻ en la SN. La relación K⁺/cationes en la SN tuvo una correlación negativa y significativa con las concentraciones de Ca en las hojas (-0.58^{**}) y de Mg (-0.65^{**}), ya que incrementos en la relación K⁺/cationes en la SN redujeron las concentraciones de Ca y Mg en las hojas.

Análisis nutrimental en tallos aéreos. Las concentraciones de K, Ca y Mg fueron afectadas ($p \leq 0.01$) por la interacción NO₃⁻/aniones x K⁺/cationes (Cuadro 5). Los mayores valores de K (8.4 y 9%) se obtuvieron con las combinaciones 60/100 y 80/100 NO₃⁻/aniones con 55/100 K⁺/cationes y la menor concentración de K (4.7%) con 60/100 NO₃⁻/aniones y 15/100 K⁺/cationes (Cuadro 6), lo

que puede deberse a que estos órganos acumulan K para cubrir la demanda de K de las hojas y de los tubérculos, ya que el cultivo de papa absorbe mayor cantidad de K que de N y P (Panagiotopoulos, 1995). Respecto al Ca, la mayor concentración (2.7%) fue obtenida con la relación 15/100 K⁺/cationes combinada con 40/100, y la menor concentración (0.5% de Ca) con la mezcla 60/100 NO₃⁻/aniones y 55/100 K⁺/cationes (Cuadro 6).

Cuadro 5. Efecto de la relación NO₃⁻/aniones y K⁺/cationes en la solución nutritiva y la concentración de N, P, K, Ca y Mg en tallos aéreos de plantas de papa.

Factor	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Relación porcentual de NO ₃ ⁻ /aniones					
40/100	2.3 b	0.39 a	5.9 a	2.2 a	1.3 a
60/100	3.3 a	0.26 b	7 a	1.7 a	1.1 a
80/100	3.7 a	0.25 b	7.2 a	2 a	1.5 a
Relación porcentual de K ⁺ /cationes					
15/100	3.7 a	0.3 ab	5.8 b	2.5 a	1.5 a
35/100	2.6 b	0.38 a	6.3 b	1.9 b	1.5 a
55/100	3 b	0.22 b	7.9 a	1.6 b	0.9 b
Media	3.1	0.3	6.7	1.9	1.3
Desviación estándar	1.02	0.14	1.91	0.75	0.49
NO ₃ ⁻ /aniones x K ⁺ /cationes	ns	ns	**	**	**

Medias con letras iguales en cada columna y para cada factor, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

Cuadro 6. Efecto de la interacción NO₃⁻/aniones x K⁺/cationes en la solución nutritiva en la concentración de K, Ca y Mg en tallos aéreos de papa.

Factor	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
NO ₃ ⁻ /aniones x K ⁺ /cationes			
40/100 x 15/100	5.8 abc	2.7 a	1.4 a
60/100 x 15/100	4.7 c	2.3 ab	1.7 a
80/100 x 15/100	7.2 abc	2.4 a	1.4 a
40/100 x 35/100	5.6 abc	1.8 ab	1.3 a
60/100 x 35/100	8 abc	2.4 a	1.4 a
80/100 x 35/100	5.3 bc	1.4 bc	1.7 a
40/100 x 55/100	6.3 abc	2 ab	1.2 a
60/100 x 55/100	8.4 ab	0.5 c	0.3 b
80/100 x 55/100	9 a	2.2 ab	1.2 a

Medias con letras iguales en cada columna, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

La concentración de Mg en tallos tuvo un patrón similar al de Ca, ya que la mayor concentración (1.7% de Mg) se obtuvo con la relación 15/100 K⁺/cationes y la menor (0.3%) con la relación 55/100 K⁺/cationes (Cuadro 6). Las reducciones en las concentraciones de Ca y Mg obtenidas con

la combinación 55/100 K⁺/cationes y 60/100 NO₃⁻/aniones es un reflejo del antagonismo del K sobre el Ca y Mg (Fageria, 2001; Kleiber *et al.* 2012); por ello, la relación K⁺/cationes en la solución nutritiva tuvo una correlación negativa y significativa con las concentraciones de Ca en tallos (-0.5^{**}) y de Mg (-0.51^{**}).

