

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



MONITOREO DE LA CONCENTRACIÓN Y DINÁMICA DE  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  Y  $\text{Ca}^{2+}$  EN  
LA SOLUCIÓN DEL SUELO Y SU EFECTO EN EL CULTIVO DE TOMATE  
INDETERMINADO

Tesis

Que presenta FELICITO AUSENCIO DÍAZ VÁZQUEZ  
como requisito parcial para obtener el Grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA PROTEGIDA

Saltillo, Coahuila

Julio 2023

MONITOREO DE LA CONCENTRACIÓN Y DINÁMICA DE  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  Y  $\text{Ca}^{2+}$  EN  
LA SOLUCIÓN DEL SUELO Y SU EFECTO EN EL CULTIVO DE TOMATE  
INDETERMINADO

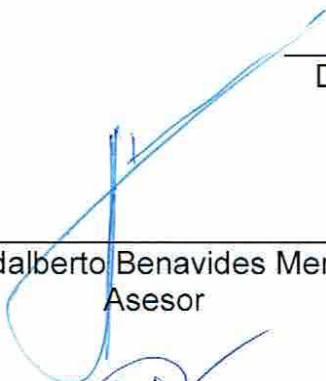
Tesis

Elaborada por FELICITO AUSENCIO DÍAZ VÁZQUEZ como requisito parcial  
para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Protegida con la  
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría




---

Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Director de Tesis




---

Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor




---

Dr. Marcelino Cabrera De La Fuente  
Asesor




---

Dr. Valentín Robledo Torres  
Asesor




---

Dr. Antonio Juárez Maldonado  
Asesor



---

Dr. Alvaro García León  
Asesor



---

Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Posgrado  
UAAAN

## AGRADECIMIENTOS

**A Don Antonio Narro Rodríguez**, hombre visionario que sentó las bases para la formación de una escuela de agricultura la cual desde su origen, ha permitido que el hijo del campesino tenga la oportunidad de poder ser un profesionista de bien al servicio de la nación. Hoy, a 100 años de fundación de aquel proyecto, no me queda más que agradecer a quien sin duda ha formado al día de hoy, la familia más numerosa de agrónomos al servicio del campo mexicano.

**A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, A la Subdirección de Posgrado y Al programa de Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida, por el apoyo en infraestructura, personal administrativo y académico que ha permitido la formación y consolidación de profesionales con un posgrado de calidad.

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, que mediante la asignación de beca (CVU 928127) otorgó el financiamiento para la realización de mis estudios de Posgrado.

**Al Dr. Alberto Sandoval Rangel**, por su apoyo incondicional, seguimiento y por las oportunidades brindadas para desarrollar capacidades del área profesional.

**Al Dr. Adalberto Benavidez Mendoza**, por sus acertadas observaciones, sugerencias y aportes a mi proceso de formación doctoral.

**Al Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente**, por sus oportunas observaciones, recomendaciones y sentido humano, aportados a mi formación doctoral.

**Al Dr. Valentín Robledo Torres**, por transmitir y compartir su conocimiento, motivar y hacerme ver algunos aspectos importantes dentro del proyecto de doctorado.

**Al Dr. Antonio Juárez Maldonado**, por participar activamente en la revisión y correcciones de los productos obtenidos durante el periodo de estudios del doctorado.

**Al Dr. Álvaro García León**, por participar activamente en el proyecto aportando sus conocimientos y material vegetal utilizados para el establecimiento del proyecto.

**A Alexandra Asanovna Elvakyán**, por regalarnos a los estudiantes de posgrados en países en vías de desarrollo, la posibilidad de acceder a un cúmulo de información cuyo acceso restringido y monetizado limita el debate científico de nuestros resultados de investigación.

**A mi familia** por el apoyo incondicional y motivación siempre que fue necesario.

**A mis compañeros**, Carlos Garza, Ángeles Sariñana, Perla Cárdenas, Luis Trujillo, Guadalupe Magdaleno y Tomás Félix, por el apoyo mutuo en las diversas actividades y tareas a realizar, sin duda hicieron más ameno el proceso de formación.

**A mis amigos**, Juan Dolores, Carlos Velasco, Iván Gómez, Jaziel Ovilla, Mario Jerónimo, Uriel Colín, Mario Rodríguez, Leonel Salinas, Samuel Vargas, Aarón Isaías, Roberto Mérida, Magaly Villeda y Maribel Tapia por la amistad y trabajo conjunto realizado durante mi estancia en la universidad, me llevo mucho aprendizaje de cada uno de ustedes.

## **DEDICATORIA**

### **A mi esposa Ana,**

Por ser mi motivación y por darme las fuerzas para conseguir los logros y objetivos de vida que siempre juntos planeamos, gracias por escucharme y ser refugio de mis preocupaciones e inquietudes, hoy toca cosechar un éxito que ambos hemos sembrado.

### **A mi hija Danna,**

Por llegar a nuestras vidas a completar ese espacio que teníamos guardado por algún tiempo. Tu llegada me ha dado fortaleza y valor en momentos en que las preocupaciones parecen sobrepasarme. Quiero ser siempre tu motivador y el mejor ejemplo de superación para ti.

## CARTA DE ACEPTACIÓN DE PRIMER ARTÍCULO



# TERRA LATINOAMERICANA

*Difusión Científica de la Sociedad Mexicana  
de la Ciencia del Suelo A.C.*

Texcoco, Estado de México, 22 de febrero de 2023

Estimado Dr. Alberto Sandoval-Rangel

Se notifica que la contribución:

**“Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (*Solanum lycopersicum* L.)”**

Cuyos autores son:

Felicito Ausencio Díaz-Vázquez, Marcelino Cabrera-De la Fuente, Adalberto Benavides-Mendoza, Valentín Robledo- Torres, Antonio Juárez-Maldonado, Álvaro García-León y Alberto Sandoval-Rangel

Ha sido aceptada para su publicación en la revista Terra Latinoamericana volumen 41. Así como también se le invita a pagar la publicación con un costo de \$3,000.00 pesos m/n, ya que este órgano difusor se sostiene de las contribuciones.

Por favor realice el depósito a la cuenta del banco BBVA No. **0189356592**, a nombre de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., clave interbancaria No. **012180001893565928**.

Envíe el comprobante de la transferencia o ficha de depósito en efectivo en una versión PDF al Tesorero de la SMCS L.C. **Jorge Luis Araiza Corres (lic.araiza.corres@hotmail.com)**, junto con la información correspondiente para la elaboración de su factura (si así se requiere), de ser posible el mismo día de pago o bien a más tardar dos días después, debe adjuntar la **constancia de situación fiscal actualizada no más de 3 meses**, en virtud de que la factura que se extiende es electrónica y debe coincidir con la fecha del depósito, con posterioridad no podrá ser generada.

*Atentamente*

**Dr. Bernardo Murillo Amador**  
Editor en Jefe  
Revista Terra Latinoamericana


<http://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>  
ISSN 2395-8030.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2012-092017263600-203

LA REVISTA TERRA LATINOAMERICANA SE ENCUENTRA EN EL ÍNDICE DE REVISTAS DEL CONACYT, SCIELO, REDALYC, LATINDEX, DOAJ, EBSCO, SCOPUS (ELSEVIER)

Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México- Texcoco km 38.5 Apdo. Post. 45, Chapingo. 56230 Texcoco, Estado de México, México. Tel. 595 952 1721.  
E-mails Editor en Jefe: [editor@terralatinoamericana.org.mx](mailto:editor@terralatinoamericana.org.mx)

## ACUSE DE RECIBO DE ENVÍO DE SEGUNDO ARTÍCULO

[Agronomy] Manuscript ID: agronomy-2443035 - Submission Received  Recibidos x



**Editorial Office** <agronomy@mdpi.com>  
para mí, Marcelino, Valentin, Antonio, Adalberto, Alberto ▼

 inglés ▼ > español ▼ Traducir mensaje

Dear Mr. Díaz-Vázquez,

Thank you very much for uploading the following manuscript to the MDPI submission system. One of our editors will be in touch with you soon.

