

Effect of Cl⁻ and Na⁺ ratios in nutrient solutions on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield in a hydroponic system

Efecto de relaciones Cl⁻ y Na⁺ en soluciones nutritivas sobre el rendimiento de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en hidroponía

Saúl Parra-Terraza^{1*}, Azareel Angulo-Castro¹; Pedro Sánchez-Peña¹; José Benigno Valdez-Torres²; Werner Rubio-Carrasco²

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-Eldorado km 17.5, Culiacán, Sinaloa, C. P. 80000, MÉXICO.

²Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. Carretera a Eldorado km 5.5, Campo el Diez, Culiacán, Sinaloa, C. P. 80111, MÉXICO.

*Corresponding author: saul.parra@uas.edu.mx

Abstract

Intensive tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production in coastal areas of Sinaloa is exposed to significant amounts of Cl and Na deposited by sea breezes and irrigation water, which affects the yield of this vegetable. The aim of this study was to evaluate three percentage ratios of Cl⁻/anions (25/100, 50/100 and 75/100) and three percentage ratios of Na⁺/cations (25/100, 50/100 and 75/100) in the nutrient solution on mineral composition, dry matter production and yield of tomato. The experimental design was completely randomized with a 3² factorial arrangement and four replications. Analysis of variance and mean comparisons were performed (Tukey, $P \leq 0.05$). Cl and Na concentrations in tomato leaves, stems and fruits increased significantly with increasing ratios of Cl⁻/anions and Na⁺/cations in the nutrient solution. The 75/100 Cl⁻/anions ratio reduced ($P \leq 0.05$) the Ca concentration in leaves, while the 75/100 Na⁺/cations ratio decreased ($P \leq 0.05$) K concentrations in leaves and stems. Both ratios reduced aerial dry biomass (48 and 25.8 %, respectively) and tomato yield (50.8 and 45.7 %, respectively). The results indicate that tomato plants grown with the 75/100 percentage ratio of Cl⁻/anions or the 75/100 percentage ratio of Na⁺/cations absorb excessive amounts of Cl or Na, which causes ionic imbalance (especially of K⁺ and Ca²⁺) and affects dry matter production and yield.

Keywords: dry matter, mineral composition, osmotic potential, ionic.

Resumen

La producción intensiva de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en zonas costeras de Sinaloa está expuesta a cantidades importantes de Cl y Na, aportadas por la brisa marina y el agua de riego, lo cual afecta el rendimiento de dicha hortaliza. El objetivo del presente estudio fue evaluar tres relaciones porcentuales de Cl⁻/aniones (25/100, 50/100 y 75/100) y tres relaciones porcentuales de Na⁺/cationes (25/100, 50/100 y 75/100) en la solución nutritiva sobre la composición mineral, producción de materia seca y el rendimiento de jitomate. El diseño experimental fue completamente al azar con un arreglo factorial 3² y cuatro repeticiones. Se realizaron análisis de varianza y comparaciones de medias (Tukey, $P \leq 0.05$). Las concentraciones de Cl y Na en hojas, tallos y frutos de jitomate aumentaron significativamente al incrementar las relaciones de Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva. La relación 75/100 de Cl⁻/aniones redujo ($P \leq 0.05$) la concentración de Ca en hojas, mientras que la relación 75/100 de Na⁺/cationes disminuyó ($P \leq 0.05$) las concentraciones de K en hojas y tallos. En ambas relaciones se redujo la biomasa seca aérea (48 y 25.8 %, respectivamente) y el rendimiento de jitomate (50.8 y 45.7 %, respectivamente). Los resultados indican que las plantas de jitomate desarrolladas con la relación porcentual 75/100 de Cl⁻/aniones o la relación porcentual 75/100 de Na⁺/cationes absorben cantidades excesivas de Cl o Na, lo cual provoca desbalance iónico (especialmente de K⁺ y Ca²⁺) y afecta la producción de materia seca y el rendimiento.

Palabras clave: materia seca, composición mineral, potencial osmótico, desbalance iónico.

Please cite this article as follows (APA 6): Parra-Terraza, S., Angulo-Castro, A., Sánchez-Peña, P., Valdez-Torres, J. B., & Rubio-Carrasco, W. (2022). Effect of Cl⁻ and Na⁺ ratios in nutrient solutions on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield in a hydroponic system. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 28(1), 67-78. doi: 10.5154/r.rchsh.2021.01.001

Received: January 1, 2021 / Accepted: December 17, 2021.



Revista Chapingo
Serie Horticultura

www.chapingo.mx/revistas/horticultura

Introduction

In 2018, 182.3 million t of fresh tomatoes were produced on 4.7 million ha worldwide (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020). In the same year, Mexico produced 3.7 million t on 44,183 ha; of this production, Sinaloa contributed 29.7 % on 13,657 ha, under protected and open-field conditions (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP, 2020]).

A limitation of tomato production in open-field conditions in the Culiacán Valley, Sinaloa, is the presence of pests, such as nematodes and some species of *Fusarium oxysporum*; this is due, among other factors, to the lack of crop rotation. For this reason, growers in this area plant in soils near the coast, where temperatures are more favorable for crop development, since the sea is a climate regulator. However, sea breezes and rainfall deposit significant amounts of chlorine in the soil (Xu, Magen, Tarchitzky, & Kafkafi, 2000), and irrigation water may contain Cl and Na ions that affect tomato, a plant classified as salt-sensitive (glycophyte) (White & Broadley, 2001).

The Cl⁻ anion is the main form of chlorine in soils and irrigation water. Cl⁻ is a cofactor in oxygen formation in chloroplasts (Kawakami, Umena, Kamiya, & Shen, 2009), and is the most abundant anion in plant cells, as it is involved in the electrical charge balance of cations in cell membranes and in pH regulation (Marschner, 2012). Some researchers consider Cl beneficial when it accumulates at a macronutrient level in plant tissues, as it promotes water balance, photosynthesis, water-use efficiency, cellular osmoregulation, leaf turgor and elongation, and reduced stomatal conductance (Franco-Navarro et al., 2016; Wege, Gilliam, & Henderson, 2017; Colmenero-Flores, Franco-Navarro, Cubero-Font, Peinado-Torrubia, & Rosales, 2019; Maron, 2019). Franco-Navarro et al. (2019) point out that Cl increases water-use efficiency in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) plants.

