

CLORURO/ANIONES Y SODIO/CACIONES EN SOLUCIONES NUTRITIVAS Y COMPOSICIÓN MINERAL DE CULTIVARES DE TOMATE

Chloride/Anions and Sodium/Cations Ratios in the Nutrient Solution and Mineral Composition of Tomato Cultivars

Saúl Parra Terraza^{1‡}

¹ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. Carretera Culiacán-El Dorado km 17.5. Apdo. Postal 726. 80000 Culiacán, Sinaloa, México.

[‡] Autor responsable (saul.parra@uas.edu.mx)

RESUMEN

Problemas de sanidad en suelos del valle de Culiacán ha ocasionado que la siembra de tomate se realice en suelos cercanos a la costa, donde el agua de riego es de menor calidad, por contener concentraciones de cloro (Cl) y sodio (Na) con riesgo de toxicidad para las plantas o de interactuar con los nutrientes de la solución nutritiva (SN), reduciendo su disponibilidad. Esta investigación evaluó en invernadero los efectos de relaciones Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la SN sobre las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas y tallos de dos cultivares de tomate (*Solanum lycopersicum* L. cvs. Polaris e ISIS). El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 3², con cuatro repeticiones. Los factores fueron: 1) relación Cl⁻/aniones (25, 50 y 75/100), y 2) relación Na⁺/cationes (25, 50 y 75/100). Se realizó un análisis de varianza y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). En hojas del cultivar ISIS, la combinación 75/100 Na⁺/cationes y 25/100 Cl⁻/aniones aumentó la concentración de Na, mientras que las combinaciones 75/100 Na⁺/cationes con 25, 50 y 75/100 Cl⁻/aniones redujeron la concentración de K. La relación 75/100 Cl⁻/aniones en la SN redujo las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas del cultivar Polaris, y de Na, Ca y Mg en tallos de cultivar ISIS. La relación 75/100 Na⁺/cationes en la SN incrementó las concentraciones de Na en hojas y tallos de cultivar Polaris y disminuyó las concentraciones de Ca y Mg en hojas de cultivar ISIS. Los resultados de este estudio indican que una proporción de 75% de Cl⁻ en la SN, respecto al total de aniones, y una proporción de 50-75% de Na⁺, respecto al total de cationes, afectan las concentraciones nutrimentales en hojas y tallos de tomate de cultivares Polaris e ISIS.

Palabras clave: concentración de nutrimentos; desbalance nutrimental; salinidad.

SUMMARY

Health problems in soils of the Culiacan valley have resulted in moving tomato cultivation toward the coast, where irrigation water is of lower quality. The high Na and Cl concentrations in the water can cause toxicity to plants or, by interacting with the nutrient solution (SN), can reduce nutrient availability. The objective of this study was to evaluate the effects of Cl⁻ anion and Na⁺ cation ratios in the nutrient solution on concentrations of Na, K, Ca and Mg in leaves and stems of two cultivars of tomato (*Solanum lycopersicum* L. cvs. Polaris and ISIS) produced in greenhouse. The experimental design was completely random with a factorial 3² arrangements and four replications. The factors were 1) Cl⁻ anion (25, 50 and 75/100) ratios, and 2) Na⁺ cation (25, 50 and 75/100) ratios. An analysis of variance was performed and treatment means were compared using the Tukey test ($P \leq 0.05$). In ISIS leaves, application of 75/100 Na⁺/cations and 25/100 Cl⁻/anions increased Na concentration ($P \leq 0.05$), while 75/100 Na⁺/cations with 25, 50 and 75/100 Cl⁻/anion combinations reduced K concentration ($P \leq 0.05$). The 75/100 Cl⁻ anion ratio in the nutrient solution reduced Na, K, Ca and Mg concentrations in leaves of the Polaris cultivar and Na, Ca, Mg concentrations in stems of the ISIS cultivar. The 75/100 Na⁺ cation ratio in the nutrient solution increased Na concentration in leaves and stems of the Polaris cultivar and decreased Ca and Mg concentrations in leaves of the ISIS cultivar. The results of this study show that 75% of total Cl⁻ anions in the SN and 50-75% of total Na⁺ cations affect nutrient concentrations in leaves and stems of the Polaris and ISIS tomato cultivars.

Como citar este artículo:

Parra Terraza, Saúl. 2016. Relaciones cloruro/aniones y sodio/cationes en soluciones nutritivas y la composición mineral de dos cultivares de tomate. Terra Latinoamericana 34: 219-227.

Recibido: febrero de 2015. Aceptado enero de 2016.
Publicado en Terra Latinoamericana 34: 219-227.

Index words: *nutrient concentration; nutrient imbalance; salinity.*

INTRODUCCIÓN

El cloro (Cl) es un micronutriente para las plantas superiores y sus funciones en el metabolismo vegetal son diversas: regulador estomático, osmótico, enzimático y del pH celular, productor de oxígeno en la fotosíntesis, estabilizador del potencial de membrana, participante en la turgencia celular, y en la resistencia o tolerancia a enfermedades (Xu *et al.*, 2000; White y Broadley, 2001; Wenrong *et al.*, 2010). El efecto del Cl en los cultivos está bien documentado, pero en un gran número de casos su efecto se asocia al sodio (Na), cuyo exceso sería el principal responsable de la reducción del crecimiento, con poca atención al Cl (Tavakkoli *et al.*, 2011). El cloruro (Cl⁻) es el principal anión en la mayoría de los suelos salinos (Wenrong *et al.*, 2010) y una alta concentración de Cl⁻ en el suelo puede provocar relaciones extremas entre iones afectando el rendimiento de los cultivos (Fageria, 2001). El Na y Cl son igualmente importantes, ya que ambos pueden ser tóxicos para las plantas si se acumulan en altas concentraciones en el citoplasma (Teakle y Tyerman, 2010; Tavakkoli *et al.*, 2011).