Journal name: Agronomy

Manuscript ID: agronomy-2443035

Type of manuscript: Article

Title: Short-term dynamics of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Na<sup>+</sup> in soil solution grown with tomato in greenhouse conditions

Authors: Felicito Ausencio Díaz-Vázquez, Marcelino Cabrera De La Fuente, Valentin Robledo-Torres, Antonio Juárez-Maldonado, Adalberto Benavides-Mendoza, Alberto Sandoval-Rangel \*

Received: 25 May 2023

E-mails: [ausenciodiaz1991@gmail.com](mailto:ausenciodiaz1991@gmail.com), [cafum7@hotmail.com](mailto:cafum7@hotmail.com), [robledo3031@gmail.com](mailto:robledo3031@gmail.com), [juma841025@gmail.com](mailto:juma841025@gmail.com), [abenmen@gmail.com](mailto:abenmen@gmail.com), [asandovalr16@gmail.com](mailto:asandovalr16@gmail.com)

## ACUSE DE RECIBO DE ENVÍO DE TERCER ARTÍCULO



**Taylor & Francis**  
Taylor & Francis Group

Dear Alberto Sandoval-Rangel,

Thank you for your submission.

Submission ID	231417549
Manuscript Title	Dynamics of NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , K <sup>+</sup> and Ca <sup>2+</sup> in Tomato Petiole Sap Evaluated in Short-Term
Journal	Journal of Plant Nutrition

You can check the progress of your submission, and make any requested revisions, on the [Author Portal](#).

Thank you for submitting your work to our journal.

If you have any queries, please get in touch with [LPLA-peerreview@journals.tandf.co.uk](mailto:LPLA-peerreview@journals.tandf.co.uk).

Kind Regards,  
*Journal of Plant Nutrition* Editorial Office



## ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA .....	vi
CARTA DE ACEPTACIÓN DE PRIMER ARTÍCULO.....	vii
ACUSE DE RECIBO DE ENVÍO DE SEGUNDO ARTÍCULO.....	viii
ACUSE DE RECIBO DE ENVÍO DE TERCER ARTÍCULO .....	ix
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivos generales.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Origen y clasificación taxonómica del cultivo.....	4
Producción mundial .....	4
Producción nacional .....	5
Requerimientos nutricionales del cultivo.....	5
Funcionalidad del N, Ca y K en el cultivo de tomate .....	7
La solución del suelo: Formación e importancia.....	8
Iones de $\text{NO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{K}^+$ en la solución suelo .....	12
PRIMER ARTÍCULO.....	17
Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo del suelo y productividad en tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) .....	17
SEGUNDO ARTÍCULO.....	29
Short-term dynamics of $\text{NO}_3^-$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ and $\text{Na}^+$ in soil solution grown with tomato in greenhouse conditions.....	29
TERCER ARTÍCULO.....	41
Dynamics of $\text{NO}_3^-$ , $\text{K}^+$ and $\text{Ca}^{2+}$ in tomato petiole sap evaluated in short-term .....	41
CONCLUSIONES GENERALES .....	63
REFERENCIAS .....	64

## INTRODUCCIÓN

El cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cuyo centro de domesticación ha sido discutido, parece haberse cultivado por primera vez, en regiones de Los Andes peruanos y la región central de México de forma simultánea en periodos de tiempo similares (Peralta & Spooner, 2007). Lo anterior otorga al cultivo una importancia histórica dentro de la formación de grandes culturas, formando parte importante de su ingesta y comercialización, al ser cultivado de forma alterna o asociado a otros cultivos en el sistema milpa (Toledo & Barrera-Bassols, 2020).

En la actualidad, además de la importancia cultural, presenta importancia económica nacional y mundial, en función del volumen y valor monetario de la producción comercializada, los cuales colocan al país como el noveno productor mundial, siendo EUA, Canadá y Japón los principales destinos de la producción nacional (SIAP, 2022a). En este sentido, los volúmenes de producción como los rendimientos promedio, están influenciados directamente por el potencial genético de la variedad o híbrido, el sistema productivo, ambiente y manejo nutricional aplicado al cultivo (Murillo-Amador *et al.*, 2000, Canales-Almendares *et al.*, 2021).

En cuanto al manejo nutricional, sobre todo en sistemas productivos establecidos en suelo, deberán considerarse las propiedades físicas y químicas de este medio, las cuales inciden en el aporte y disponibilidad de nutrientes minerales y por lo tanto puede modificar el potencial productivo del cultivo (Strawn *et al.*, 2020). Dentro de los componentes del suelo, es la fracción líquida o solución del suelo el medio de interés debido a que es en este medio acuoso, la concentración de los nutrientes biodisponibles para el cultivo, puede ser modificado por el complejo de cambio del suelo, la degradación de materia orgánica, fracción de gases en el suelo y por factores ambientales (Schwab, 2012). La solución del suelo es entonces el mejor indicador de la disponibilidad de nutrientes para la planta, por encima de los valores obtenidos en un análisis

de fertilidad de suelo, el cual únicamente reporta la capacidad potencial de aporte mineral del suelo (Johnston, 2011)

En este sentido, diversos estudios han permitido observar el impacto del aporte mineral sobre variables de crecimiento y productividad del cultivo (Sánchez-González *et al.*, 2014, Vazquez *et al.*, 2014,, García-León *et al.*, 2018). Sin embargo, una cantidad limitada de estudios se han enfocado a estudiar la biodisponibilidad de nutrientes minerales en la solución del suelo como efecto del manejo nutricional aplicado. Así, se ha observado que en función de la fuente mineral, algunos parámetros químicos y la concentración de iones en la solución del suelo puede ser modificada (Lao *et al.*, 2004, Canales-Almendares *et al.*, 2021). Por otro lado, se ha observado que los niveles de biodisponibilidad de algunos iones dependen en directamente del tipo de suelo y cultivo establecido (Lince *et al.*, 2015, Narváez-Ortiz *et al.*, 2015). Estos estudios han permitido la generación de valores de referencia de la concentración de iones en suelo, para determinados cultivos, bajo condiciones y manejo nutricional específico (Hernández *et al.*, 2014), lo anterior abre la posibilidad de realizar estudios específicos para cultivos de interés bajo condiciones de suelo y clima determinados. Con este enfoque de investigación y por la necesidad de generar información acerca de la dinámica que guardan determinados iones en la solución del suelo, para el cultivo de tomate indeterminado, se desarrolló el experimento el cual tuvo como objetivos, los siguientes:

## **Objetivo general**

Medir la concentración y determinar la dinámica de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , CE y pH en la solución del suelo y su efecto en desarrollo y producción del cultivo de tomate.

## **Objetivos específicos**

1. Medir la concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , pH y CE en la solución del suelo cultivado con tomate bajo condiciones protegidas.
2. Establecer la dinámica temporal de los iones a corto y mediano plazo.
3. Evaluar el efecto de la concentración y dinámica de los iones en la solución del suelo sobre el crecimiento y componentes de rendimiento del cultivo de tomate.

## **Hipótesis**

La concentración y dinámica de  $\text{NO}_3^-$  en suelo es afectada principalmente por el nivel de aplicación de fuentes externas, mientras que variaciones atribuibles al material parental del suelo y a la fenología del cultivo afectan en mayor medida la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ .

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Origen y clasificación taxonómica del cultivo

Aunque las investigaciones científicas no definen con exactitud el sitio de domesticación del cultivo, existe evidencia de un proceso simultáneo de domesticación en regiones de Los Andes peruanos y el centro de México (Peralta & Spooner, 2007). Históricamente el cultivo de *Solanum lycopersicum* L. ha sido parte importante a nivel comercial y alimenticio del desarrollo de grandes civilizaciones en Mesoamérica (Toledo & Barrera-Bassols, 2020). Este proceso de domesticación ha generado la obtención de variedades que ofrecen una diversidad de formas, tamaños y colores de fruto (Monge-Pérez & Loría-Coto, 2021).