Excessive Cl⁻ accumulation in crops sensitive to this element under salt stress conditions is detrimental (Geilfus, 2018). Dang, Dalal, Routley, Schwenke, and Daniells (2006) indicate that Cl concentrations in soil reduce growth and yield of wheat and chickpea, compared to the Na⁺ predominant in saline soils and an important component in poor quality irrigation water, which affects vegetables by causing toxicity or nutrient imbalances (Grattan & Grieve, 1998; Rodríguez-Navarro, 2000; Parida & Das, 2005). On the other hand, Idowu and Aduayi (2006) report that the application of 5 mg Na and 40 mg of K in 1 kg of soil increased tomato yield. The effect of NaCl on crops is well documented (Turhan & Eris, 2005; Khayyat et al., 2009; Tavakkoli, Rengasamy, & McDonald, 2010;

Introducción

En 2018 se produjeron 182.3 millones de t de jitomates frescos en 4.7 millones de ha en el mundo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020). En el mismo año, México produjo 3.7 millones de t en 44,183 ha; de esta producción, Sinaloa aportó el 29.7 % en 13,657 ha, bajo condiciones protegidas y a cielo abierto (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP, 2020]).

Una limitante de la producción de jitomate en suelo a cielo abierto en el valle de Culiacán, Sinaloa, es la presencia de plagas, como nematodos y algunas especies de *Fusarium oxysporum*; esto debido, entre otros factores, a la falta de rotación de cultivos. Por ello, los horticultores de esta zona siembran en suelos cercanos a la costa, donde hay temperaturas más favorables para el desarrollo del cultivo, ya que el mar es un regulador del clima. No obstante, la brisa marina y las lluvias depositan cantidades importantes de cloro en el suelo (Xu, Magen, Tarchitzky, & Kafkafi, 2000), y el agua de riego puede contener iones de Cl y Na que afectan al jitomate, planta clasificada como sensible a las sales (glicofita) (White & Broadley, 2001).

El anión Cl⁻ es la principal forma del cloro en los suelos y en el agua de riego. El Cl⁻ es un cofactor en la formación de oxígeno en los cloroplastos (Kawakami, Umena, Kamiya, & Shen, 2009), y es el anión más abundante en las células vegetales, ya que interviene en el balance de carga eléctrica de los cationes en las membranas celulares y en la regulación del pH (Marschner, 2012). Algunos investigadores consideran benéfico al Cl cuando se acumula a un nivel macronutricional en los tejidos vegetales, ya que promueve el balance hídrico, la fotosíntesis, la eficiencia en el uso del agua, la osmorregulación celular, la turgencia y elongación de la hoja, y la reducción de la conductancia estomática (Franco-Navarro et al., 2016; Wege, Gilliam, & Henderson, 2017; Colmenero-Flores, Franco-Navarro, Cubero-Font, Peinado-Torrubia, & Rosales, 2019; Maron, 2019). Franco-Navarro et al. (2019) mencionan que el Cl⁻ aumenta la eficiencia de uso del agua en plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.).

La acumulación excesiva de Cl⁻ en cultivos sensibles a este elemento en condiciones de estrés salino es perjudicial (Geilfus, 2018). Dang, Dalal, Routley, Schwenke, y Daniells (2006) indican que las concentraciones de Cl en el suelo reducen el crecimiento y el rendimiento de trigo y garbanzo, comparado con el Na⁺ predominante en suelos salinos y componente importante en el agua de riego de mala calidad, la cual afecta a las hortalizas al provocar toxicidad o desbalances nutrimentales (Grattan & Grieve, 1998; Rodríguez-Navarro, 2000; Parida & Das, 2005). Por otro lado, Idowu y Aduayi (2006) señalan que

Tavakkoli, Fatehi, Coventry, Rengasamy, & McDonald, 2011; Plaza, Jiménez, & Lao, 2012; Shiyab et al., 2013; Flowers, Munns, & Colmer, 2015), although there are few studies that separate the effects of Cl and Na on crops (Tavakkoli et al., 2011; Flowers et al., 2015).

In most saline soils, NaCl contributes between 50 and 80 % of total soluble salts (Rengasami, 2010a), which cause three effects on plant growth: 1) they reduce the hydric potential of water by decreasing the osmotic potential (Ψ_s) of the solution, 2) they cause ion imbalances in the cells and 3) they cause Cl⁻ and Na⁺ toxicity. Tavakkoli et al. (2010) note that in salt stress studies it is important that treatments have similar Ψ_s so as not to affect plant growth differentially. Therefore, the objective of the present work was to evaluate three percentage ratios of Cl⁻/anions [25/100, 50/100 and 75/100, Cl⁻/anions (NO₃⁻, H₂PO₄⁻, SO₄²⁻ and Cl⁻)] and three percentage ratios of Na⁺/cations [25/100, 50/100 and 75/100, Na⁺/cations (Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺ and Na⁺)] in Steiner's (1984) nutrient solution adjusted to a Ψ_s of -0.072 MPa, to compare the separate effects of Cl⁻ and Na⁺ on mineral composition, dry matter production and yield in hydroponically-grown tomato.

Materials and methods

The research was conducted from November 2019 to March 2020 in a multi-tunnel greenhouse, with fixed zenithal ventilation and anti-aphid mesh on the side walls, belonging to the Faculty of Agronomy at the *Universidad Autónoma de Sinaloa*, Culiacán, Sinaloa, Mexico (24° 37' 29" NL and 107° 24' 30" WL, at 38 m a. s. l.). The average minimum and maximum temperatures inside the greenhouse were 16 and 36 °C, respectively.

Saladette-type tomato cv La Roca plants of indeterminate growth obtained from Nirit Seeds Ltd. were transplanted in a closed hydroponic system. The system consisted of 72 plastic containers, painted black, with a capacity of 20 L each, of which 36 contained 15 L of brown *Sphagnum* peat moss (Kekkila Professional) as substrate, and the other 36 contained 10 L of nutrient solution (NS) of the corresponding treatments. The containers with the substrate were provided with a 1.27 cm diameter drainage hole 2 cm from the base and were fitted with a rubber band, an irrigation starter, a 30 cm long rubber hose and a stopcock to drain the excess SN after watering and to recover the drained solution. The substrate containers were placed on benches 50 cm high and 5 m long. The separation between benches was 1.2 m, and the distance between plants on the benches was 0.4 m.

The factors and levels evaluated were the percentage ratio of Cl⁻/anions (25/100, 50/100 and 75/100) and Na⁺/

la aplicación de 5 mg de Na y 40 mg de K en 1 kg de suelo aumentó el rendimiento de jitomate. El efecto del NaCl en los cultivos está bien documentado (Turhan & Eris, 2005; Khayyat et al., 2009; Tavakkoli, Rengasamy, & McDonald, 2010; Tavakkoli, Fatehi, Coventry, Rengasamy, & McDonald, 2011; Plaza, Jiménez, & Lao, 2012; Shiyab et al., 2013; Flowers, Munns, & Colmer, 2015), aunque son escasos los estudios que separan los efectos del Cl y el Na en los cultivos (Tavakkoli et al., 2011; Flowers et al., 2015).