El Na es un elemento considerado benéfico, porque estimula el crecimiento de algunas especies de plantas, por ejemplo la espinaca (*Amaranthus* sp.) y la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) (Marschner, 1995), pero para la mayoría de especies vegetales, altas concentraciones de Na afectan su crecimiento al generar deficiencias de K, Ca y Mg (Parida y Das, 2005) o toxicidad por Na (Tester y Davenport, 2003).

Altas concentraciones de Na⁺ y Cl⁻ en el medio afectan la absorción de N, P, K, Ca, S y Zn mediante interacciones de antagonismo y afectan la capacidad selectiva de las membranas (Shiyab *et al.*, 2013; Hussain *et al.*, 2015).

Sinaloa es el principal productor de tomate a nivel nacional; sin embargo, por problemas de sanidad en suelos provocados por nemátodos fitoparásitos y especies de *Fusarium oxysporum*, los horticultores sinaloenses están sembrando el tomate en suelos cercanos a la costa, donde el agua de riego es de menor calidad, contiene concentraciones de Cl y Na con restricción de uso por toxicidad (4-10 meq Cl L⁻¹ y 3-10 meq Na L⁻¹) (Hanson *et al.*, 2006). Altas relaciones de adsorción de Na en el agua de riego deterioran

las propiedades del suelo, afectan el rendimiento de los cultivos (Ghafoor *et al.*, 2004) y disminuyen la disponibilidad de Ca en los suelos y su absorción por las plantas (Imran *et al.*, 2010; Naeem *et al.*, 2013). Los iones Cl y Na pueden interactuar con los nutrientes de la solución nutritiva (SN) reduciendo su disponibilidad y provocando desbalances nutrimentales, deficiencias y toxicidad en las plantas (Tester y Davenport, 2003).

Los productores del valle de Culiacán usan SN de baja salinidad (CE < 2.5 dS m⁻¹) para la fertirrigación del tomate; estas SN están compuestas de seis macronutrientes (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y SO₄²⁻) y cinco micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn, y Mo). Aunque el Cl es un micronutriente esencial para las plantas no se aplica en las SN, porque los aportes de Cl de la atmósfera varían anualmente de 17.6 a 36 kg ha⁻¹ (Reynolds *et al.*, 1997), aunque las cantidades de Cl depositadas en los suelos mediante el riego y la fertilización pueden ser mayores a 1000 kg ha⁻¹ (White y Broadley, 2001), lo cual excede la demanda de las plantas, por lo que la toxicidad por Cl es un peligro latente. Poco se conoce del uso de SN de baja salinidad que contengan concentraciones de Cl y Na con peligro de provocar toxicidad a las plantas de tomate. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar los efectos principales y la interacción de tres relaciones de Cl/aniones (NO₃⁻, H₂PO₄⁻, SO₄²⁻, Cl⁻) [25/100, 50/100 y 75/100] y tres relaciones de Na⁺/cationes (Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺) [25/100, 50/100 y 75/100] en soluciones nutritivas, sobre la composición mineral (Na, K, Ca y Mg) de hojas y tallos en dos híbridos de tomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Desde el 14 de octubre al 9 diciembre de 2011 se realizaron dos experimentos en un invernadero del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), Coordinación Culiacán (24° 44' 01.3" N, 107° 27' 16.4" O; altitud de 26 m); la temperatura máxima promedio del aire fue 40.3 °C y la mínima 18 °C. Las semillas de tomate de crecimiento indeterminado cv. "Polaris", tipo roma, y cv. "ISIS", tipo bola, se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades con volumen individual de 30 cm³; como sustrato se utilizó una mezcla de turba y vermiculita (1:1 v/v). El diseño para ambos experimentos fue completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos 3², y cuatro repeticiones, para un total de 36 unidades experimentales por experimento, donde

cada unidad experimental consistió de 30 plántulas. Los factores y niveles evaluados fueron: 1) tres relaciones (25/100, 50/100 y 75/100) porcentuales Cl⁻/aniones (NO₃⁻, H₂PO₄⁻, SO₄²⁻, Cl⁻), y 2) tres relaciones (25/100, 50/100 y 75/100) porcentuales Na⁺/cationes (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺) (Cuadro 1). Al combinar las tres relaciones porcentuales Cl⁻/aniones con las tres relaciones porcentuales Na⁺/cationes resultaron nueve SN, las cuales se diseñaron a partir de modificaciones de la solución universal de Steiner (1984), ya que esta solución no incluye Cl⁻ ni Na⁺ en su composición, y consistieron en incrementar la concentración de Cl⁻ con relación a NO₃⁻, H₂PO₄⁻, SO₄²⁻, así como la concentración de Na⁺ con relación a K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺. En el Cuadro 2 se presenta la composición química de las SN, una vez que fueron calculadas y ajustadas a un potencial osmótico de -0.072 MPa, de acuerdo a los lineamientos propuestos por Steiner (1984). Las SN se prepararon con sales inorgánicas grado reactivo y agua destilada y 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. El Fe se proporcionó como Fe-EDTA y el pH de las SN se ajustó a 5.5±0.1 con HCl 1N o NaOH 1N. Diez días después de la siembra se inició la aplicación de las SN, cuyas concentraciones se incrementaron cada 10 d en el orden: 50, 75 y 100%. Las plántulas se regaron diariamente a las 08:00 y 14:00 h asperjando al follaje los tratamientos con atomizadores (1 L de capacidad) hasta el escurrimiento de la solución por los orificios inferiores