La clasificación taxonómica del cultivo recientemente ha sido discutida (Escobar & Lee, 2009), los primeros botánicos europeos clasificaron al cultivo de tomate dentro del género *Lycopersicon* en la familia de las Solanáceas, sin embargo, en el transcurso de los años se han realizado algunas modificaciones a su clasificación (Labate *et al.*, 2007). Así, Luckwill (1943) lo clasificó en el género *Solanum*, refiriéndose al cultivo como *Solanum pomiferum*, mientras que (Tournefort, 1694) fue el primero en clasificarlo como *Lycopersicon*. Sin embargo y a pesar de que en los últimos años, tanto *S. lycopersicum* como *Lycopersicum esculentum* han sido empleados, esta última ha dejado de ser reconocida como la forma correcta de referirse al cultivo, siendo *S. lycopersicum*, como originalmente lo clasificó Linneo la forma más utilizada y aceptada (Linnaeus, 1753).

### Producción mundial

Actualmente, el cultivo de tomate (*S. lycopersicum*) a nivel mundial se produce principalmente en 88 países alrededor del mundo. En 2021 el cultivo generó un valor de la producción de \$USD 83, 634, 654 (miles de dólares) y un volumen de producción aproximado de 294, 100, 950 toneladas cosechadas en 5, 171,

195 hectáreas. Siendo los principales países productores: China con 67, 636, 724 toneladas, seguido de India con 21, 181, 000 toneladas, Turquía con 13, 095, 258 toneladas (FAO, 2023).

### **Producción nacional**

A nivel nacional, en México, para el año 2022 el cultivo de tomate generó un volumen de producción de 3, 185, 507 toneladas, en 47, 328 hectáreas cosechadas, siendo Sinaloa el estado con mayor producción (SIAP, 2022b). Lo anterior permitió que el cultivo aportara el 20.8% en la participación de la producción nacional de hortalizas. En México, además, el tomate fresco presenta un consumo *per cápita* de 12.4 kg y su comercio a nivel internacional ha generado divisas de \$USD 1, 956, 130, 157 dólares (SIAP, 2022a).

Lo anterior sustenta la importancia del cultivo, razón por la cual, en la actualidad es utilizado en diversas investigaciones, orientadas a evaluar la tolerancia a condiciones bióticas y abióticas desfavorables (Alam *et al.*, 2021, Esteban *et al.*, 2021), el efecto de injertos bajo determinadas condiciones (Zhang *et al.*, 2019)(Xiaohui *et al.*, 2019), la aplicación de bioestimulantes (Attia *et al.*, 2021), sistemas de producción (De la Rosa-Rodríguez *et al.*, 2020, Komosa *et al.*, 2020) y en algunos casos, el manejo nutricional (Bilalis *et al.*, 2018, Canales-Almendares *et al.*, 2021).

### **Requerimientos nutricionales del cultivo**

Al considerarse una hortaliza de frutos (CEDRSSA, 2020), cuya producción se puede manejar en esquemas de ciclos cortos (Sánchez *et al.*, 2021) hasta ciclos largos en especies de crecimiento indeterminado (Gázquez *et al.*, 2017) la demanda nutricional varía de forma significativa para algunos minerales en específico, en función de la variedad y sistema productivo. Como todas las plantas superiores, el cultivo de tomate requiere para constituir sus tejidos y realizar sus funciones metabólicas de todo el espectro de macro y microelementos considerados como esenciales (Mengel & Kirkby, 2000).

Steiner (1961) sugirió una solución nutritiva que aporta de forma balanceada los macro y micro elementos requeridos por los cultivos de fruto, la cual sugiere el aporte en meq L<sup>-1</sup> de los macroelementos NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 12.0, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>: 1.0, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>: 5.0, K<sup>+</sup>: 7.0, Ca<sup>2+</sup>: 9.0, Mg<sup>2+</sup>: 4.0 mientras que sugiere el aporte de microelementos en mg L<sup>-1</sup> de Fe: 1.33, Mn: 0.62, Zn: 0.11, B: 0.44, Cu: 0.02, Mo: 0.048. Este método de aporte nutricional ha sido actualmente utilizado para realizar investigación en una diversidad de cultivos, entre ellos el tomate (Lazcano-Bello *et al.*, 2021, Leana-Acevedo *et al.*, 2022).

Bajo el mismo tipo de manejo nutricional, se han adecuado soluciones nutritivas con el principio de balance iónico, pero modificando las proporciones entre algunos cationes, por ejemplo, Llanderal *et al.* (2019) utilizó una solución nutritiva compuesta por los macroelementos en mmol L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 13.00, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>: 1.26, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>: 6.82, K<sup>+</sup>: 7.62, Ca<sup>2+</sup>: 5.50 y Mg<sup>2+</sup>: 3.90 para tomate de crecimiento indeterminado. Por su parte, García-Raya *et al.* (2019) han empleado una solución nutritiva para el cultivo de tomate, la cual se componía de (mmol L<sup>-1</sup>) de: NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 11.00, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>: 1.5, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>: 2.00, K<sup>+</sup>: 7.5, Ca<sup>2+</sup>: 5.00, Mg<sup>2+</sup>: 2.00, mientras que Sánchez *et al.* (2021) reporta el uso de una solución nutritiva compuesta por (mg L<sup>-1</sup>): N: 100, P: 25, S: 75, K: 125, Ca: 125, Mg: 20, Fe: 2, Mn: 1, Zn: 0.2, B: 0.5 y Cu: 0.2

Otros métodos de manejo nutricional basan el requerimiento mineral del cultivo en función de la cantidad del elemento extraído en una tonelada de fruto, Betancourt & Pierre (2013) determinó que el cultivo de tomate genera una extracción por planta de 970, 358, 147, 2603 y 405 mg de N, P, K, Ca y Mg respectivamente. Con un criterio similar y mediante el análisis continuo del contenido mineral del cultivo y su crecimiento, pueden desarrollarse curvas de absorción las cuales indican el nivel e intensidad de la extracción de los nutrientes minerales en relación a la edad de la planta (Segura & Contreras, 2015). Esto puede traducirse o expresarse en un requerimiento calculado en kg por tonelada de fruto fresco, al respecto, Gaspar (n.d.) calcula un requerimiento de 2.5-3 kg de N, 0.2-0.3 kg de P, 3-3.5 kg de K, 4.2 kg de Ca y 0.8 kg de Mg por tonelada de fruto a obtener.

## Funcionalidad del N, Ca y K en el cultivo de tomate

Dentro del conjunto de macroelementos considerados esenciales para el correcto crecimiento y desarrollo del cultivo, de forma general, elementos como N y Ca presentaran mayormente funciones estructurales, mientras que para el caso del K, su función será en mayor medida como activador enzimático y regulador osmótico (Lal *et al.*, 2018). Sin embargo, existen funciones específicas que son reguladas o estimuladas por la presencia en mayor o menor medida de estos elementos minerales (Marschner, 2012).

Respecto al N, el elemento cumple funciones estructurales, ya que cerca del 85 del N total en la planta se encuentra formando proteínas, 5% contenido en ADN y ARN y de un 5-10% se encuentra formando compuestos y moléculas de bajo peso molecular (Barker & Pilbeam, 2007). Casi la totalidad del  $\text{NH}_4^+$  absorbido es sintetizado en el sistema radicular a aminoácidos y transportado por el xilema, mientras que el  $\text{NO}_3^-$  en su mayoría puede ser transportado bajo esta forma asimilable siendo concentrado en las vacuolas de las células del área foliar (Mengel & Kirkby, 2000). Aunque el cultivo puede absorber las dos formas asimilables del elemento ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ ), se ha reportado un efecto fitotóxico del amonio cuando su disponibilidad es mayor al nitrato, afectando principalmente la actividad fotosintética, contenido de pigmentos y actividad enzimática (Zhang *et al.*, 2022). La absorción y posterior transporte de las formas asimilables de N a los sitios de demanda está determinada por el balance de  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  y la temperatura ambiental, relaciones de entre 100/0 y 70/30 permiten resultados positivos en rendimiento del cultivo, mientras que tasas de aplicación de  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  cercanas al 30/70 reducen considerablemente el rendimiento (Gong *et al.*, 2019).