En la mayoría de los suelos salinos, el NaCl aporta entre 50 y 80 % de las sales solubles totales (Rengasami, 2010a), las cuales provocan tres efectos sobre el crecimiento de las plantas: 1) reducen el potencial hídrico del agua al disminuir el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución, 2) provocan desbalances de iones en las células y 3) causan toxicidad por Cl⁻ y Na⁺. Tavakkoli et al. (2010) mencionan que en estudios de estrés salino es importante que los tratamientos tengan Ψ_s similares para no afectar el crecimiento de las plantas en forma diferencial. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar tres relaciones porcentuales de Cl⁻/aniones [25/100, 50/100 y 75/100, Cl⁻/aniones (NO₃⁻, H₂PO₄⁻, SO₄²⁻ y Cl⁻)] y tres relaciones porcentuales de Na⁺/cationes [25/100, 50/100 y 75/100, Na⁺/cationes (Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺ y Na⁺)] en soluciones nutritivas de Steiner (1984) ajustadas a un Ψ_s de -0.072 MPa, para comparar los efectos separados del Cl⁻ y el Na⁺ sobre la composición mineral, la producción de materia seca y el rendimiento de jitomate en hidroponía.

Materiales y métodos

La investigación se realizó de noviembre de 2019 a marzo de 2020 en un invernadero tipo multitunnel, con ventila cenital fija y malla antiáfidos en las paredes laterales, localizado en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México (24° 37' 29" latitud norte y 107° 24' 30" longitud oeste, a 38 m s. n. m.). Las temperaturas mínima y máxima promedio dentro del invernadero fueron 16 y 36 °C, respectivamente.

Se trasplantaron plantas de jitomate cv La Roca tipo saladette de crecimiento indeterminado de la compañía Nirit Seed LTD en un sistema hidropónico cerrado. El sistema constó de 72 recipientes de plástico, pintados de color negro, con capacidad de 20 L cada uno, de los cuales, 36 recipientes contenían 15 L de turba *Sphagnum* parda (Kekkila Professional) como sustrato, y los otros 36 tenían 10 L de solución nutritiva (SN) de los tratamientos correspondientes. A los recipientes que contenían el sustrato se les hizo un orificio de drenaje de 1.27 cm de diámetro a 2 cm de la base y se les colocó una goma de hule, un inicial de riego, una manguera de hule de 30 cm de largo y una llave de paso para drenar el exceso de SN después de regar

cations (25/100, 50/100 and 75/100), the combination of which generated nine treatments (Table 1), all adjusted to a Ψ_s of -0.072 MPa. Steiner's (1984) universal solution was used as a reference. The NSs were prepared with irrigation water with an electrical conductivity of 0.3 dS·m⁻¹ and pH of 7, classified as C1S1 (low risk of salinization and sodification). The nutrients present in the water were considered in the formulation of the NSs. Commercial fertilizers (monopotassium phosphate, magnesium sulfate, potassium sulfate, calcium nitrate, potassium nitrate and magnesium nitrate) were used as a source of macronutrients. The source of Na and Cl was reagent-grade NaCl, and the micronutrients were supplied with Hidromix Proan, whose chemical composition is (% w/w): 4.9 Fe, 2.7 Mn, 0.4 Zn, 0.2 Cu, 0.3 B and 0.1 Mo.

The experimental design was completely randomized with a 3² factorial arrangement and four replications, giving a total of 36 experimental units. Each experimental unit consisted of one tomato plant per container with substrate. Daily irrigation was applied to the substrate and the evapotranspiration water was replaced with irrigation water, without adjusting the pH of the NSs. The solutions were renewed every 15 days during the first 30 days after transplanting (dat), and thereafter were renewed every 10 days until the end of the experiment. At the end of the harvest (108 dat), the plants of each experimental unit (four plants per treatment) were cut, sectioned into their different organs, dried at 70 °C until constant weight, ground and passed through a 0.5 mm diameter sieve. To quantify the nutrient concentration in leaves, stems and fruits, the plant organs were subjected to dry digestion at 500 °C for 3 h. Sodium, potassium, calcium and magnesium were analyzed by atomic

y recuperar la solución drenada. Los recipientes con sustrato se colocaron en bancas de 50 cm de altura y 5 m de largo. La separación entre bancas fue de 1.2 m, y la distancia entre plantas en las bancas fue de 0.4 m.

Los factores y niveles evaluados fueron la relación porcentual de Cl/aniones (25/100, 50/100 y 75/100) y Na⁺/cationes (25/100, 50/100 y 75/100), cuya combinación generó nueve tratamientos (Cuadro 1), todos ajustados a un Ψ_s de -0.072 MPa. Como referencia se usó la solución universal de Steiner (1984). Las SN se prepararon con agua de riego con una conductividad eléctrica de 0.3 dS·m⁻¹ y pH de 7, clasificada como C1S1 (riesgo bajo de salinización y sodificación). En la formulación de las SN se consideraron los nutrimentos presentes en el agua. Como fuente de macronutrimentos se usaron fertilizantes comerciales (fosfato monopotásico, sulfato de magnesio, sulfato de potasio, nitrato de calcio, nitrato de potasio y nitrato de magnesio). La fuente de Na y Cl fue NaCl grado reactivo, y los micronutrimentos fueron aportados con Hidromix Proan, cuya composición química es (% p/p): 4.9 de Fe, 2.7 de Mn, 0.4 de Zn, 0.2 de Cu, 0.3 de B y 0.1 de Mo.

El diseño experimental fue completamente al azar con un arreglo factorial 3² y cuatro repeticiones, lo cual dio un total de 36 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en una planta de jitomate por cada recipiente con sustrato. Se aplicó un riego diario al sustrato y se repuso el agua evapotranspirada mediante aforo con agua de riego, sin ajustar el pH de las SN. Las soluciones se renovaron cada 15 días durante los primeros 30 días después del trasplante (ddt), y posteriormente se renovaron cada

Table 1. Chemical composition of the nutrient solutions used in the experiment.

Cuadro 1. Composición química de las soluciones nutritivas usadas en el experimento.

Treatment/ Tratamiento	Cl/Na ⁺ ratio (%) / Relación Cl/Na ⁺ (%)	(mol·m ⁻³)							
		NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
1	25/25	8.31	0.69	4.84	4.61	4.84	6.23	2.77	4.61
2	50/25	5.39	0.45	3.15	9.00	4.72	6.07	2.70	4.50
3	75/25	2.63	0.22	1.53	13.14	4.60	5.91	2.63	4.38
4	25/50	7.91	0.66	4.61	4.39	3.08	3.96	1.76	8.79
5	50/50	5.14	0.43	3.00	8.57	3.00	3.86	1.71	8.57
6	75/50	2.51	0.21	1.46	12.54	2.93	3.76	1.67	8.36
7	25/75	7.55	0.63	4.40	4.19	1.47	1.89	0.84	12.58
8	50/75	4.91	0.41	2.87	8.19	1.43	1.84	0.82	12.28

absorption, and chlorides were determined by titration (Motsara & Roy, 2008). A total of six fruit cuts were made, and in each cut the number and weight of the fruits were recorded.