En contraste, la relación K⁺/cationes tuvo una correlación positiva y significativa (0.46^{**}) con la concentración de K en los tallos, ya que al aumentar dicha relación las concentraciones de este elemento en los tallos fueron incrementadas. Las concentraciones de N y de P en los tallos fueron afectados ($p \leq 0.05$) por las relaciones NO₃⁻/aniones y K⁺/cationes en la SN, las mayores concentraciones de N (3.7%) y de P (0.39%) se obtuvieron con la relación 80/100 NO₃⁻/aniones y con 40/100 NO₃⁻/aniones, respectivamente (Cuadro 5), atribuido a las mayores concentraciones de N y P en estas SN (Cuadro 2). Debido a la falta de investigaciones realizadas a nivel mundial sobre el análisis nutrimental en tallos de papa no fue posible comparar con otros trabajos científicos los resultados obtenidos en el presente estudio, ya que en la totalidad de los estudios consultados solo se analizan hojas y tubérculos.

Análisis nutrimental en tubérculos. La interacción NO₃⁻/aniones x K⁺/cationes fue significativa ($p \leq 0.01$) para las concentraciones de Ca y Mg, mientras que la relación porcentual NO₃⁻/aniones afectó la concentración de N y la relación porcentual K⁺/cationes fue diferente para la concentración de K (Cuadro 7).

Cuadro 7. Efecto de la relación NO₃⁻/aniones y K⁺/cationes en la solución nutritiva y la concentración de N, P, K, Ca y Mg en tubérculos de papa.

Factor	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Relación porcentual de NO ₃ ⁻ /aniones					
40/100	2.9 b	0.43 a	1.8 a	0.4 b	0.3 b
60/100	3.8 a	0.42 a	1.8 a	1.0 a	0.7 a
80/100	3.6 a	0.44 a	1.8 a	0.4 b	0.3 b
Relación porcentual de K ⁺ /cationes					
15/100	3.6 a	0.44 a	2.1 a	1.2 a	0.7 a
35/100	3.2 a	0.38 a	1.7 b	0.3 b	0.3 b
55/100	3.5 a	0.46 a	1.6 b	0.4 b	0.2 b
NO ₃ ⁻ /aniones x K ⁺ /cationes	ns	ns	ns	**	**

Medias con letras iguales en cada columna y para cada factor, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

El mayor valor de Ca (2.3%) se obtuvo con la combinación 60/100 NO₃⁻/aniones y 15/100 K⁺/cationes y los menores (0.4 y 0.3% de Ca) con 55 y 35/100 K⁺/cationes. La mayor concentración de Mg (1.7%) fue obtenida con 60/100 NO₃⁻/aniones y 15/100 K⁺/cationes y los menores, los cuales fueron estadísticamente iguales entre sí (0.3 y 0.2% de Mg) con 35 y 55/100 K⁺/cationes (Cuadro 8).

Cuadro 8. Efecto de la interacción NO₃⁻/aniones x K⁺/cationes en la solución nutritiva en la concentración de Ca y Mg en tubérculos de papa.

Factor	Ca (%)	Mg (%)
NO ₃ ⁻ /aniones x K ⁺ /cationes		
40/100 x 15/100	0.6 b	0.3 b
60/100 x 15/100	2.3 a	1.7 a
80/100 x 15/100	0.7 b	0.3 b
40/100 x 35/100	0.3 b	0.3 b
60/100 x 35/100	0.3 b	0.2 b
80/100 x 35/100	0.3 b	0.3 b
40/100 x 55/100	0.4 b	0.2 b
60/100 x 55/100	0.4 b	0.2 b
80/100 x 55/100	0.3 b	0.2 b

Medias con letras iguales en cada columna, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