de las cavidades. Cuarenta días después de la siembra se evaluó el efecto de los factores sobre la composición mineral y se seleccionaron 20 plántulas por tratamiento de cada cultivar y se integraron en cuatro repeticiones compuestas, cada una, con cinco plántulas, las que se fraccionaron en hojas y tallos. En estos órganos se realizó el análisis químico para determinar las concentraciones de Na, K, Ca y Mg conforme a las metodologías reportadas por Motsara y Roy (2008). Na y K fueron determinados con un fotómetro de flama y Ca y Mg con espectrómetro de absorción atómica. El análisis de varianza de las variables consideradas se realizó para los factores principales y para su interacción, con el paquete estadístico SAS versión 8 (SAS, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de Nutrientes en Hojas y Tallos de Tomate “cv. Polaris”

No se encontró efecto significativo de la interacción Cl⁻/aniones × Na⁺/cationes para los nutrientes Na, K, Ca y Mg, por lo cual el análisis de los resultados fue para los efectos de los factores principales. Así, hubo diferencias ($P \leq 0.05$) en las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas debido a los niveles de la relación Cl⁻/aniones, donde al utilizar las relaciones 25/100 y 50/100 Cl⁻/aniones se obtuvieron valores más altos de las concentraciones de cationes, respecto a las hojas

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

Tratamiento	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ A [†]	K ⁺	Ca ₂ ⁺	Mg ₂ ⁺	Na ⁺	Σ C [‡]
----- % mol m ⁻³ -----										
1	45	3.75	26.25	25	100	26.25	33.75	15	25	100
2	30	2.50	17.50	50	100	26.25	33.75	15	25	100
3	15	1.25	8.75	75	100	26.25	33.75	15	25	100
4	45	3.75	26.25	25	100	17.50	22.5	10	50	100
5	30	2.50	17.50	50	100	17.50	22.5	10	50	100
6	15	1.25	8.75	75	100	17.50	22.5	10	50	100
7	45	3.75	26.25	25	100	8.75	11.25	5	75	100
8	30	2.50	17.50	50	100	8.75	11.25	5	75	100
9	15	1.25	8.75	75	100	8.75	11.25	5	75	100

[†] Sumatoria de aniones; [‡] Sumatoria de cationes.

Cuadro 2. Composición química de las soluciones nutritivas usadas en el experimento.

Tratamiento	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	CE [‡]
	----- mol _c m ⁻³ -----								
1	8.31	0.69	4.84	4.61	4.84	6.23	2.77	4.61	2.10
2	5.39	0.45	3.15	9.00	4.72	6.07	2.70	4.50	2.10
3	2.63	0.22	1.53	13.14	4.60	5.91	2.63	4.38	2.10
4	7.91	0.66	4.61	4.39	3.08	3.96	1.76	8.79	2.02
5	5.14	0.43	3.00	8.57	3.00	3.86	1.71	8.57	2.02
6	2.51	0.21	1.46	12.54	2.93	3.76	1.67	8.36	2.02
7	7.55	0.63	4.40	4.19	1.47	1.89	0.84	12.58	2.00
8	4.91	0.41	2.87	8.19	1.43	1.84	0.82	12.28	2.00
9	2.40	0.20	1.40	12.00	1.40	1.80	0.80	12.00	2.00

‡ CE = conductividad eléctrica en dS m⁻¹.

donde se utilizó las relaciones 75/100 Cl⁻/aniones (Cuadro 3). Hubo una relación inversa entre la relación Cl⁻/aniones y las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas, ya que al incrementar de 25/100 a 75/100 la relación Cl⁻/aniones en la SN, las concentraciones de los nutrimentos disminuyeron 36.5, 16.7, 25 y 26.3%, respectivamente. La reducción de Na, K, Ca, y Mg es difícil de explicar, por la carencia de trabajos realizados en condición de baja salinidad y alta proporción de Cl⁻ en la SN; en la relación 75/100 Cl⁻/aniones hubo una mayor absorción de Cl en hojas (3.84%), la cual es alta, considerando un rango óptimo de 0.2 a 0.4 g Cl kg⁻¹ de materia seca (Marschner, 1995), equivalentes a 0.02 a 0.04% de Cl, aunque las plantas usualmente contienen de 2 a 20 g Cl kg⁻¹ de materia seca (0.2 a 2% de Cl)

Cuadro 3. Concentración de Na, K, Ca y Mg en hojas de plántulas de tomate cv. Polaris por efecto de las relaciones de Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva.