The data obtained were subjected to an analysis of variance and Tukey's multiple comparison test ($P \leq 0.05$) for the main factors and their interaction. For the analysis, the SAS ver. 9.4 statistical package (SAS Institute Inc., 2013) was used.

Results and discussion

Nutrient concentrations in tomato leaves, stems and fruits

The Cl/anions ratio in the NS caused significant differences in Na and Cl concentrations in leaves, stems and fruits, and of Ca in leaves (Tables 2, 3 and 4). Na concentrations in the plant organs had an inverse relationship to the Cl/anions ratio, since increasing the ratio from 25/100 to 75/100 decreased the Na concentration ($P \leq 0.05$). Xu, Magen, Tarchitzky and Kafkafi (2000) obtained a critical toxicity range (CTR) of 4 to 7 mg Cl·g⁻¹ dry matter in Cl-sensitive plant species, and from 15 to 35 mg Cl·g⁻¹ dry matter in tolerant plants. In the present work, 26, 24 and 29 mg Cl·g⁻¹ of leaf dry matter were obtained at the 25, 50 and 75 Cl/anions ratio, values that are in the CTR. Excessive Cl uptake at the 75/100 Cl/anions ratio caused lower Na uptake (Table 2) due to unbalanced ratios of Na⁺ to Ca²⁺ and K⁺ in the NS (Fageria, 2001).

There was a positive relationship between the Cl concentration in the NS and in the leaves, stems, and fruits; thus, the highest Cl values in these organs were obtained with 75/100 Cl/anions, and the lowest were observed with 25/100 Cl/anions, except in leaves (Tables 2, 3 and 4). Villa-Castorena, Catalán-Valencia, Inzunza-Ibarra, and Ulery (2006), Kowalczyk et al. (2008), Giuffrida, Martorana, and Leonardi (2009), Komosa and Górnaiak (2015), and Parra-Terraza (2016) obtained the same relationship in leaf Cl contents and Cl concentrations in NS. Increasing the Cl concentration in the NS increased the amount of Cl in fruits, which is similar to that reported by Komosa and Górnaiak (2015). On the other hand, the 50/100 and 75/100 Cl/anions ratios reduced Ca concentrations in leaves, which is in agreement with what was reported by Parra-Terraza (2016), and Komosa and Górnaiak (2015).

The 75/100 percentage ratio of Na⁺/cations in the NS significantly reduced K concentrations in leaves (Table 2) and stems (Table 3), and increased Na concentrations in leaves, stems, and fruits (Tables 2, 3, and 4), relative to the 25/100 Na⁺/cations ratio. Tavakkoli

10 días hasta terminar el trabajo. Al final de la cosecha (108 ddt), se cortaron las plantas de cada unidad experimental (cuatro plantas por tratamiento), las cuales se seccionaron en sus diferentes órganos, se secaron a 70 °C hasta peso constante, se molieron y se pasaron por un tamiz de 0.5 mm de diámetro. Para cuantificar la concentración nutrimental en hojas, tallos y frutos, los órganos vegetales se sometieron a una digestión seca a 500 °C durante 3 h. El análisis de sodio, potasio, calcio y magnesio se hizo por absorción atómica, y los cloruros se determinaron por titulación (Motsara & Roy, 2008). En total se realizaron seis cortes de fruto, y en cada corte se registró el número y el peso de los frutos.

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y una comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) para los factores principales y su interacción. Para el análisis se empleó el paquete estadístico SAS ver. 9.4 (SAS Institute Inc., 2013).

Resultados y discusión

Concentración de nutrimentos en hojas, tallos y frutos de tomate

La relación Cl/aniones en la SN provocó diferencias significativas en las concentraciones de Na y Cl en hojas, tallos y frutos, y de Ca en hojas (Cuadros 2, 3 y 4). Las concentraciones de Na en los órganos vegetales tuvieron una relación inversa a la relación Cl/aniones, ya que al incrementar la proporción de 25/100 a 75/100 la concentración de Na se redujo ($P \leq 0.05$). Xu, Magen, Tarchitzky y Kafkafi (2000) obtuvieron un rango crítico de toxicidad (RCT) de 4 a 7 mg Cl·g⁻¹ de materia seca en especies de plantas sensibles al Cl, y de 15 a 35 mg Cl·g⁻¹ de materia seca en plantas tolerantes. En el presente trabajo, se obtuvieron 26, 24 y 29 mg Cl·g⁻¹ de materia seca de hojas en las relaciones 25, 50 y 75 de Cl/aniones, valores que están en el RCT. La absorción excesiva de Cl en la relación 75/100 de Cl/aniones ocasionó una menor absorción de Na (Cuadro 2) debido a las relaciones desbalanceadas del Na⁺ con el Ca²⁺ y el K⁺ en la SN (Fageria, 2001).

Hubo una relación positiva entre la concentración de Cl en la SN y en las hojas, tallos y frutos; por ello, los mayores valores de Cl en estos órganos se obtuvieron con 75/100 de Cl/aniones, y los menores se observaron con 25/100 de Cl/aniones, excepto en hojas (Cuadros 2, 3 y 4). Villa-Castorena, Catalán-Valencia, Inzunza-Ibarra, y Ulery (2006), Kowalczyk et al. (2008), Giuffrida, Martorana, y Leonardi (2009), Komosa y Górnaiak (2015), y Parra-Terraza (2016) obtuvieron la misma relación en los contenidos de Cl en hojas y las concentraciones de Cl en SN. El aumento de la concentración de Cl en la SN incrementó la cantidad de Cl en los frutos, lo cual

Table 2. Effects of Cl⁻/anions and Na⁺/cations ratios in the nutrient solution and K, Ca, Mg, Na and Cl concentrations on tomato leaves.**Cuadro 2. Efectos de las relaciones Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva y las concentraciones de K, Ca, Mg, Na y Cl sobre las hojas de jitomate.**

Factor	K	Ca	Mg	Na	Cl
	(%)				
Percentage ratio of Cl ⁻ /anions/ Relación porcentual de Cl ⁻ /aniones					
25/100	1.08 a ^z	0.85 a	0.15 a	0.40 a	2.6 b
50/100	1.08 a	0.60 b	0.19 a	0.36 a	2.4 c
75/100	1.03 a	0.66 b	0.18 a	0.31 b	2.9 a
Percentage ratio of Na ⁺ /cations/ Relación porcentual de Na ⁺ /cationes					
25/100	1.17 a	0.69 a	0.18 a	0.30 b	2.5 a
50/100	1.08 a	0.74 a	0.18 a	0.38 a	2.7 a
75/100	0.93 b	0.69 a	0.17 a	0.40 a	2.7 a
CV (%)	10.6	22.9	32.7	16.6	7.7
LSD/DMSH	0.09	0.13	0.04	0.04	0.20
Cl ⁻ /anions x Na ⁺ /cations/ Cl ⁻ /aniones x Na ⁺ /cationes	ns	ns	ns	ns	ns

CV = coefficient of variation; LSD = least significant difference. ^zMeans with the same letters within each column and each factor do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = not significant.