El ion  $\text{K}^+$  participa en procesos biológicos como crecimiento meristemático, regulación del estado hídrico de la célula y actividad fotosintética, debido a la alta permeabilidad que presentan las membranas a este ion (Mengel & Kirkby, 2000). Se ha comprobado la regulación osmótica celular del ion en condiciones de estrés hídrico, regulando los procesos de transpiración, así como la entrada



y salida de agua de la célula (De Luca *et al.*, 2021). Procesos como el metabolismo de carbohidratos, la síntesis de proteínas, la activación enzimática, osmoregulación, transferencia de energía y el balance catión-anión a nivel celular dependen de la participación del  $K^+$  (Pathak *et al.*, 2020). Otras funciones como el equilibrio de cargas entre aniones orgánicos e inorgánicos y otras macromoléculas, la regulación del potencial eléctrico de la membrana celular y la homeostasis del pH también han sido reportadas para  $K^+$ , dichas funciones están directamente relacionadas con el balance y regulación de los mecanismos de absorción de  $K^+/NO_3^-$ ;  $Na^+/NO_3^-$ , y  $K^+/Na^+$  (Raddatz *et al.*, 2020).

Respecto al calcio, una serie de investigaciones han comprobado la función de señalización de este ion en la activación de respuestas ante condiciones de estrés abiótico, como el estrés salino mediante la regulación de ciertos receptores de  $Na^+$  y la modulación de vías descendentes de respuesta (Seifikalhor *et al.*, 2019) como el estrés por altas temperaturas mediado por proteínas quinasas dependientes del  $Ca^{2+}$  (Hu *et al.*, 2021), así también, el calcio participa en los procesos de señalización de factores bióticos como *Piriformospora indica* y otros patógenos en tomate (Panda *et al.*, 2019). De forma estructural el calcio participa en la regulación de la permeabilidad de la membrana mediante la formación de puentes entre fosfolípidos y proteínas (Thor *et al.*, 2020), forma pectatos en la membrana celular facilitando la división celular y mejorando la conformación de la estructura celular, lo que se traduce en mejor firmeza y vida de anaquel del fruto (Haleema *et al.*, 2020), por otro lado, el calcio también está implicado en interacciones con hormonas como ABA, regulando de forma sistémica la maduración del fruto (Xiong *et al.*, 2021).

### **La solución del suelo: Formación e importancia**

El suelo pudiera considerarse como una mezcla de aire, agua y material sólido bajo diversas proporciones, las cuales modifican tanto sus propiedades físicas y químicas (Toýmurodovna & Ibrohimovna, 2022). La composición promedio del suelo bajo condiciones ideales presenta 45% de fracción mineral, 5% de

materia orgánica, 25% de aire y 25% de agua, esta fracción líquida es conocida como agua del suelo o solución del suelo, siendo el medio en el que se mantienen biodisponibles algunos elementos minerales considerados como esenciales para el cultivo (Strawn *et al.*, 2020). Otra conceptualización de la solución del suelo, se refiere a esta como un sistema natural, abierto y dinámico, cuya composición resulta del conjunto de reacciones interactivas entre los minerales del suelo, materia orgánica y metabolismo biológico (Schwab, 2012). Sin embargo, tanto los niveles de biodisponibilidad de los elementos minerales en sus formas absorbibles y algunos factores propios de la solución del suelo como el potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción, son afectados por un sistema de interacciones de factores bióticos, abióticos y antropogénicos (Figura 1).

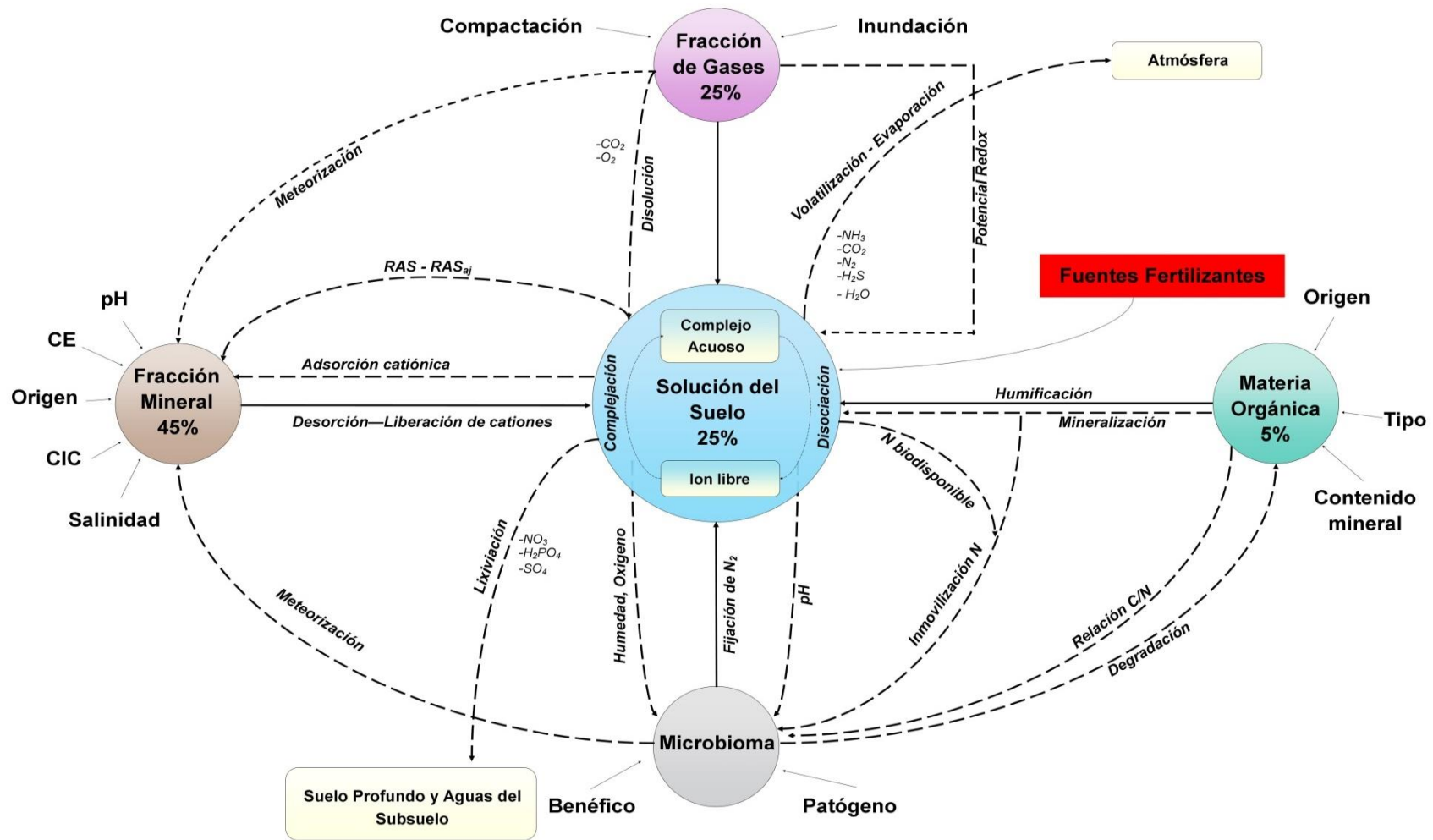
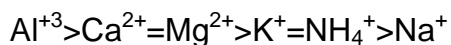


Figura 1. Sistema de interacciones de las fracciones del suelo y su incidencia sobre la composición de la solución del suelo. Elaboración propia.

La cantidad de materia orgánica (MO) presente en el suelo tiene un efecto significativo sobre la acidez del mismo. Se ha observado que cuando el contenido de MO es mayor al 4%, los procesos de acidificación del suelo, reflejados en la solución del suelo, se revierten (Cruz-Macías *et al.*, 2020). Los efectos de estabilización del pH en la solución del suelo y una mejora en la densidad aparente y el espacio poroso del suelo por la aplicación de enmiendas de MO, parece estar originado por la liberación de ácidos orgánicos (húmicos y fúlvicos) producto de la degradación de la MO por la actividad microbiana (Adekiya *et al.*, 2020), del mismo modo, el proceso de mineralización de la MO por actividad microbiana puede liberar cationes base aumentando el pH de la solución del suelo (Masud *et al.*, 2020). Se ha demostrado también que la aplicación de MO al suelo mejora la disponibilidad de elementos minerales como P y N (Kuśmierz *et al.*, 2023, Li *et al.*, 2019). Sin embargo, un proceso inverso a la mineralización de N puede llevarse a cabo cuando el balance de C/N se rompe (Yansheng *et al.*, 2020).