Factor	Na	K	Ca	Mg
	----- % -----			
Relación porcentual de Cl ⁻ /aniones				
25/100	1.04 a [†]	1.62 a	4.24 a	1.14 a
50/100	0.88 ab	1.59 a	4.05a	1.08 a
75/100	0.66 b	1.35 b	3.18 b	0.84 b
Relación porcentual de Na ⁺ /cationes				
25/100	0.46 c	2.04 a	4.53 a	1.12 a
50/100	0.85 b	1.50 b	3.74 b	0.95 b
75/100	1.27 a	1.02 c	3.20 b	1.02 ab

† Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

(Wenrong *et al.*, 2010). La mayor absorción de Cl, pudo provocar un desbalance nutricional que se reflejó en una menor absorción de Na, K, Ca y Mg, por que una alta concentración de Cl en la solución puede reducir la actividad química de los iones y provocar relaciones desbalanceadas Na⁺/Ca²⁺, Cl⁻/NO₃⁻, Na⁺/K⁺, Ca²⁺/Mg²⁺ (Fageria, 2001), y hacer susceptible a la planta al daño por iones específicos (Cl⁻ y Na⁺) y desbalances nutricionales. Komosa y Gorniak (2015) encontraron una relación positiva entre la concentración de Cl en la SN y la concentración de Cl en hojas de tomate, similar a lo encontrado en el presente trabajo. De igual manera, en ambos trabajos las concentraciones de K y Ca fueron reducidas. Genc *et al.* (2010) reportaron que concentraciones mayores de 10 mol_c m⁻³ de Cl redujeron la concentración de Mg en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.), resultado similar fue obtenido en esta investigación con la relación 75/100 Cl⁻/aniones, equivalente a 12.28 mol_c m⁻³ de Cl (Cuadro 2), y difiere de lo reportado por Komosa y Gorniak (2015), quienes mencionan que las concentraciones de Mg en hojas de tomate no fueron afectadas por el Cl en la SN.

El factor Na⁺/cationes provocó diferencias ($P \leq 0.05$) en las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas (Cuadro 3), y de Na, K y Ca en tallos (Cuadro 4). Hubo una relación directa entre la relación Na⁺/cationes y la concentración de Na en hojas y tallos, ya que al aumentar la relación Na⁺/cationes en la SN las concentraciones de Na aumentaron ($P \leq 0.05$). Con 75/100 Na⁺/cationes en la SN la concentración de Na se incrementó 176.1% en hojas y 155.3 % en tallos, comparado con 25/100 Na⁺/cationes (Cuadros 3 y 4), atribuible a la alta proporción de Na (75%) en la SN,

Cuadro 4. Concentración de Na, K, Ca y Mg en tallos de plántulas de tomate cv. Polaris por efecto de las relaciones de Cl/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva.

Factor	Na	K	Ca	Mg
	----- % -----			
Relación porcentual de Cl/aniones				
25/100	0.97 a [†]	2.43 a	1.43 a	0.68 a
50/100	0.99 a	2.34 a	1.41 a	0.77 a
75/100	0.75 a	2.74 a	1.55 a	0.71 a
Relación porcentual de Na ⁺ /cationes				
25/100	0.47 b	3.26 a	1.49 ab	0.67 a
50/100	1.00 a	2.69 b	1.63 a	0.82 a
75/100	1.20 a	1.56 c	1.27 b	0.68 a

[†] Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

respecto a los cationes K⁺ (8.75%), Ca²⁺ (11.25%) y Mg²⁺ (5%) (Cuadro 1), lo que favoreció la absorción de Na. Este resultado es parecido a lo reportado por Komosa y Gorniak (2015), quienes mencionan que aumentos de Na en el medio de crecimiento aumentaron la absorción y translocación de Na en el cultivo de tomate. La relación 75/100 Na⁺/cationes provocó una reducción significativa ($P \leq 0.05$) de K en hojas y tallos (50.9 y 52.1%, respectivamente) comparado con 25/100 Na⁺/cationes, probablemente por antagonismo o competencia provocado por la mayor concentración de Na en la SN, que disminuyó la conductividad hidráulica o la permeabilidad de los tejidos al agua, desplazando al K⁺ de los sitios de intercambio (Halperin y Lynch, 2003) reduciendo la absorción de K⁺ (Parida y Das, 2005; Naeini *et al.*, 2006; Lu *et al.*, 2009) y su acumulación en las hojas (Komosa y Gorniak, 2015), y por la menor concentración de K (8.75%) en la SN 75/100 Na⁺/cationes, respecto a la SN 25/100 Na⁺/cationes, la cual tuvo 26.25 %K (Cuadro 1).

El antagonismo entre Na y K resulta por la semejanza de sus radios iónicos y energías de hidratación (Schachtman y Liu, 1999; Biggin *et al.*, 2001), por lo que Na compite con K por los sitios de unión eléctrica a nivel celular, afectando la entrada de K al interior de la célula al usar sus sistemas de transporte (Tale *et al.*, 2013). Además, el Na facilita la salida de K hacia el exterior de las células, debido a que altera la integridad de las membranas celulares al desplazar al Ca (Marschner, 1995; Vaghela *et al.*, 2010). En condición salina el Na provoca inactivación de enzimas y de