CV = coeficiente de variación; DMSH = diferencia mínima significativa honesta. ^zMedias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = no significativo.

Table 3. Effects of Cl⁻/anion and Na⁺/cation ratios in the nutrient solution and concentrations of K, Ca, Mg, Na and Cl on tomato stems.**Cuadro 3. Efectos de las relaciones Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva y las concentraciones de K, Ca, Mg, Na y Cl sobre tallos de jitomate.**

Factor	K	Ca	Mg	Na	Cl
	(%)				
Percentage ratio of Cl ⁻ /anions/ Relación porcentual de Cl ⁻ /aniones					
25/100	1.14 a ^z	0.19 a	0.08 a	0.49 a	2.37 b
50/100	1.14 a	0.18 a	0.08 a	0.43 b	2.57 a
75/100	1.12 a	0.19 a	0.09 a	0.42 b	2.59 a
Percentage ratio of Na ⁺ /cations/ Relación porcentual de Na ⁺ /cationes					
25/100	1.19 a	0.21 a	0.09 a	0.38 b	2.4 b
50/100	1.16 a	0.21 a	0.08 a	0.47 a	2.5 ab
75/100	1.05 b	0.16 a	0.07 a	0.49 a	2.6 a
CV (%)	5.0	32.9	36.3	15.6	6.2
LSD/DMSH	0.04	0.05	0.02	0.05	0.15
Cl ⁻ /anions x Na ⁺ /cations/ Cl ⁻ /aniones x Na ⁺ /cationes	ns	ns	ns	ns	ns

CV = coefficient of variation; LSD = least significant difference. ^zMeans with the same letters within each column and each factor do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = not significant.

CV = coeficiente de variación; DMSH = diferencia mínima significativa honesta. ^zMedias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = no significativo.

Table 4. Effects of Cl⁻/anion and Na⁺/cation ratios in the nutrient solution and concentrations of K, Ca, Mg, Na and Cl on tomato fruit.**Cuadro 4. Efectos de las relaciones Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva y las concentraciones de K, Ca, Mg, Na y Cl sobre frutos de jitomate.**

Factor	K	Ca	Mg (%)	Na	Cl
Percentage ratio of Cl ⁻ /anions / Relación porcentual de Cl ⁻ /aniones					
25/100	1.29 a ²	0.11 a	0.05 a	0.25 a	2.0 b
50/100	1.31 a	0.10 a	0.05 a	0.22 ab	2.2 ab
75/100	1.28 a	0.11 a	0.04 a	0.21 b	2.3 a
Percentage ratio of Na ⁺ /cations / Relación porcentual de Na ⁺ /cationes					
25/100	1.30 a	0.11 a	0.05 a	0.20 b	2.2 a
50/100	1.29 a	0.10 a	0.04 a	0.21 b	2.2 a
75/100	1.29 a	0.10 a	0.05 a	0.26 a	2.1 a
CV (%)	2.5	18.7	13.4	15.4	11.9
LSD/DMSH	0.02	0.01	0.013	0.03	0.26
Cl ⁻ /anions x Na ⁺ /cations / Cl ⁻ /aniones x Na ⁺ /cationes	ns	ns	ns	ns	ns

CV = coefficient of variation; LSD = least significant difference. ²Means with the same letters within each column and each factor do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = not significant.

CV = coeficiente de variación; DMSH = diferencia mínima significativa honesta. ²Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = no significativo.

et al. (2011) reported that Na reduced K concentrations and increased Na amounts in aerial biomass of barley plants. Rengasamy (2010b) notes that Na accumulation can cause toxicity or ion imbalance, which is consistent with the present study with the 75/100 Na⁺/cations ratio.

The antagonism of Na over K has been reported in several studies (del Amor, Martinez, & Cerdá, 2001; Halperin & Lynch, 2003; Turhan & Eris, 2005; Parida & Das, 2005; Naeini, Khoshgoftarmanesh, & Fallahi, 2006; Lu, Shang, Xu, Korpelainen, & Li, 2009; Vaghela, Patel, Pandey, & Pandey, 2010; Tavakkoli et al., 2011; Ahmad, Kholgh-Sima, & Mirzaei, 2013; Shiyab et al., 2013; Komosa & Górnaiak, 2015; Parra-Terraza, 2016), where the higher Na⁺ concentration in the NS reduced root hydraulic conductivity by displacing K⁺ from the exchange sites, and reducing K uptake and accumulation in leaves. The higher Na concentrations in plant organs obtained with Na increases in the NS coincide with the findings reported by Tavakkoli et al. (2011), Shiyab et al. (2013), Maqsood et al. (2015) and Wang, Fang, and Wang (2015).

Aerial biomass production

The dry weight of leaves, stems and plants decreased ($P \leq 0.05$) due to the factors Cl⁻/anions and Na⁺/cations

es similar a lo reportado por Komosa y Górnaiak (2015). Por otro lado, las relaciones 50/100 y 75/100 de Cl⁻/aniones redujeron las concentraciones de Ca en las hojas, lo cual coincide con lo reportado por Parra-Terraza (2016), y Komosa y Górnaiak (2015).

La relación porcentual 75/100 de Na⁺/cationes en la SN redujo significativamente las concentraciones de K en hojas (Cuadro 2) y en tallos (Cuadro 3), e incrementó las concentraciones de Na en hojas, tallos y frutos (Cuadros 2, 3 y 4), respecto a la relación 25/100 de Na⁺/cationes. Tavakkoli et al. (2011) reportaron que el Na redujo las concentraciones de K y aumentó las cantidades de Na en la biomasa aérea de plantas de cebada. Rengasamy (2010b) menciona que la acumulación de Na puede ocasionar toxicidad o desbalance de iones, lo cual coincide con el presente estudio con la relación 75/100 de Na⁺/cationes.