Respecto a la fracción mineral del suelo, esta presenta una serie de propiedades físico-químicas que inciden directamente en la biodisponibilidad de elementos minerales en la solución de ese suelo (Andrade, 2020). Así, la Capacidad de Intercambio Catiónico expresa la cantidad en mEq 100 g de suelo, de cationes que las partículas de arcilla puede intercambiar con la fracción líquida o solución del suelo, esta se determina por la adsorción y desorción que se llevan a cabo entre ambas porciones del suelo, siguiendo el orden en las fuerzas de adsorción (Strawn *et al.*, 2020):



La proporción y el tipo de catión (ácido o base) que ocupe las superficies de las arcillas así como la cantidad de complejos iónicos determinan el pH de la solución del suelo. En suelos con alta pluviosidad los cationes base generalmente son lixiviados, lo que, favorecido con el contenido de MO reduce el pH, mientras que en suelos áridos, la limitada precipitación pluvial permite una mayor saturación de cationes base en las partículas de arcilla, generando

pH alcalino (Pepper & Brusseau, 2019). Bolzan (2017) propone un efecto del pH sobre la carga de los sitios de intercambio, como los óxidos de Fe y Mg, la MO, carbonatos y superficies de arcillas. Aumentos en pH, bajo esta perspectiva, incrementa las cargas negativas y los sitios de intercambio, mientras que una reducción del mismo generaría efectos inversos.

Tanto la CIC como el pH estarán directamente relacionados con la conductividad eléctrica del suelo, considerada como una medición indirecta de la cantidad de sales disueltas en la solución del suelo (Rodríguez-Delgado *et al.*, 2022).

La fracción de gases, incide en la cantidad de CO<sub>2</sub> y oxígeno disuelto en la solución del suelo, sin embargo, la fracción de gases está limitada por algunas propiedades físicas del suelo como la textura y estructura que determina el espacio poroso (Pepper & Brusseau, 2019), la disponibilidad de oxígeno en el suelo o en la solución del suelo, afectada también por la compactación e inundación de origen antropogénico (Torres *et al.*, 2017, Gu *et al.*, 2019) afecta los procesos enzimáticos (Wang *et al.*, 2023), de reducción de minerales como NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a formas nítricas (Agbeshie *et al.*, 2020) y la biodisponibilidad y absorción de elementos minerales en general (Kumaragamage *et al.*, 2019, Marschner, 2021).

Adicionalmente, el manejo nutricional mediante el aporte de fuentes minerales externas, puede modificar la composición mineral, pH y CE de la solución del suelo de forma directa (Canales-Almendares *et al.*, 2021), generar lixiviación de cationes como los NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Egbi *et al.*, 2020).

### **Iones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> en la solución suelo**

Considerando entonces a la solución del suelo como un entorno acuoso capaz de responder a las interacciones con las demás fracciones que componen el suelo y con los aportes exógenos de fuentes minerales (Llanderal *et al.*, 2019) aunado a lo expuesto por (Schwab, 2012) quien considera a la solución del suelo como el centro de la actividad química y biológica de la tierra, ya que con

ausencia de esta, las reacciones de microorganismos, minerales y meteorización se vuelven lentas o se detienen, es lógico que el comportamiento dinámico y concentración de las moléculas, iones y demás compuestos disueltos en este medio se modifiquen.

De esta manera un análisis por separado de la dinámica y respuesta de los iones a los componentes del sistema de la solución del suelo resulta necesario para comprender su comportamiento en este medio líquido. Dicho análisis debe considerar la mayoría de los factores e interacciones que puedan generar una respuesta en la biodisponibilidad del ion a estudiar.

De forma general, el N se encuentra distribuido con 98% en la litosfera (roca, suelo, sedimentos y fondo marino) y 2% en la atmósfera, sin embargo, solo el 0.02% del N global está contenido en suelos, lagos, fondo marino y organismos vivos, y solo una parte mínima está disponible para la nutrición mineral de las plantas de forma natural (Barker & Pilbeam, 2007). Más del 70% del N incorporado al suelo se da por fijación biológica ( $\approx 100 \text{ kg ha}^{-1}$  al año), mientras que fenómenos como la lluvia fijan una menor cantidad de N ( $\approx 9.2 \text{ kg ha}^{-1}$  anualmente), dicho N es fijado en forma orgánica ( $\text{N}_2$ ) el cual sufre reacciones que producen formas inorgánicas ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ ), sin embargo, las cantidades fijadas por fenómenos naturales sugiere un soporte mínimo al desarrollo del cultivo (Barker & Pilbeam, 2007).

Una vez fijado al suelo, el  $\text{N}_2$  atraviesa un proceso denominado amonificación, la cual consiste en la reducción del N orgánico a formas amoniacales, que posteriormente y dependiendo de la presencia de microorganismos, temperaturas y falta o exceso de agua en el suelo, podrán oxidarse a formas nítricas, obteniéndose así ambas formas absorbibles ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ ), sin embargo, su diferente naturaleza iónica produce comportamiento diferenciado (Mengel & Kirkby, 2000).

De esta manera, la naturaleza catiónica del  $\text{NH}_4^+$  permite que este sea retenido por los coloides del suelo en su fase de intercambio, reduciendo su lixiviación, la cual únicamente se incrementa en suelos con baja capacidad de intercambio

catiónico (Nommik & Vahtras, 1982). El grado de fijación de este ion depende del tipo de minerales del suelo, en montmorillonitas el agua permite la hidratación y movilización de cationes, mientras que en minerales tipo mica como silicatos de aluminio, hierro, calcio, magnesio o minerales alcalinos los enlaces de unión no permiten la lixiviación de cationes adsorbidos (Nommik & Vahtras, 1982).

El contenido de amonio en suelo incrementa de forma significativa por efecto de las precipitaciones o humectación del suelo (Feyissa *et al.*, 2021). El amonio biodisponible en la solución del suelo presenta una vida promedio corta, ya que puede ser absorbido por la planta o en su caso, oxidado fácilmente, convirtiéndose a formas nítricas. Por otro lado, el  $\text{NH}_4^+$  puede sufrir un proceso de volatilización en forma de  $\text{NH}_3$  siempre que el pH se ubique en valores cercanos al neutro, mientras que en pH ácidos la formación de  $\text{NH}_3$  se reduce (Neina, 2019).

Las formas oxidadas de N, como  $\text{NO}_3^-$  en suelo, no se ven modificadas por la presencia de altas precipitaciones (Feyissa *et al.*, 2021). Sin embargo, el pH incide en los niveles de formación de nitrato. Valores de pH de 6-8 incrementan los ritmos de nitrificación, mientras que en algunos suelos, un valor de pH de 4.2 reduce la nitrificación a valores poco significantes (Neina, 2019). Un proceso inverso a la nitrificación permite la reducción del nitrato a óxido nítrico gaseoso (NO), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ) siempre que el oxígeno en la solución del suelo sea limitado (Neina, 2019). Al ser un anión, el nitrato no participa en los procesos de intercambio iónico de las partículas del suelo con la solución del suelo, por lo que es más móvil en el suelo, pudiendo sufrir procesos de lixiviación, desnitrificación y volatilización (Mengel & Kirkby, 2000).

En relación al potasio, este mineral se encuentra en relaciones de 2.3% en la corteza terrestre, en forma iónica  $\text{K}^+$ , pudiendo encontrarse en el suelo como potasio total, potasio no intercambiable, potasio intercambiable y potasio en la solución del suelo, siendo la concentración observable en la solución del suelo, la fracción realmente disponible para las plantas, de esta manera, el flujo del ion

depende en gran medida del grado de difusión del agua en el suelo, del grado de humedad del suelo y la cantidad de  $K^+$  disuelto (Barker & Pilbeam, 2007).