funciones celulares esenciales, consecuentemente los cultivos en suelos salinos pueden presentar una alta concentración de Na y baja concentración de K (Munns y Tester, 2008). El antagonismo Na-K observado en condición salina ($CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$), coincide con lo encontrado en el presente estudio, realizado en situación de baja salinidad ($CE < 2.1 \text{ dS m}^{-1}$), pero con alta proporción de Na en la SN. La relación 75/100 Na⁺/cationes redujo 29.4% la concentración de Ca en hojas y 14.8% en tallos (Cuadros 3 y 4), explicable por el antagonismo del Na con el Ca (Vaghela *et al.*, 2010), debido al mayor porcentaje de Na (75%) y menor de Ca (11.25%) en la solución 75/100 Na⁺/cationes, comparado con 25/100 Na⁺/cationes, cuyos porcentajes de Na y Ca fueron 25% y 33.75% cada uno (Cuadro 1), y coincide con Epstein (1972), quien menciona que el exceso de un catión puede reducir la absorción de otros cationes por las plantas, por lo que una baja relación de Ca/cationes es desfavorable para la absorción de Ca (Läuchli, 1990) y es favorable para la acumulación de iones tóxicos y para la salida de solutos al alterar la estabilidad y permeabilidad de la membrana plasmática. En condiciones salinas, Husain *et al.* (2004) y Vaghela *et al.* (2010) encontraron que altas concentraciones de Na en la solución del suelo redujeron la concentración de Ca en trigo (*Triticum aestivum* L.), y en el arbusto (*Salvadora persica* L.), respectivamente. En el presente trabajo el antagonismo Na-Ca se presentó en SN con baja salinidad ($CE < 2.1 \text{ dS m}^{-1}$), no obstante dicha competencia comúnmente se ha reportado en situación salina ($CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$), donde la absorción de Na por las plantas se incrementa, mientras que Ca disminuye, debido a la interacción entre iones, precipitación y aumentos en la fuerza iónica, que reducen la actividad del Ca (Alam, 1999). En contraste, al aumentar la concentración de Ca en el medio se incrementa su absorción, mientras que la de Na disminuye (Lazof y Bernstein, 1999; Vaghela *et al.*, 2010).

Concentración de Nutrientes en Hojas y Tallos de Tomate “cv. ISIS”

Hubo efecto significativo ($P \leq 0.05$) de la interacción Cl/aniones \times Na⁺/cationes en la SN para las concentraciones de Na y K en hojas (Figuras 1 y 2). Cuando la interacción fue significativa, no se discutieron los efectos principales de los factores, ya que el análisis de la interacción es de mayor utilidad que los efectos principales (Montgomery, 2002). En

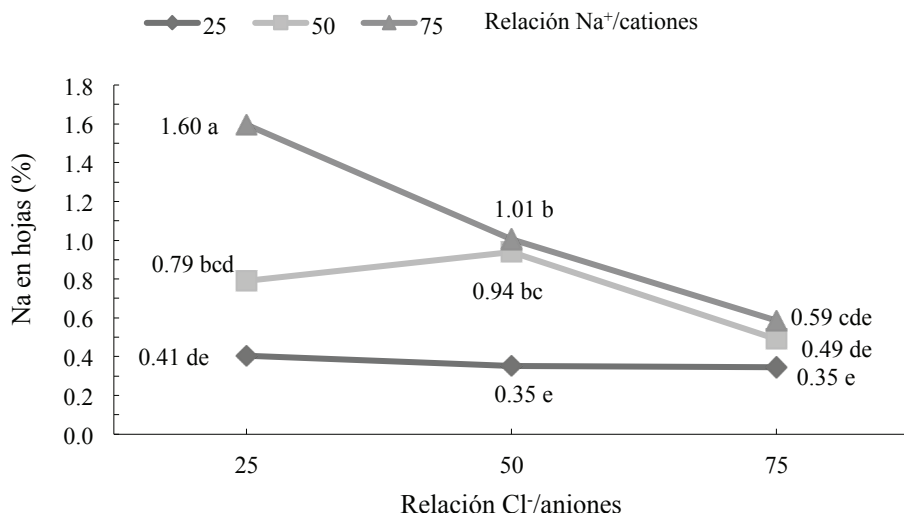


Figura 1. Efecto de la interacción Cl⁻/aniones × Na⁺/cationes en la solución nutritiva sobre la concentración de Na en hojas de tomate cv. ISIS. Puntos con letras iguales en cada columna y en cada línea no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

hojas las concentraciones de Na obtenidas con las tres relaciones Na⁺/cationes presentaron diferencias significativas entre las relaciones 25 y 50/100 Cl⁻/aniones y similar con 75/100 Cl⁻/aniones (Figura 1).

En las relaciones 25 y 50/100 Cl⁻/aniones las concentraciones mayores de Na (1.60 y 1.01%) en hoja se obtuvieron cuando se aplicó la relación 75/100 Na⁺/cationes y las menores concentraciones (0.41 y 0.35 %Na) con 25/100 Na⁺/cationes. Los resultados de Shiyab *et al.* (2013) en tomate (*Lycopersicon esculentum* L.); Wang *et al.* (2015) en pasto (*Leymus chinensis* L.),

y Maqsood *et al.* (2015) en maíz (*Zea mays* L.) parcialmente explican este resultado debido a que ellos también encontraron mayor concentración de Na en los órganos vegetales con los aumentos de Na en la SN, pero no evaluaron la interacción con Cl⁻. En la relación 75/100 Cl⁻/aniones, aunque no hubo diferencias en las concentraciones de Na obtenidas con las tres relaciones Na⁺/cationes, se lograron los menores porcentajes de Na en las hojas, comparado con 25 y 50/100 Cl⁻/aniones. Munns *et al.* (2006) mencionan que glicofitas, como el trigo (*Triticum aestivum* L.) disminuyen el transporte