El antagonismo del Na sobre el K ha sido reportado en diversas investigaciones (del Amor, Martinez, & Cerdá, 2001; Halperin & Lynch, 2003; Turhan & Eris, 2005; Parida & Das, 2005; Naeini, Khoshgoftarmanesh, & Fallahi, 2006; Lu, Shang, Xu, Korpelainen, & Li, 2009; Vaghela, Patel, Pandey, & Pandey, 2010; Tavakkoli et al., 2011; Ahmad, Kholgh-Sima, & Mirzaei, 2013; Shiyab et al., 2013; Komosa & Górnaiak, 2015; Parra-Terraza, 2016), donde la mayor concentración de

in the NS (Table 5). In each factor, the highest organ dry weights were obtained with 25/100 Cl⁻/anions and 25/100 Na⁺/cations. In contrast, the lowest dry weights were obtained with 75/100 Cl⁻/anions and 75/100 Na⁺/cations, which is attributed to the toxicity caused by excessive Cl⁻ and Na⁺ uptake, and to the nutrient imbalance generated by affecting K and Ca uptake and accumulation in leaves. Tavakkoli et al. (2010) point out that toxicity and nutrient imbalance reduce stomatal conductance and photosynthesis, which in turn reduces dry matter in broad bean (*Vicia faba* L.) plants. Shiyab et al. (2013) and Giuffrida et al. (2009) report the reduction of dry biomass in tomato due to the effect of Cl⁻, Na⁺ and NaCl. In the present work, high Cl⁻ and Na⁺ ratios reduced plant dry weight by 48 and 25.8 %, respectively, with the greatest reduction caused by Cl⁻. Dang et al. (2010) obtained similar results in barley, wheat and triticale. Tavakkoli et al. (2010) state that high Cl⁻ concentrations in soil reduce barley growth more compared to Na⁺. Tavakkoli et al. (2011) report 10-45 % reductions in plant biomass in barley caused by Cl⁻, while Na⁺ reduced biomass accumulation from 20 to 25 %.

Na⁺ en la SN redujo la conductividad hidráulica de la raíz al desplazar al K⁺ de los sitios de intercambio, y reducir la absorción y la acumulación de K en las hojas. Las mayores concentraciones de Na en los órganos vegetales obtenidas con los incrementos de Na en la SN coinciden con lo reportado por Tavakkoli et al. (2011), Shiyab et al. (2013), Maqsood et al. (2015) y Wang, Fang, y Wang (2015).

Producción de biomasa aérea

El peso seco de hojas, tallos y plantas disminuyó ($P \leq 0.05$) por los factores Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la SN (Cuadro 5). En cada factor, los mayores pesos secos de órganos se obtuvieron con 25/100 de Cl⁻/aniones y 25/100 de Na⁺/cationes. En contraste, los menores pesos secos se obtuvieron con 75/100 de Cl⁻/aniones y 75/100 de Na⁺/cationes, lo cual se atribuye a la toxicidad provocada por la absorción excesiva de Cl⁻ y Na⁺, y al desbalance nutrimental generado al afectar la absorción y acumulación de K y Ca en hojas. Tavakkoli et al. (2010) señalan que la toxicidad y el desbalance nutrimental reducen la conductancia

Table 5. Effects of Cl⁻/anion and Na⁺/cation ratios in the nutrient solution on leaf dry weight (LDW), stem dry weight (SDW) and plant dry weight (PDW).

Cuadro 5. Efectos de las relaciones Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva sobre el peso seco hojas (PSH), peso seco de tallos (PST) y peso seco de plantas (PSP).

Factor	LDW/PSH	SDW/PST	PDW/PSP
	(g)		
Percentage ratio of Cl ⁻ /anions / Relación porcentual de Cl ⁻ /aniones			
25/100	110.6 a ^z	77.4 a	188.0 a
50/100	78.0 b	65.7 b	143.7 b
75/100	51.8 c	45.8 c	97.7 c
Percentage ratio of Na ⁺ /cations / Relación porcentual de Na ⁺ /cationes			
25/100	99.2 a	66.7 a	165.9 a
50/100	77.2 b	65.8 a	143.0 b
75/100	65.4 b	57.6 b	123.0 c
CV (%)	26.2	15.9	17.4
LSD/DMSH	17.2	8.2	20.4
Cl ⁻ /anions x Na ⁺ /cations / aniones x Na ⁺ /cationes	ns	ns	ns

CV = coefficient of variation; LSD = least significant difference. ^zMeans with the same letters within each column and each factor do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = not significant.

CV = coeficiente de variación; DMSH = diferencia mínima significativa honesta. ^zMedias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = no significativo

Yield and its components

The Cl⁻/anions and Na⁺/cations factors of the NS decreased ($P \leq 0.05$) fruit number and fruit yield (Table 6). By increasing the Cl⁻/anions ratio from 25 to 75/100, fruit number and fruit yield decreased by 54.5 and 50.8 %, respectively. This contrasts with the results of Kowalczyk et al. (2008) and Voogt and Sonneveld (2004), who, when applying 14.4 and 17 mg Cl⁻·L⁻¹, detected no effect on tomato yield in peat and rockwool substrates, respectively. The differences in yields obtained in the above-mentioned studies and those reported in the present work are associated with the culture media, production systems and genotypes used, the concentrations of Cl⁻-accompanying cations (Caines & Shennan, 1999) and the salinity of the medium (Komosa & Górnjak, 2015). Similarly, by increasing the Na⁺/cations ratio from 25/100 to 75/100, fruit number and yield decreased by 50 and 45.7 %, respectively (Table 6).

estomática y la fotosíntesis, lo cual a su vez disminuye la materia seca en plantas de habas (*Vicia faba* L.). Shiyab et al. (2013) y Giuffrida et al. (2009) reportaron la reducción de la biomasa seca en jitomate por efecto del Cl⁻, Na⁺ y NaCl. En el presente trabajo, las relaciones altas de Cl⁻ y Na⁺ redujeron el peso seco de planta en 48 y 25.8 %, respectivamente, donde la mayor reducción fue provocada por el Cl⁻. Dang et al. (2010) obtuvieron resultados similares en cebada, trigo y triticale. Tavakkoli et al. (2010) mencionan que altas concentraciones de Cl⁻ en el suelo reducen más el crecimiento de la cebada en comparación con el Na⁺. Tavakkoli et al. (2011) reportaron reducciones del 10 al 45 % en la biomasa vegetal en cebada, provocadas por el Cl⁻, mientras que el Na⁺ redujo de 20 a 25 % la acumulación de biomasa.

Rendimiento y sus componentes

Los factores Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes de la SN disminuyeron ($P \leq 0.05$) el número de frutos y el

Table 6. Effects of Cl⁻/anions and Na⁺/cations ratios in the nutrient solution on fruit number (FN), mean fruit weight (MFW) and fruit yield (FY) (average of six cuts).

Cuadro 6. Efectos de las relaciones Cl⁻/aniones y Na⁺/cationes en la solución nutritiva sobre el número de frutos (NF), peso medio de frutos (PMF) y rendimiento de frutos (RF) (promedio de seis cortes).

Factor	FN/NF	MFW (g)/PMF (g)	FY (t·ha ⁻¹)/RF (t·ha ⁻¹)
Percentage ratio of Cl ⁻ /anions/ Relación porcentual de Cl ⁻ /aniones			
25/100	11 a ²	123 a	29.9 a
50/100	7 b	129 a	20.5 b
75/100	5 b	124 a	14.7 c
Percentage ratio of Na ⁺ /cations/ Relación porcentual de Na ⁺ /cationes			
25/100	10 a	125 a	26.5 a
50/100	9 a	129 a	24.1 a
75/100	5 b	122 a	14.4 b
CV (%)	37.3	20.8	25.1
LSD/DMSH	3	23.3	5.5
Cl ⁻ /anions x Na ⁺ /cations / Cl ⁻ / aniones x Na ⁺ /cationes	ns	ns	ns

CV = coefficient of variation; LSD = least significant difference. ²Means with the same letters within each column and each factor do not differ statistically Tukey, $P \leq 0.05$. ns = not significant.