Un proceso de adsorción ocurre para  $K^+$  generalmente bajo condiciones húmedas, la densidad de carga del mineral del suelo, la extensión del borde, la concentración de  $K^+$  además de la naturaleza y concentración de cationes en la solución del suelo, que compiten por cargas en la superficie del mineral, así, para minerales 2:1 de arcilla las fuerzas de adsorción siguen una secuencia de vermiculita>illita>esmectita (Mengel & Kirkby, 2000). Se considera que el flujo de  $K^+$  de los feldespatos y micas hacia la solución del suelo es unidireccional, mientras que el flujo del  $K^+$  contenido entre las capas de las micas parcialmente meteorizadas es bidireccional (Bell *et al.*, 2020).

En suelos no perturbados, la concentración de  $K^+$  en la solución del suelo es baja, en rangos de (100-1000  $\mu\text{m}$ ) debido al proceso de adsorción por la fracción mineral del suelo, el potasio además puede lixiviarse en niveles bajos, cuando el aporte de  $K^+$  por fuentes exógenas supera la capacidad de retención de los minerales del suelo y la capacidad de absorción de la planta (Hinsinger, 2021). Dentro de los factores que influyen en la concentración de  $K^+$  se consideran las tasas de difusión de  $K^+$  en la solución del suelo circundante que no ha sido agotado, la cantidad de  $K^+$  desorbible de las superficies así como el efecto regulador de otros cationes básicos. Del mismo modo, la CIC guarda una relación negativa con la disponibilidad de  $K^+$ , ya que cuando esta se incrementa, la disponibilidad de  $K^+$  tiende a disminuir (Bell *et al.*, 2020).

El calcio por su parte, representa el 3.64% de la corteza terrestre, considerándose como el elemento con mayor presencia en comparación a otros nutrientes vegetales (Mengel & Kirkby, 2000). El calcio se encuentra en estructuras minerales como los aluminio-silicatos, feldespatos, anfíboles, fosfatos y carbonatos. En suelos calcáreos el calcio puede encontrarse formando complejos como  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$  (Mengel & Kirkby, 2000).

En la solución del suelo, al interactuar con los coloides, este ion puede saturar espacios con cargas negativas libres, incrementando el pH actuando como un



catión básico (Neina, 2019). Por otro lado, se ha observado una relación exponencial negativa de los valores de calcio intercambiable con el porcentaje de saturación de  $Al^{+3}$  en suelos ácidos, provocado por la aplicación excesiva de fertilizantes amoniacales, tanto sulfatos como nitratos (Cruz-Macías *et al.*, 2020).

Del mismo modo, la cantidad de calcio intercambiable puede ser modificado por la aplicación de biocarbono, sin embargo, el grado de variación está en función del tipo de suelo (Hailegnaw *et al.*, 2019). En suelos sódicos, el desplazamiento del  $Na^{+}$  y saturación de sitios de intercambio con  $Ca^{2+}$  mediante la aplicación de yeso agrícola resulta en reducciones en el pH y mejora de los niveles de  $Na^{+}$  (Panzardi *et al.*, 2020).

## PRIMER ARTÍCULO

### Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo del suelo y productividad en tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

TERRA  
LATINOAMERICANA



**Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (*Solanum lycopersicum* L.)**  
**Influence of four concentrations of Steiner solution on nutrients in soil solution and productivity in tomato (*Solanum lycopersicum* L.)**

**Felicitó Ausencio Díaz-Vázquez<sup>1</sup> , Marcelino Cabrera-De la Fuente<sup>1</sup> ,**  
**Adalberto Benavides-Mendoza<sup>1</sup> , Valentín Robledo-Torres<sup>1</sup> ,**  
**Antonio Juárez-Maldonado<sup>1</sup> , Álvaro García-León<sup>2</sup> y Alberto Sandoval-Rangel<sup>1\*</sup> **

<sup>1</sup> Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, 25315 Saltillo, Coahuila, México.

\* Autor para correspondencia (asandovalr16@gmail.com)

<sup>2</sup> Complejo Agrícola Nuevo León Unido. El Berrendo km 171, Anahuac, 67850 Galeana, Nuevo León, México.

Editor de Sección: Dr. Pablo Preciado Rangel

## RESUMEN

El desarrollo y productividad de los cultivos agrícolas está directamente relacionado con el suministro nutricional que estos reciben. La hipótesis de esta investigación es que la concentración de iones medidos en la solución del suelo, permite evaluar la eficiencia del manejo nutricional y su efecto sobre el cultivo, así, la concentración de iones está condicionada por el aporte mineral y los procesos de intercambio iónico del suelo. El objetivo de ésta investigación, fue medir el efecto de la aplicación continua de cuatro concentraciones de solución nutritiva sobre la concentración de iones en la solución del suelo y la respuesta en el cultivo de tomate bajo invernadero. El ensayo se estableció en suelo calcáreo bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, con plantas de tomate indeterminado. Los tratamientos fueron cuatro concentraciones con diferente proporción de la solución Steiner modificada para el cultivo de tomate: 1) 50, 2) 75, 3) 100 y 4) 125%, que fueron aplicadas de forma continua por fertirriego. En cada tratamiento se extrajo la solución del suelo y se midió la concentración de los iones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{+2}$ , el pH y la conductividad eléctrica durante 18 semanas. Al mismo tiempo, se midió la respuesta en el cultivo. La concentración de la solución nutritiva, aplicada de forma constante al cultivo de tomate, presenta una relación directa con la disponibilidad de nutrientes. La solución nutritiva al 125% generó mejor crecimiento, fisiología, calidad comercial y rendimiento agronómico. El calcio fue el único elemento que se detectó en niveles suficientes en la solución del suelo a partir de una concentración de 50% en la solución nutritiva, debido a su alta disponibilidad original del suelo.



#### Cita recomendada:

Díaz-Vázquez, F. A., Cabrera-De la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Torres, V., Juárez-Maldonado, A., García-León, A., & Sandoval-Rangel, A. (2023). Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. e1646. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1646>

Recibido: 5 de septiembre de 2022.  
Aceptado: 11 de diciembre de 2022.  
Artículo. Volumen 41.  
Febrero de 2023.

**Palabras clave:** concentración de iones, solución nutritiva, productividad, variables agronómicas.

## SUMMARY

The development and productivity of agricultural crops is directly related to the nutritional supply they receive. The hypothesis of this trial is that the concentration of ions measured in the soil solution allows evaluating the efficiency of the nutritional management and its effect on the crop - the concentration of ions are conditioned by the mineral supply and the ion exchange processes of the soil. Thus, the objective of the experiment is to measure the effect of the continuous application of four nutrient solution concentrations on the concentration of ions in the soil solution and the tomato crop response under greenhouse conditions. The trial was established in

calcareous soil under a complete randomized block design with three replications, with indeterminate tomato plants. The treatments were four concentrations of a Steiner solution modified for tomato cultivation: (1) 50, (2) 75, (3) 100 and (4) 125% applied continuously by fertigation. In each treatment the soil solution was extracted, and the concentration of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions, pH and electrical conductivity were measured for 18 weeks at the same time the crop response was measured. The concentration of the nutrient solution applied constantly to the tomato crop has a direct relationship with the availability of nutrients. The nutrient solution at 125% generated better growth, physiology, commercial quality and agronomic yield. Calcium was the only element that was detected in sufficient levels in the soil solution from a concentration of 50% in the nutrient solution because of its high original availability in the soil.

**Index words:** ion concentration, nutrient solution, productivity, agronomic variables.

## INTRODUCCIÓN

La fertilización de los cultivos es indispensable debido a que su productividad está determinada por el manejo nutricional y la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo de la planta en el medio de cultivo. Por otro lado, el sector agrícola mundial presenta problemáticas como el incremento en el precio de fertilizantes (Bárcena-Ibarra, 2022), degradación y erosión de la superficie cultivable, bajo contenido mineral del suelo y bajos rendimientos de la cosecha (Zhang *et al.*, 2020).