Las menores concentraciones de Ca y Mg obtenidas por las combinaciones NO₃⁻/aniones con 55/100 K⁺/cationes se atribuyen principalmente al antagonismo del K con el Ca y el Mg (Kleiber *et al.*, 2012) debido a la alta proporción de K⁺ (55%) en la SN respecto al Ca²⁺ (31.15%) y al Mg²⁺ (13.85%), lo que genera mayor disponibilidad de K y menor de Ca y de Mg en la SN (Cuadro 1), por ello la relación K⁺/cationes en la SN tuvo una correlación significativa y negativa con las concentraciones de Ca (-0.53**) y Mg (-0.44**) en los tubérculos. Las relaciones 60 y 80/100 NO₃⁻/aniones aumentaron estadísticamente la concentración de N en el tubérculo, respecto a 40/100 NO₃⁻/aniones (Cuadro 7), lo que coincide con Öztürk *et al.* (2010), quienes mencionan que aplicaciones crecientes de N aumentaron la concentración de N en los tubérculos y difiere de Kavvadias *et al.* (2012) y de Biemond y Vos (1992) quienes reportaron que las aplicaciones crecientes de N no aumentaron la concentración de este nutriente en el tubérculo. La relación 15/100 K⁺/cationes en la SN aumentó ($p \leq 0.05$) la concentración de K en el tubérculo, respecto a 35 y 55/100 K⁺/cationes, posiblemente a que las concentraciones de K en estas dos relaciones fueron excesivas, lo que contribuyó a generar un desbalance nutricional, que se manifestó con concentraciones menores de K, Ca y Mg en los tubérculos (Cuadro 7).

Rendimiento y sus componentes. El análisis de varianza no mostró efectos significativos de las relaciones NO₃⁻/aniones y K⁺/cationes, ni la interacción NO₃⁻/aniones x K⁺/cationes en el rendimiento, la materia seca del tubérculo, el diámetro y el número de tubérculos. Sin embargo, los factores NO₃⁻/aniones y K⁺/cationes afectaron ($p \leq 0.05$) el índice de cosecha (IC) (Cuadro 9). Las relaciones 60 y 80/100 NO₃⁻/aniones en la SN redujeron significativamente el IC comparado con la relación 40/100 NO₃⁻/aniones, atribuido a un retraso en la formación del tubérculo y a una disminución en su crecimiento (Allison *et al.*, 2001), provocado por una elevada fertilización nitrogenada (Vos, 1997), lo que redujo la translocación de C a las hojas y tubérculos y aumentó el flujo de este elemento a las hojas jóvenes, en lugar de los tubérculos (Mohamed *et al.*, 2017).

Cuadro 9. Efecto de la relación NO₃⁻/aniones y K⁺/cationes en la solución nutritiva sobre el diámetro de tubérculo (DT), materia seca del tubérculo (MST), número de tubérculos (NT), índice de cosecha (IC) y el rendimiento de papa.

Factor	DT (mm)	MST (%)	NT	IC	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Relación NO ₃ ⁻ /aniones					
40/100	42 a	16 a	17 a	0.44 a	31.43 a
60/100	39 a	15 a	22 a	0.3 b	37.15 a
80/100	47 a	17 a	16 a	0.34 b	30.95 a
Relación K ⁺ /cationes					
15/100	40 a	14 a	23 a	0.3 b	35.27 a
35/100	48 a	17 a	16 a	0.4 a	33.01 a
55/100	41 a	17 a	16 a	0.38 a	30.74 a
NO ₃ ⁻ /aniones x K ⁺ /cationes	ns	ns	ns	ns	ns

Medias con letras iguales en cada columna, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

Con las relaciones 35 y 55/100 K⁺/cationes se obtuvieron los mayores IC (0.4 y 0.38), mientras que el menor IC (0.3) fue obtenido con 15/100 K⁺/cationes, lo cual implica que las plantas desarrolladas con 35 y 55/100 K⁺/cationes en la SN destinaron una mayor proporción de asimilados al tubérculo, lo que coincide con Singh y Lal (2012). La materia seca del tubérculo (MST) es importante para el destino de la producción, porque un alto contenido de MST favorece la industrialización de papa (Pritchard y Scanlon, 1997). Con la relación NO₃⁻/aniones se obtuvo un promedio 16% de MST y con la relación K⁺/cationes 14% de MST; estos valores son bajos, considerando los criterios de calidad propuestos por Cacace *et al.* (1994), por lo que el uso más adecuado de estos tubérculos es para su consumo en fresco y no para deshidratar o freír.