CV = coeficiente de variación; DMSH = diferencia mínima significativa honesta. ²Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = no significativo.

Conclusions

The 75/100 percentage ratio of Cl⁻/anions in the nutrient solution increased Cl concentrations in leaves, stems and fruits by 11.5, 9.3 and 15 %, respectively, compared to 25/100 Cl⁻/anions. On the other hand, the 75/100 Na⁺/cations ratio increased Na concentrations in leaves and stems by 33.3 and 28.9 %, respectively, compared to 25/100 Na⁺/cations.

Dry matter production and yield of tomato were reduced due to excessive Cl and Na accumulation and nutrient imbalance in the plants. The reduction in yield, caused by the higher Cl⁻/anions and Na⁺/cations ratios, indicate that both ions were toxic to tomato and their main effects were individual.

End of English version

References / Referencias

- Ahmad, S. T., Kholgh-Sima, N. A., & Mirzaei, H. H. (2013). Effects of sodium chloride on physiological aspects of *Salicornia persica* growth. *Journal of Plant Nutrition*, 36(3), 401-414. doi: 10.1080/01904167.2012.746366
- Caines, A. M., & Shennan, C. (1999). Interactive effects of Ca²⁺ and NaCl salinity on the growth of two tomato genotypes differing in Ca²⁺ deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 37(7-8), 569-576. doi: 10.1016/S0981-9428(00)80109-6
- Colmenero-Flores, J. M., Franco-Navarro, J. D., Cubero-Font, P., Peinado-Torrubia, P., & Rosales, M. A. (2019). Chloride as a beneficial macronutrient in higher plants: new roles and regulation. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19), 4686. doi: 10.3390/ijms20194686
- Dang, Y. P., Dalal, R. C., Routley, R., Schwenke, G. D., & Daniells, I. (2006). Subsoil constraints to grain production in the cropping soils of the north-eastern region of Australia: an overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46(1), 19-35. doi: 10.1071/EA04079
- Dang, Y. P., Dalal, R. C., Buck, S. R., Harms, B., Kelly, R., Hochman, Z., ... Orange, D. (2010). Diagnosis, extent, impacts, and management of subsoil constraints in the northern grains cropping region of Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 48(2), 105-119. doi: 10.1071/SR09074
- del Amor, F. M., Martínez, V., & Cerdá, A. (2001). Salt tolerance of tomato plants as affected by stages of plant development. *HortScience*, 36(7), 1260-1263. doi: 10.21273/HORTSCI.36.7.1260
- Fageria, V. D. (2001). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 1269-1290. doi: 10.1081/PLN-100106981
- Flowers, T. J., Munns, R., & Colmer, T. D. (2015). Sodium chloride toxicity and the cellular basis of the salt tolerance in halophytes. *Annals of Botany*, 115(3), 419-431. doi: 10.1093/aob/mcu217
- Franco-Navarro, J. D., Brumós, J., Rosales, M. A., Cubero-Font, P., Talón, M., & Colmenero-Flores, J. M. (2016). Chloride regulates leaf cell size and water relations in tobacco plants. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 873-891. doi: 10.1093/jxb/erv502
- Franco-Navarro, J. D., Rosales, M. A., Álvarez, R., Cubero-Font, P., Calvo, P., Díaz-Espejo, A., & Colmenero-Flores, J. M. (2019). Chloride as a macronutrient increases water-use efficiency by anatomically driven reduced stomatal conductance and increased mesophyll diffusion to CO₂. *The Plant Journal*, 99(5), 815-831. doi: 10.1111/tbj.14423

Fin de la versión en español

rendimiento de frutos (Cuadro 6). Al incrementar la relación Cl⁻/aniones de 25 a 75/100, el número de frutos y el rendimiento de frutos redujeron 54.5 y 50.8 %, respectivamente. Lo anterior contrasta con los resultados de Kowalczyk et al. (2008) y Voogt y Sonneveld (2004), quienes, al aplicar 14.4 y 17 mg Cl⁻·L⁻¹, no detectaron efectos sobre el rendimiento de jitomate en sustrato de turba y lana de roca, respectivamente. Las diferencias en los rendimientos obtenidos en las investigaciones mencionadas y las reportadas en el presente trabajo están asociadas con los medios de cultivo, los sistemas de producción y genotipos empleados, las concentraciones de los cationes acompañantes del Cl⁻ (Caines & Shennan, 1999) y la salinidad del medio (Komosa & Górnaiak, 2015). De igual manera, al aumentar la relación de Na⁺/cations de 25/100 a 75/100, el número y el rendimiento de frutos disminuyeron 50 y 45.7 %, respectivamente (Cuadro 6).

Conclusiones

La relación porcentual 75/100 de Cl⁻/aniones en la solución nutritiva aumentó 11.5, 9.3 y 15 % las concentraciones de Cl en hojas, tallos y frutos, respecto a la relación 25/100 de Cl⁻/aniones. Por otro lado, la relación 75/100 de Na⁺/cations incrementó 33.3 y 28.9 % las concentraciones de Na en hojas y tallos en comparación con 25/100 de Na⁺/cations.

La producción de materia seca y el rendimiento del jitomate redujeron a causa de la acumulación excesiva de Cl y Na, y al desbalance nutrimental en las plantas. La reducción en el rendimiento, provocada por las mayores relaciones de Cl⁻/aniones y Na⁺/cations, indican que ambos iones fueron tóxicos para el jitomate y sus efectos principales fueron individuales.