En cultivos establecidos en suelo, la solución del suelo (SS) es el medio en el cual los iones esenciales se mantienen disueltos y pueden ser absorbidos por el sistema radicular (Lal, Kathpalia, Sisodia y Shakya, 2018). De esta manera, la SS es un indicador de la disponibilidad de nutrientes aportados por fertilización y los liberados del sistema coloidal del suelo (Hernández-Díaz, Chailloux, Moreno, Igarza y Ojeda, 2014). La disponibilidad de nutrientes en la SS es afectada por el tipo de suelo, profundidad del muestreo, intensidad de extracción de nutrientes del cultivo, tipo de cultivo establecido, etapa fenológica, manejo nutricional y pH de la SS, modificado por la presencia de iones de aluminio,  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  (Osorio, 2012; Hernández *et al.*, 2014; Narváez-Ortiz, Morales, Benavides y Reyes, 2015; Lince-Salazar, Rodríguez y Sadeghian, 2015; Llanderal, García, Contreras, Segura y Lao, 2019). El estudio de la disponibilidad de iones en la SS, permite adecuar la nutrición mineral a niveles esperados, en función del requerimiento del cultivo y la etapa fenológica. Los macronutrientes que participan en la nutrición del cultivo desempeñan funciones estructurales, de regulación o agentes redox, por lo anterior su aplicación incrementa su crecimiento, desarrollo, rendimientos, crecimiento y calidad comercial (Tripathi, Singh, Chauhan, Prasad y Dubey, 2014). Al respecto, la Ley del Mínimo propuesta por Justus Von Liebig, menciona que el rendimiento de un cultivo está determinado por el elemento nutritivo presente en menor cantidad (Mengel y Kirkby, 2000).

En la actualidad, el uso de ionómetros con tecnología ISE (*Ions Selective Electrodes*) permiten realizar un monitoreo en tiempo real *in situ* de las condiciones nutrimentales de la SS, para iones como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  (Kim *et al.*, 2021) pH y CE. Esto permite una aproximación a las condiciones nutrimentales del suelo y la corrección de deficiencias en la disponibilidad de nutrientes mediante fertilización (Peña-Fleitas, Gallardo Padilla, Rodríguez y Thompson, 2021), generándose con esto valores de referencia de la concentración de iones en SS para condiciones de producción definidas (Hernández *et al.*, 2014).

El incremento del precio de fertilizantes y el deterioro del suelo, hace necesaria la aplicación de manejo nutrimental racional. Por ello, se necesitan estudios que permitan determinar con base en el monitoreo de nutrientes en la SS, el esquema

nutricional que genere mejor desarrollo y rendimientos del cultivo, para ello, se sugiere que diferentes concentraciones de la solución nutritiva sean evaluadas. Por lo tanto, el objetivo esta investigación, fue evaluar el efecto de cuatro niveles de solución nutritiva aplicados mediante fertirriego, sobre la concentración de nutrientes en la SS y sus repercusiones en el crecimiento, variables fisiológicas y productividad del cultivo de tomate de crecimiento indeterminado en condiciones de invernadero. La hipótesis del estudio propone que existe una asociación entre la concentración de la solución nutritiva aplicada de forma constante y la concentración de nutrientes en la SS lo que a su vez afectará el crecimiento, fisiología, calidad comercial y rendimiento en cultivo de tomate.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del Experimento

El estudio se realizó en un invernadero de baja tecnología, en el Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México. El cultivo se estableció en suelo, el agua y nutrientes fueron aportados mediante fertirriego. El suelo es de tipo calcáreo, con textura franca, 3.2% de materia orgánica, punto de saturación de 43%, capacidad de campo de 22.9%, densidad aparente de 1.13 g cm<sup>-3</sup>, contenido de carbonatos de 55.8%, pH de 8.07, CE de 6.93 dS m<sup>-1</sup>, saturación de bases de 70.6% (18.5 mEq 100 g<sup>-1</sup>) Ca<sup>2+</sup>, 13.9% (3.64 mEq 100 g<sup>-1</sup>) Mg<sup>2+</sup>, 4.12% (1.08 mEq 100 g<sup>-1</sup>) K<sup>+</sup> y 11.3% (2.95 mEq 100 g<sup>-1</sup>) Na<sup>+</sup>.

### Material Biológico

Se emplearon plantas de tomate roma indeterminado, a doble tallo, formadas por el portainjerto Espartaco (Harris & Moran, CA, USA) y el injerto Benedetti (Enza Zaden, Enkhuizen, NL).

### Siembra

El trasplante se realizó el 20 de marzo de 2021, con plantas de 45 días de edad, en camas de 16 m de largo y 1.25 m de separación, a doble hilera con distancia de 0.7 m entre plantas y 0.6 m entre hileras y una densidad de plantación de tres plantas por metro cuadrado.

### Diseño Experimental y Tratamientos Evaluados

Con base en la solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1961) se diseñaron y evaluaron cuatro concentraciones constantes de solución nutritiva para el cultivo de tomate: 1) 50%, 2) 75%, 3) 100% y 4) 125% (SF50, SF75, SF100 y SF125), empleando sistema de riego por goteo para su aplicación. SF100 se compuso de los macroelementos en mEq L<sup>-1</sup>: NO<sub>3</sub> (15), H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (2), SO<sub>4</sub> (5), K (9), Ca (10), Mg (3) y de los microelementos en mg L<sup>-1</sup>: Fe (1.5), Mn (0.6), Zn (0.2), B (0.5), Cu (0.15) y Mo (0.05), con un pH de 6.1 y CE de 2.53. Cada solución se evaluó en tres repeticiones, bajo un diseño de bloques completos al azar.

### Disponibilidad de Nutrientes, CE y pH

Los riegos se aplicaron cuando las lecturas de tensión de humedad de un sensor de matriz granular para humedad de suelo Watermark (Irrometer Company, Inc., CA, USA) se ubicaron entre 60 a 80 centibares. Se extrajo SS de forma semanal empleando lisímetros de succión SSAT 12" (Irrometer Company, Inc., CA, USA) colocados a 35 cm

entre plantas y a 20 cm de profundidad (Hernández *et al.*, 2014). El vacío se generó a 60 kPa empleando una bomba de vacío SSAT 1002 Vacuum Pump (Irrrometer Company, Inc., Riverside, CA, EUA), 15 minutos posteriores al primer riego del día (Canales-Almendares, Borrego, Narváez, González y Benavides, 2021). El vacío se mantuvo por una hora y posteriormente, se extrajo la SS con jeringas de 40 mililitros.

**Concentración de iones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en solución de suelo.** Al momento de obtenerse la SS, se midió la concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , empleando ionómetros (HORIBA, Kyoto, Japón) con los modelos LAQUAtwin- $\text{NO}_3^-$ -11, K-11 y Ca-11 para  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  respectivamente, calibrados a dos puntos (150 y 2000  $\text{mg L}^{-1}$ ), expresándose los resultados en miligramo por litros.

**pH y Conductividad eléctrica (CE) de solución de suelo.** Se midió el pH y CE de la SS obtenida, empleando ionómetros LAQUAtwin pH-11 y EC-11 (HORIBA, Kyoto, Japón) para pH y CE respectivamente, calibrados a dos puntos (4.0 y 7.0 para pH y 1.41- 12.9  $\text{mS cm}^{-1}$  para CE). Los resultados se expresaron en valores de 0 a 14 para pH y  $\text{dS m}^{-1}$  para CE.

### Variables Agronómicas

**Diámetro de tallo principal.** Mediante un vernier digital CD-8 (Mitutoyo Corp., Kanagawa, Japón) se midió de forma semanal, el diámetro de los tallos a 2 cm antes de la primera bifurcación, de seis plantas por tratamiento, se analizaron los valores medios obtenidos semanalmente hasta los 160 días DDT, los resultados se expresaron en milímetros.

**Longitud de los tallos superior e inferior.** De forma semanal, se midieron ambos tallos de seis plantas por tratamiento, a partir de la bifurcación, se consideraron los valores medios de los datos semanales obtenidos hasta los 160 DDT. Los resultados se expresaron en centímetros.

### Variables Fisiológicas

**Conductancia estomática.** A partir de los 75 DDT y de forma semanal, empleando porómetro Leaf Porometer SC-1 (Decagon Devices, Inc., WA, USA) bajo la técnica del estado estacionario descrita por Pask, Pietragalla, Mullan, Chávez y Reynolds (2013) se midió tres veces al día (8:00, 12:00 y 16:00 h) por 11 semanas. Los resultados se expresaron en  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de vapor de agua.