Kavvadias *et al.* (2012) reportaron 9 y 16.8% de MST, mientras que Badillo *et al.* (2004) obtuvieron 25.9 y 26.9% de MST y Öztürk *et al.* (2010) reportaron 20 a 20.6% de MST. Las variaciones en la MST están relacionadas con los materiales genéticos usados, condiciones ambientales prevalecientes, fertilización utilizada y el manejo agronómico. Allison *et al.* (1998) y Sharma y Arora (1987) mencionan que el número de tubérculos no fue afectado por la fertilización nitrogenada ni por la potásica, lo que coincide con el presente estudio. Con la relación 60/100 NO₃⁻/aniones se obtuvo el mayor rendimiento de tubérculo fresco (37.15 t ha⁻¹), valor estadísticamente ($p \leq 0.05$) similar a los obtenidos con las relaciones 40 y 80/100 NO₃⁻/aniones (31.43 y 30.95 t ha⁻¹, respectivamente).

Respecto a la relación K⁺/cationes el mayor rendimiento (35.27 t ha⁻¹) se obtuvo con 15/100 K⁺/cationes, valor igual ($p \leq 0.05$) a los conseguidos con 35/100 K⁺/cationes (33.01 t ha⁻¹) y con 55/100 K⁺/cationes (30.74 t ha⁻¹) (Cuadro 9). Kang *et al.* (2014) reportaron que aplicaciones crecientes de K no aumentaron el rendimiento, lo que coincide con el presente estudio; mencionan que la absorción de K por las plantas aumentó con los incrementos de K, lo que sugiere que el cultivo de papa absorbe más K que el requerido cuando la disponibilidad de K es alta.

Generalmente se considera que el cultivo de papa responde a la fertilización potásica, por lo que se aplican altas cantidades de este elemento (Kavvadias *et al.*, 2012). Los datos de este estudio indican que, para las condiciones en que se desarrolló este trabajo, la relación 15/100 K^+ /cationes es la más adecuada, por lo que relaciones mayores de K^+ /cationes no son necesarias. El máximo rendimiento (40.36 t ha^{-1}) se obtuvo con la combinación 60/100 NO_3^- /aniones y 15/100 K^+ /cationes, valor no significativo respecto a las otras combinaciones, mientras que el menor (27.79 t ha^{-1}) fue obtenido con la combinación 80/100 NO_3^- /aniones y 55/100 K^+ /cationes (Figura 1).

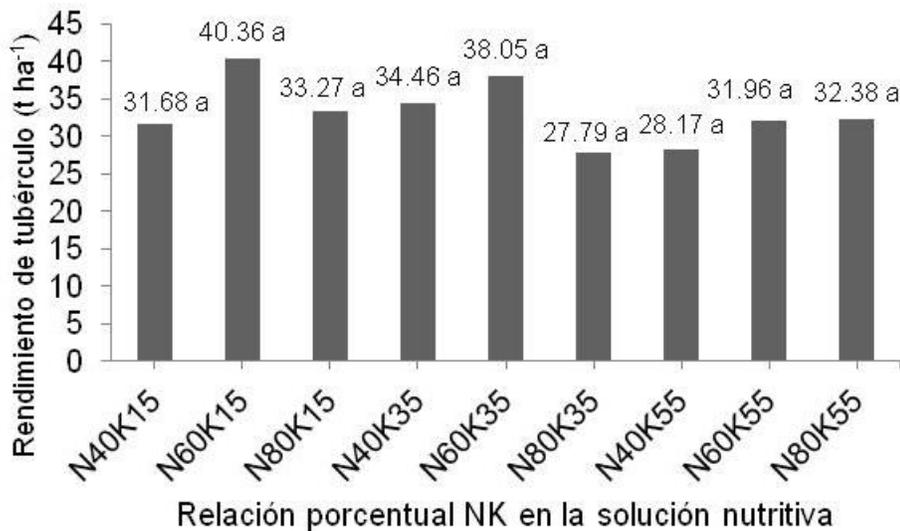


Figura 1. Efecto de las relaciones porcentuales NK en la solución nutritiva en el rendimiento de tubérculo.