- Geilfus, C. M. (2018). Chloride: from nutrient to toxicant. *Plant and Cell Physiology*, 59(5), 877-886. doi: 10.1093/pcp/pcy071
- Giuffrida, F., Martorana, M., & Leonardi, C. (2009). How sodium chloride concentration in the nutrient solution influences the mineral composition of tomato leaves and fruits. *HortSciences*, 44(3), 707-711. doi: 10.21273/HORTSCI.44.3.707
- Grattan, S. R., & Grieve, C. M. (1998). Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 78(1-4), 127-157. doi: 10.1016/S0304-4238(98)00192-7
- Halperin, S. J., & Lynch, J. P. (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. *Journal of Experimental Botany*, 54(390), 2035-2043. doi: 10.1093/jxb/erg219
- Idowu, M. K., & Aduayi, E. A. (2006). Effects of sodium and potassium application on water content and yield of tomato in Southwestern Nigeria. *Journal of Plant Nutrition*, 29(12), 2131-2145. doi: 10.1080/01904160600972761
- Kawakami, K., Umena, Y., Kamiya, N., & Shen, J. R. (2009). Location of chloride and its possible functions in oxygen-evolving photosystem II revealed by X-ray crystallography. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(21), 8567-8572. doi: 10.1073/pnas.0812797106
- Khayyat, M., Tafazoli, E., Rajaei, S., Vasifesheras, M., Mahmoodabadi, M. R., & Sajjadinia, A. (2009). Effects of NaCl and supplementary potassium on gas exchange, ionic content, and growth of salt-stressed strawberry plants. *Journal of Plant Nutrition*, 32(6), 907-918. doi: 10.1080/01904160902870689
- Komosa, A., & Górnjak, T. (2015). The effect of chloride on yield and nutrient interaction in greenhouse tomato (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) grown in rockwool. *Journal of Plant Nutrition*, 38(3), 355-370. doi: 10.1080/01904167.2014.934466
- Kowalczyk, W., Dyśko, J. & Kaniszewski, S. (2008). Effect of nutrient solution pH regulated with hydrochloric acid on the concentration of Cl⁻ ions in the root zone in soilless culture of tomato. *Journal of Elementology*, 13(2), 245-254. doi: 10.1080/01904167.2014.934466
- Lu, S., Shang, S., Xu, X., Korpelainen, H., & Li, C. (2009). Effect of increased alkalinity on Na⁺ and K⁺ contents, lipid peroxidation and antioxidative enzymes in two populations of *Populus cathayana*. *Biologia Plantarum*, 53(3), 597-600. doi: 10.1007/s10535-009-0109-9
- Maqsood, M. A., Khan, M. K., Naem, M. A., Hussain, S., Azis, T., & Schoenau, J. (2015). High sodium in irrigation water caused B toxicity at low soil solution and shoot B concentration in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 38(5), 728-741. doi: 10.1080/01904167.2014.939286
- Maron, L. (2019). From foe to friend: the role of chloride as a beneficial macronutrient. *The Plant Journal*, 99(5), 813-814. doi: 10.1111/tpj.14498
- Marschner, H. (2012). *Mineral nutrition of higher plants*. London, U. K.: Academic Press.
- Motsara, M. R., & Roy, R. N. (2008). *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Naeini, M. R., Khoshgoftarmanesh, A. H., & Fallahi, E. (2006). Partitioning of chlorine, sodium, and potassium and shoot growth of three pomegranate cultivars under different levels of salinity. *Journal of Plant Nutrition*, 29(10), 1835-1843. doi: 10.1080/01904160600899352
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *FAO Statistical Databases*. Retrieved June, 2020 from <http://faostat.fao.org>
- Parida, A., & Das, A. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349. doi: 10.1016/j.ecoenv.2004.06.010
- Parra-Terraza, S. (2016). Cloruro/aniones y sodio/cationes en soluciones nutritivas y composición mineral de cultivares de tomate. *Terra Latinoamericana*, 34(2), 219-227. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000200219
- Plaza, B. M., Jiménez, S., & Lao, M. T. (2012). Influence of salt stress on the nutritional state of cordyline fruticosa var. Red Edge, 2: sodium, potassium, calcium, and magnesium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(2), 234-242. doi: 10.1080/00103624.2011.638583
- Rengasamy, P. (2010a). Osmotic and ionic effects of various electrolytes on the growth of wheat. *Australian Journal of Soil Research*, 48(2), 120-124. doi: 10.1071/SR09083
- Rengasamy, P. (2010b). Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37(7), 613-620. doi: 10.1071/FP09249
- Rodríguez-Navarro, A. (2000). Potassium transport in fungi and plants. *Biochimica et Biophysica Acta - Reviews on Biomembranes*, 1469(1), 1-30. doi: 10.1016/S0304-4157(99)00013-1
- SAS Institute Inc. (SAS). (2013). *User's guide, ver. 9.4*. Cary, N. Y., USA: Author. Retrieved from <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/qcug/63964/PDF/default/qcug.pdf>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). *Producción agrícola*. Retrieved June, 2020 from <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Shiyab, S. M., Shatnawi, M. A., Shibli, R. A., Alsmeirat, N. G., Alayad, J., & Akash, M. W. (2013). Growth, nutrient acquisition, and physiological responses of hydroponic grown tomato to sodium chloride salt induced stress. *Journal of Plant Nutrition*, 36(4), 665-676. doi: 10.1080/01904167.2012.754037
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. In: *Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture* (pp. 633-650). Nueva York, USA: International Society for Soilless Culture

- Tavakkoli, E., Rengasamy, P., & McDonald, G. K. (2010). High concentrations of Na⁺ and Cl⁻ ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, 61(15), 4449-4459. doi: 10.1093/jxb/erq251
- Tavakkoli, E., Fatehi, F., Coventry, S., Rengasamy, P., & McDonald, G. K. (2011). Additive effects of Na⁺ and Cl⁻ ions on barley growth under salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, 62(6), 2189-2203. doi: 10.1093/jxb/erq422
- Turhan, E., & Eris, A. (2005). Effects of sodium chloride applications and different growth media on ionic composition in strawberry plant. *Journal of Plant Nutrition*, 27(9), 1653-1665. doi: 10.1081/PLN-200026009
- Vaghela, P. M., Patel, A. D., Pandey, I. B., & Pandey, A. N. (2010). Implications of calcium nutrition on the response of *Salvadora persica* (Salvadoraceae) to soil salinity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(22), 2644-2660. doi: 10.1080/00103624.2010.517881
- Villa-Castorena M., Catalán-Valencia, E. A., Inzunza-Ibarra, M. A. & Ulery, A. L. (2006). Absorción y translocación de sodio y cloro en plantas de Chile fertilizadas con nitrógeno y crecidas con estrés salino. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(1), 79-88. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61029111>
- Voogt, W., & Sonneveld, C. (2004). Interactions between nitrate (NO₃⁻) and chloride (Cl⁻) in nutrient solution for substrate-grown tomato. *Acta Horticulturae*, 644, 359-368. doi: 10.17660/ActaHortic.2004.644.48
- Wang, L., Fang, C., & Wang, K. (2015). Physiological responses of *Leymus Chinensis* to long-term salt, alkali and mixed salt-alkali stresses. *Journal of Plant Nutrition*, 38(4), 526-540. doi: 10.1080/01904167.2014.937874
- Wege, S., Gilliam, M., & Henderson, S. W. (2017). Chloride not simply a 'cheap osmoticum', but a beneficial plant macronutrient. *Journal of Experimental Botany*, 68(12), 3057-3069. doi: 10.1093/jxb/erx050
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2001). Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: A review. *Annals of Botany*, 88(6), 967-988. doi: 10.1006/anbo.2001.1540
- Xu, G., Magen, H., Tarchitzky, J., & Kafkafi, U. (2000). Advances in chloride nutrition of plants. *Advances in Agronomy*, 68, 97-150. doi: 10.1016/S0065-2113(08)60844-5