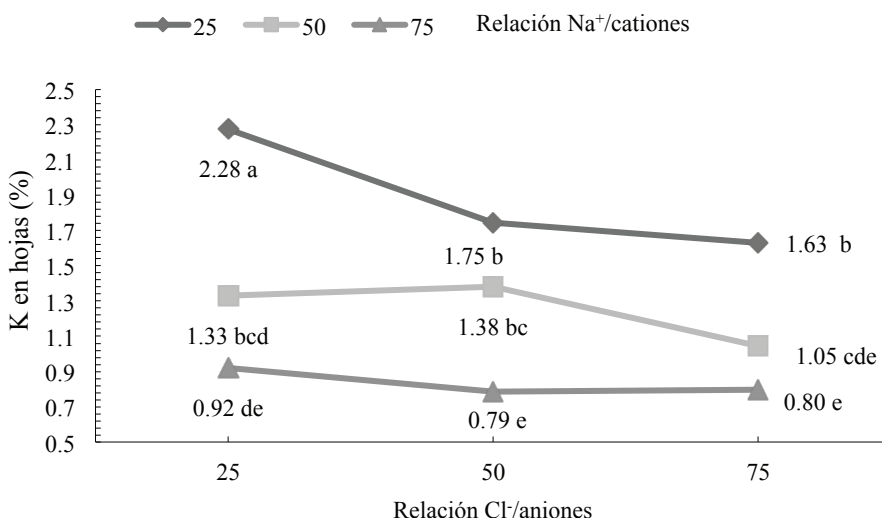


Figura 2. Efecto de la interacción Cl⁻/aniones × Na⁺/cationes en la solución nutritiva sobre la concentración de K en hojas de tomate cv. ISIS. Puntos con letras iguales en cada columna y en cada línea no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

de Na a las hojas, especialmente a los cloroplastos (Sudhir y Murthy, 2004) y acumulan el Na en raíces y tejidos vasculares, mientras que especies como la cebada (*Hordeum vulgare* L.) excluyen al Na de sus tejidos foliares, lo que permite mayor tolerancia al Na (Khan *et al.*, 2001), por lo tanto las reducciones en las concentraciones de Na obtenidas en el presente trabajo pueden ser una respuesta de las plantas para evitar daños por toxicidad. Las concentraciones de K obtenidas con las relaciones Na⁺/cationes presentaron diferencias significativas en las tres relaciones Cl⁻/aniones (Figura 2). En estas relaciones, los mayores valores de K (2.28, 1.75 y 1.63%) se obtuvieron con 25/100 Na⁺/cationes y los menores (0.92, 0.79 y 0.80%) con 75/100 Na⁺/cationes. Las reducciones en los porcentajes de K en las hojas por la relación 75/100 Na⁺/cationes en la SN se atribuyen principalmente al antagonismo Na-K debido a la alta proporción de Na (75%), respecto al catión K⁺, lo que genera mayor disponibilidad de Na y menor de K en la SN (Cuadro 1). Este resultado refleja un doble desbalance nutrimental en las hojas por alta absorción de Na y baja absorción de K, lo que coincide con los desbalances que se presentan en plantas que crecen en suelos salinos (Munns y Tester, 2008; Wang *et al.*, 2015). El antagonismo Na-K, se discutió anteriormente en hojas y tallos de tomate “cv. Polaris”. Hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) del factor Cl⁻/aniones para las concentraciones de Ca y Mg en hojas (Cuadro 5) y Ca, Mg y Na en tallos (Cuadro 6). Las menores concentraciones de Ca y Mg en hojas y tallos fueron obtenidas con la relación 75/100

Cl⁻/aniones, mientras que las mayores se obtuvieron con 25/100 Cl⁻/aniones. Ocurrió una relación inversa entre la relación Cl⁻/aniones y las concentraciones de Ca y Mg en hojas y tallos, ya que al incrementar la relación Cl⁻/aniones en la SN las concentraciones de estos nutrimentos disminuyeron. Este resultado coincide con el obtenido en hojas del cultivar Polaris, por lo que en ambos cultivares la relación 75/100 Cl⁻/aniones redujo las concentraciones de Ca y Mg. La concentración de Na en tallos fue significativamente menor para la relación 75/100 Cl⁻/aniones respecto a 25/100 Cl⁻/aniones (Cuadro 6), posiblemente a desbalances nutrimentales en las plántulas, provocado por la mayor concentración de Cl en tallos (3.8%) en la relación 75/100 Cl⁻/aniones, comparado con 3% de Cl en la relación 25/100 Cl⁻/aniones.

Hubo diferencias ($P \leq 0.05$) entre tratamientos ante el uso de la relación Na⁺/cationes para las concentraciones de Ca y Mg en hojas (Cuadro 5), y Ca, Mg, Na y K en tallos (Cuadro 6), donde las menores concentraciones de Ca y Mg en ambos órganos se obtuvieron con la relación 75/100 Na⁺/cationes, mientras que las mayores fueron obtenidas con 25/100 Na⁺/cationes. Este resultado indica una relación inversa entre la relación Na⁺/cationes y las concentraciones de Ca y Mg, ya que al incrementar la relación Na⁺/cationes las concentraciones de estos nutrimentos disminuyeron, lo que puede atribuirse al antagonismo Na-Ca (Wakeed *et al.*, 2009) y Na-Mg provocado por la mayor concentración de Na (Cuadro 1), respecto a los cationes Ca y Mg en la SN lo que favoreció la absorción de Na

Cuadro 5. Concentración de Ca y Mg en hojas de plántulas de tomate cv. ISIS por efecto de las relaciones de Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva.