Conclusiones

Las relaciones NO_3^- /aniones y K^+ /cationes y la interacción NO_3^- /aniones x K^+ /cationes no afectaron el rendimiento, la materia seca del tubérculo, el diámetro y el número de tubérculos. La interacción NO_3^- /aniones x K^+ /cationes redujo las concentraciones de Ca y Mg en hojas, tallos y tubérculos por antagonismo del K con estos elementos. Para reducir los costos de fertilización en la producción de papa, en un sistema hidropónico cerrado y fibra de coco como sustrato la relaciones NO_3^- /aniones y K^+ /cationes deben ser 40/100 y 15/100, respectivamente.

Literatura citada

- Alcántar, G. G. y Sandoval, V. M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, AC. Chapingo, Estado de México. 155 p.
- Allison, M. F.; Fowler, J. H. and Allen, E. J. 1998. Potassium, magnesium and nitrogen nutrition of Estima. British Potato Council. Oxford Business Park South. 35 p.
- Allison, M. F.; Fowler, J. H. and Allen, E. J. 2001. Responses of potato (*Solanum tuberosum*) to potassium fertilizers. J. Agric. Sci. 136:407-428.

- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. 1985. Water quality for agriculture. FAO. Irrigation and Drainage. Paper 29 Rev.1, Roma. 174 p.
- Badillo, T. V.; Castellanos, R. J. Z.; Muñoz, R. J. J.; Sánchez, G. P.; Villalobos, R. S. y Vargas, T. P. 2004. Demanda nutrimental del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv alpha, en la región del bajío. Rev. Chapingo Ser. Hortic. 10(1):67-74.
- Bertsch, H. F. 2009. Absorción de nutrimentos por los cultivos. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 308 p.
- Biamond, H. and Vos, J. 1992. Effects of nitrogen on the development and growth of the potato plant, 2: the partitioning of dry matter, nitrogen, and nitrate. Annals Bot. 70(1):37-45.
- Cacace, J. E.; Huarte, M. A. and Monti, M. C. 1994. Evaluation of potato cooking quality in Argentina. Am. Potato J. 71(3):145-153.
- Chavira, R. J. C. y Castellanos, R. J. Z. 1987. Sales solubles. In: Aguilar, S. A.; Etchevers, J. D. y Castellanos, R. J. Z. (Eds.). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial Núm. 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. 109-124 pp.
- Dechassa, N.; Schenk, M. K.; Claassen, N. and Steingrobe, B. 2003. Phosphorus efficiency of cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. Capitata), carrot (*Daucus carota* L.), and potato (*Solanum tuberosum* L.). Plant Soil. 250:215-224.
- DOF. 2003. Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana NOM-041-FITO-2002. Requisitos y especificaciones fitosanitarias para la producción de material propagativo asexual de papa. 19 p.
- Etchevers, J. D. 1987. Determinación de nitrógeno en suelos. In: Aguilar, S. A.; Etchevers, J. D. y Castellanos, R. J. Z. (Eds.). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial Núm. 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. 45-83 pp.
- Errebhi, M.; Rosen, C. J.; Gupta, S. C. and Birong, D. E. 1998. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. Agron. J. 90:10-15.
- Fageria, N. K. 2001. Nutrient interactions in crop plants. Journal Plant Nutrition. 24:1269-1290.
- Geary, B.; Clark, J.; Hopkins, B. G. and Jolley, V. D. 2015. Deficient, adequate and excess nitrogen levels established in hydroponics for biotic and abiotic stress-interaction studies in potato. J. Plant Nutr. 38(1):41-50.
- Johnston, A. E. and Milford, G. F. J. 2009. Nitrogen and potassium interactions in crops. The Potash Development Association. PO Box 697, York, UK.
- Kan, W.; Fan, M.; Ma, Z.; Shi, X. and Zheng, H. 2014. Luxury absorption of potassium by potato plants. Am. J. Potato Res. 91:573-578.
- Kavvadias, V.; Paschalidis, C.; Akrivas, G. and Petropoulos, D. 2012. Nitrogen and potassium fertilization responses of potato (*Solanum tuberosum*) cv Spunta. Comm. Soil Sci. Plant Analysis. 43(1-2):176-189.
- Kleiber, T.; Golcz, A. and Kresinski, W. 2012. Effect of magnesium nutrition of onion (*Allium cepa* L.). Part I. Yielding and nutrient status. Ecol. Chem. Eng. 19(1):97-105.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Ed. Academic Press. Limited, London. 889 p.
- Mohamed, M. E. E.; Wathier, M.; Zaniccio, C. J. and Santos, H. S. R. 2017. Dry matter accumulation and potato productivity with green manure. IDESIA. 35:79-86.
- O'Brien, P. J.; Allen, E. J. and Firman, D. M. 1998. A review of some studies into tuber initiation in potato (*Solanum tuberosum*) crops. J. Agric. Sci. 130:251-270.
- Öztürk, E.; Kavurmaci, Z.; Kara, K. and Polat, T. 2010. The effects of different nitrogen and phosphorus rates on some quality traits of potato. Potato Res. 53:309-3012.