Factor	Ca	Mg
	----- % -----	
Relación porcentual de Cl ⁻ /aniones		
25/100	3.11 a [†]	0.96 a
50/100	2.95 a	0.87 a
75/100	2.48 b	0.70 b
Relación porcentual de Na ⁺ /cationes		
25/100	3.30 a	0.99 a
50/100	2.63 b	0.79 b
75/100	2.61 b	0.75 b

[†] Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Cuadro 6. Concentración de Na, K, Ca y Mg en tallos de plántulas de tomate cv. ISIS por efecto de las relaciones de Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva.

Factor	Na	K	Ca	Mg
	----- % -----			
Relación porcentual de Cl ⁻ /aniones				
25/100	0.98 a [†]	2.55 a	1.59 a	0.75 a
50/100	0.90 ab	2.35 a	1.55 a	0.63 ab
75/100	0.78 b	2.16 a	1.38 b	0.60 b
Relación porcentual de Na ⁺ /cationes				
25/100	0.36 b	2.89 a	1.43 b	0.57 b
50/100	1.08 a	2.71 a	1.74 a	0.79 a
75/100	1.21 a	1.43 b	1.36 b	0.62 b

[†] Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

y limitó la de Ca y Mg. Hubo una relación directa entre la relación Na^+ /cationes y la concentración de Na en tallos, en contraste, la relación fue inversa respecto al K, ya que las concentraciones de este nutriente en tallos disminuyeron con los aumentos de la relación Na^+ /cationes (Cuadro 6) debido al antagonismo Na-K (Lu *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

La respuesta de los cultivares de tomate “Polaris e ISIS” a las relaciones Cl^- /aniones y Na^+ /cationes en la solución nutritiva fueron diferentes. Hubo una relación inversa entre los tratamientos de la relación Cl^- /aniones y las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en hojas de tomate cultivar Polaris y las concentraciones de Na, K, Ca y Mg en tallos de cultivar ISIS. Hubo una relación directa entre los tratamientos de la relación Na^+ /cationes y las concentraciones de Na en hojas y tallos de cultivar Polaris; en contraste, para las concentraciones de K, Ca y Mg en hojas, K y Ca en tallos de Polaris y para Ca y Mg en hojas y tallos de cultivar ISIS, la relación fue inversa. Los resultados indican que soluciones nutritivas de baja salinidad ($\text{CE} < 2.5 \text{ dS m}^{-1}$), con alta proporción de Cl^- y Na^+ provocaron desbalances nutrimentales debido al antagonismos Cl^- - K^+ , Cl^- - Ca^{2+} , Cl^- - Mg^{2+} , Na^+ - K^+ , Na^+ - Ca^{2+} y Na^+ - Mg^{2+} que alteraron las concentraciones de los cationes K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ en hojas y tallos de plántulas de tomate.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Sinaloa por su apoyo financiero, a través del Programa de Fortalecimiento y Apoyo a Proyectos de Investigación (PROFAPI-2010).

LITERATURA CITADA

- Alam, S. M. 1999. Nutrient uptake by plants under stress conditions. pp. 285-313. *In*: M. Pessarkli (ed.). Handbook of plant and crop stress. CRC Press. New York, NY, USA.
- Biggin, P. C., G. R. Smith, I. Shrivastava, S. Choe, and M. S. Sansom. 2001. Potassium and sodium ions in a potassium channel studied by molecular dynamics simulations. *Biochim. Biophys. Acta* 1510: 1-9.
- Epstein, E. 1972. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.
- Fageria, V. D. 2001. Nutrient interactions in crop plants. *J. Plant Nutr.* 24: 1269-1290.
- Genc, Y., M. Tester, and G. K. McDonald. 2010. Calcium requirement of wheat in saline and non-saline conditions. *Plant Soil* 327: 331-345.
- Ghafoor, A., M. Qadir, and G. Murtaza. 2004. Salt-affected soils: Principles of management. Allied Book Center. Lahore, Pakistan.
- Halperin, S. J. and J. P. Lynch. 2003. Effects of salinity on cytosolic Na^+ and K^+ in root hairs of *Arabidopsis thaliana*: In vitro measurements using the fluorescent dyes SBFI and PBFI. *J. Exp. Bot.* 54: 2035-2043.
- Hanson, B. R., S. R. Grattan, and A. Fulton. 2006. Agricultural salinity and drainage (revised ed.). Division of Agriculture and Natural Resources Publication 3375. University of California. Davis, CA, USA.
- Husain, S., S. von Caemmerer, and R. Munns. 2004. Control of salt transport from roots to shoots of wheat in saline soil. *Funct. Plant Biol.* 31: 1115-1126.
- Hussain, R. A., R. Ahmad, E. A. Waraich, and F. Nawaz. 2015. Nutrient uptake, water relations, and yield performance of different wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *J. Plant Nutr.* 38: 2139-2149.
- Imran, M. R., M. A. Maqsood, Rahmatullah, and S. Kanwal. 2010. Increasing SAR of irrigation water aggravated boron toxicity in maize (*Zea mays* L.). *J. Plant Nutr.* 33: 1301-1306.
- Khan, M. A., B. Gul, and D. J. Weber. 2001. Effect of salinity on the growth and ion content of the *Salicornia rubra*. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 2965-2977.
- Komosa, A. and T. Gorniak. 2015. The effect of chloride on yield and nutrient interaction in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown in rockwool. *J. Plant Nutr.* 38: 355-370.
- Läuchli, A. 1990. Calcium, salinity, and the plasma membrane. pp. 26-35. *In*: R. T. Leonard and P. K. Hepler (eds.). Calcium in plant growth. Am. Soc. Plant Physiol. Rockville, Md, USA.
- Lazof, D. B. and N. Bernstein. 1999. The NaCl-induced inhibition of shoot growth: The case for disturbed nutrition with special consideration of Ca. *Adv. Bot. Res.* 29: 113-189.
- Lu, S., S. Shang, X. Xu, H. Korpelainen, and C. Li. 2009. Effect of increased alkalinity on Na^+ and K^+ contents, lipid peroxidation and antioxidative enzymes in two populations of *Populus cathayana*. *Biol. Plant.* 53: 597-600.
- Maqsood, M. A., M. K. Khan, M. A. Naeem, S. Hussain, T. Azis, and J. Schoenau. 2015. High sodium in irrigation water caused B toxicity at low soil solution and shoot B concentration in maize (*Zea mays* L.). *J. Plant Nutr.* 38: 728-741.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Montgomery, D. C. 2002. Diseño y análisis de experimentos. Traducción al Español de Rodolfo Piña García. Editorial Limusa. México, D. F.
- Motsara, M. R. and R. N. Roy. 2008. Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 19. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Munns, R. and M. Tester. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Ann. Rev. Plant Biol.* 59: 651-681.
- Munns, R., R. A. James, and A. Läuchli. 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J. Exp. Bot.* 57: 1025-1043.
- Naeem, M. A., M. A. Maqsood, S. Hussain., M. K. Khan, and S. Kanwal. 2013. Irrigation with brackish water modifies the boron requirement of mungbean (*Vigna radiata* L.) on typical calcareous soil. *Arch. Agron. Soil Sci.* 59: 133-145.