- Panagiotopoulos, L. I. 1995. Fertilization of potato crops. *Agriculture-Cattle Breeding*. 9:227-231.
- Parra, T. S.; Salas, N. E.; Villarreal, R. M.; Hernández, V. S. y Sánchez, P. P. 2010. Relaciones nitrato/amonio/urea y concentraciones de potasio en la producción de plántulas de tomate. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 16(1):37-46.
- Pritchard, M. K. and Scanlon, M. G. 1997. Mapping dry matter and sugars in potato tubers for prediction of whole tuber process quality. *Canadian J. Plant Sci.* 77(3):461-467.
- Rodríguez, H. y Rodríguez, J. 2002. Métodos de análisis de suelos y plantas: criterios de interpretación. Editorial Trillas: UANL. 196 p.
- Sánchez, del C. F.; González, M. L.; Moreno, P. E.; Pineda, P. J. y Reyes, G. C. E. 2014. Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Rev. Fitotec. Mex.* 37:261-269.
- Sharma, U. C. and Arora, B. R. 1987. Effect of nitrogen, phosphorus, and potassium application on yield of potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). *J. Agric. Sci.* 108(1):321-329.
- SIAP. 2016. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. Cierre de la producción agrícola por estado. www.siap.gob.mx.
- Sifuentes, I. E.; Ojeda, B. W.; Mendoza, P. C.; Macias, C. J.; Ruelas, I. J. del R. y Inzunza, I. M. A. 2013. Nutrición del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) considerando variabilidad climática en el “Valle del Fuerte” Sinaloa, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4:585-597.
- Singh, S. K. and Lal, S. S. 2012. Effect of potassium nutrition on potato yield, quality and nutrient use efficiency under varied levels of nitrogen application. *Potato J.* 39(2):155-165.
- Soratto, R. P.; Pilon, C.; Fernández, A. M. and Moreno, L. A. 2015. Phosphorus uptake, use efficiency, and response of potato cultivars to phosphorus levels. *Potato Res.* 58:121-134.
- SAS Institute Inc. (Statistical Analysis System). 2013. User's guide. Version 9.4 Cary, N. C. USA.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. Sixth Int. Congr. on Soilless Culture. ISOSC Proceeding. The Netherlands. 633-649 pp.
- Vitosh, L. M. and Jacobs, L.W. 1990. Nutrient management to protect water quality. East Lansing: Michigan State University. http://www.cauky.edu/enri/pubs/enri-110mananging_nutrientsrev-vitosh.pdf.
- Vos, J. 1997. The nitrogen response of potato (*Solanum tuberosum* L.) in the field nitrogen uptake and yield, harvest index, and nitrogen concentration. *Potato Res.* 40(2):237-248.