- Naeini, M. R., A. H. Khoshgoftarmanesh, and E. Fallahi. 2006. Partitioning of chlorine, sodium, and potassium and shoot growth of three pomegranate cultivars under different levels of salinity. *J. Plant Nutr.* 29: 1835-1843.
- Parida, A. K. and A. B. Das. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 60: 324-349.
- Reynolds, B., D. Fowler, R. I. Smith, and J. R. Hall. 1997. Atmospheric inputs and catchment solute fluxes for major ions in five Welsh upland catchments. *J. Hydrol.* 194: 305-329.
- SAS Institute. 1999. Statistical Analysis System Institute. Versión 8, SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Schachtman, D. and W. Liu. 1999. Molecular pieces to the puzzle of the interaction between potassium and sodium uptake. *Trends Plant Sci.* 4: 281-287.
- Shiyab, S. M., M. A. Shatnawi, R. A. Shibli, N. G. Al Smeirat, J. Alayad, and M. W. Akash. 2013. Growth, nutrient acquisition, and physiological responses of hydroponic grown tomato to sodium chloride salt induced stress. *J. Plant Nutr.* 36: 665-676.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. Sixth Int. Congr. on Soilless Culture. pp. 633-649. *In: proceeding 6th International Congress on Soilless Culture.* Wageningen, The Netherlands.
- Sudhir, P. and S. D. S. Murthy. 2004. Effects of salt stress on basic process of photosynthesis. *Photosynthetica* 42: 481-486.
- Tale, A. S., N. A. K. K. Sima, and H. H. Mirzaei. 2013. Effects of sodium chloride on physiological aspects of *Salicornia persica* growth. *J. Plant Nutr.* 36: 401-414.
- Tavakkoli, E., F. Fatehi, S. Coventry, P. Rengasamy, and G. K. McDonald. 2011. Additive effects of Na⁺ and Cl⁻ ions on barley growth under salinity stress. *J. Exp. Bot.* 62: 2189-2203.
- Teakle, N. L. and S. D. Tyerman. 2010. Mechanisms of Cl(-) transport contributing to salt tolerance. *Plant Cell Environ.* 33: 566-589.
- Tester, M. and R. Davenport. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Ann. Bot.* 91: 503-527.
- Vaghela, P. M., A. D. Patel, I. B. Pandey, and A. N. Pandey. 2010. Implications of calcium nutrition on the response of *Salvadora persica* (Salvadoraceae) to soil salinity. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41: 2644-2660.
- Wakeel, A., F. Abd-El-Motagally, D. Steffens, and S. Schubert. 2009. Sodium-induced calcium deficiency in sugar beet during substitution of potassium by sodium. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172: 254-260.
- Wang, L., C. Fang, and K. Wang. 2015. Physiological responses of *Leymus chinensis* to long-term salt, alkali and mixed salt-alkali stresses. *J. Plant Nutr.* 38: 526-540.
- Wenrong, C., Z. L. He, X. E. Yang, S. Mishra, and P. J. Stoffella. 2010. Chlorine nutrition of higher plants: Progress and perspectives. *J. Plant Nutr.* 33: 943-952.
- White, P. J. and M. R. Broadley. 2001. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: A review. *Ann. Bot.* 88: 967-988.
- Xu, G., H. Magen, J. Tarchitzky, and U. Kafkafi. 2000. Advances in chloride nutrition of plants. *Adv. Agron.* 68: 97-150.