**Contenido de clorofila a, b y total en hoja.** A los 260 DDT y con la técnica propuesta por Munira, Hossain, Zakaria, Ahmed y Islam (2015), se obtuvieron muestras de la lámina foliar de la tercer hoja completamente desarrollada, guardándose en refrigeración mientras se colectaba el total de muestras, durante una hora a 4-5 °C, posteriormente se sometieron a ultracongelación a -80 °C por dos días. En laboratorio se pesó 1 g del material vegetal, se maceró en frío y se mezcló con 100 mL de acetona al 90% y 1 g de carbonato de magnesio como solución extractora. La mezcla se filtró a matraces cubiertos con papel aluminio empleando filtros Whatman No. 1. Se midió absorbancia del extracto obtenido a 663 y 645 nm empleando acetona al 90% como blanco.

Para el cálculo de clorofila a, b y total se emplearon las siguientes ecuaciones (Munira *et al.*, 2015):

$$\text{Clorofila a} = (12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{645}) * \left( \frac{V}{1000 \times W} \right) \quad (1)$$

$$\text{Clorofila b} = (22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663}) * \left( \frac{V}{1000 \times W} \right) \quad (2)$$

$$\text{Clorofila total (a + b)} = ((8.02 \times A_{663}) + (20.20 \times A_{645})) * \left( \frac{V}{1000 \times W} \right) \quad (3)$$

Los resultados se expresaron en  $\text{mg clorofila g}^{-1}$  en tejido fresco.

### Variables de Calidad Comercial y Rendimiento

Las mediciones se realizaron del primer al décimo racimo como parámetro representativo de la producción de ciclo corto del cultivo de tomate. La cosecha se efectuó en etapa 4 de madurez (Pink) presentando una tonalidad rosa o rojo en más del 30% y menos del 60% de la superficie del fruto (USDA, 1975).

**Firmeza del fruto.** Se evaluaron tres frutos por tratamiento y por racimo. Empleando un penetrómetro con una punta de calibre 8 mm (Qa Supplies, VA, USA), expresando los resultados en kilogramo por centímetro cuadrado.

**Sólidos solubles totales.** Empleando un refractómetro portátil Bx-1 (Vee Gee, IL, USA) se extrajo el jugo de tres frutos por tratamiento para cada racimo, obteniéndose los valores en grados Brix (%).

### Variables de Rendimiento

**Número de frutos por racimo.** Se calculó el promedio de frutos de cada racimo de seis tallos evaluados por tratamiento.

**Peso promedio del fruto por racimo.** Empleando una balanza digital SPX2202 (Ohaus, NJ, USA) se obtuvo el PPF, dividiendo el rendimiento del tratamiento por m<sup>2</sup> entre el número de frutos cosechados. El resultado se expresó en gramos por fruto.

**Rendimiento por hectárea.** Se estimó extrapolando los rendimientos de cada tratamiento por m<sup>2</sup> a la superficie de una hectárea. Los resultados se expresaron en Megagramo por hectárea.

### Análisis Estadístico

Se realizaron análisis de varianza ( $P \leq 0.05$ ) bajo un modelo de bloques completos al azar y una prueba de comparación de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Se empleó el paquete estadístico Infostat V. 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Disponibilidad de Nutrientes, CE y pH

Los resultados en cantidad de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de la SS fueron: SF125 > SF100 > SF75 > SF50 (Cuadro 1). SF125 superó los valores de la solución nutritiva para este ion (1162.08 mg L<sup>-1</sup>). El NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no participa en el intercambio iónico del suelo, pudiendo ser absorbido por la planta (Hernández *et al.*, 2014), lixivarse o desnitrificarse, en función del volumen de agua y oxígeno en suelo y cantidad de materia orgánica (Pacheco, Pat y Cabrera, 2002; Canales-Almendares *et al.*, 2021). Este comportamiento permite que el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> aportado por la solución nutritiva se mantenga disponible en la SS. Los contenidos de K<sup>+</sup> en la SS fueron: SF125 > SF75 > SF100 > SF50. El tratamiento SF75 generó crecimiento inicial limitado y baja extracción del ion en etapas de desarrollo, incrementando su disponibilidad en SS, para SF50, la extracción de iones del cultivo, el desgaste del suelo y el aporte nutricional limitado generó adsorción de K<sup>+</sup> en sitios vacíos con cargas negativas en la superficie de los coloides, disminuyendo su concentración en la SS. La solución SF100 produjo un crecimiento inicial acelerado y a su vez, alta demanda del ion reduciendo su disponibilidad en SS. Un aporte elevado de K<sup>+</sup> (SF125) desde etapas tempranas, generó incrementos en la concentración del K<sup>+</sup> en la SS a lo largo del ciclo. Se han observado mayores concentraciones de K<sup>+</sup> en SS en épocas de alta temperatura y menores concentraciones en épocas en que la temperatura es óptima para el cultivo (Hernández *et al.*, 2014). El crecimiento del cultivo incrementa la absorción de nutrientes, disminuyendo la concentración de iones en la SS, siendo más observable en etapa de formación y llenado del fruto (Lao, Jiménez, Eymar y Fernández, 2004; Narváez-Ortiz *et al.*, 2015).

**Cuadro 1. Valores medios para la disponibilidad de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y CE en la solución de suelo cultivado con tomate de tipo indeterminado, de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey (P ≤ 0.05).**

**Table 1. Mean values for NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and EC availability in the soil solution grown with indeterminate type tomato, according to Tukey's mean comparison test (P ≤ 0.05).**

Tratamientos	Concentración de iones y CE en solución del suelo			
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	CE
	----- mg L <sup>-1</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>
SF50%	385.46±12.00 c	155.41±12.55 b	264.59±54.13 b	1.93±0.17 b
SF75%	564.41±60.49 bc	273.31±59.85 ab	274.26±9.37 b	2.33±0.02 b
SF100%	823.70±154.54 b	249.35±26.82 ab	316.22±28.56 ab	2.35±0.13 b
SF125%	1314.63±243.51 a <sup>†</sup>	334.26±39.96 a	433.71±55.49 a	3.08±0.41 a
Media	772.05	253.08	322.2	2.42
Tukey (P ≤ 0.05)	392.93	120.54	121.19	0.64

<sup>†</sup> Medias con letras distintas en la misma columna refieren diferencias significativas, de acuerdo a la prueba de Tukey (P ≤ 0.05). NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitrato; K<sup>+</sup> = potasio; Ca<sup>2+</sup> = calcio; CE = conductividad eléctrica; SF50% = solución nutritiva Steiner al 50%; SF75% = solución nutritiva Steiner al 75%; SF100% = solución nutritiva Steiner al 100%; SF125% = solución nutritiva Steiner al 125%.

<sup>†</sup> Means with different letters in the same column refer to significant differences, according to Tukey's test (P ≤ 0.05). NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = nitrate; K<sup>+</sup> = potassium; Ca<sup>2+</sup> = calcium; EC = electrical conductivity; SF50% = Steiner nutrient solution at 50%; SF75% = Steiner nutrient solution at 75%; SF100% = Steiner nutrient solution at 100%; SF125% = Steiner nutrient solution at 125%.

En relación a Ca<sup>2+</sup>, los resultados fueron: SF125 > SF100 > SF75 > SF50. La concentración de Ca<sup>2+</sup> en SS, presentó valores superiores al aporte vía solución nutritiva (250, 200, 150 y 100 mg L<sup>-1</sup> para SF125, SF100, SF75 y SF50 respectivamente). Los valores en SF50 superaron el aporte de la solución nutritiva en SF100 (200 mg L<sup>-1</sup>). El contenido de Ca<sup>2+</sup> suministrado por la solución nutritiva, más el Ca<sup>2+</sup> contenido en el suelo y liberado desde el complejo de cambio, incrementan su concentración en SS. Al respecto, Hernández *et al.* (2014) reportaron un efecto significativo del aporte mineral sobre la concentración del ion en la SS. Llanderal *et al.* (2019) por su parte, reportaron valores de 160 a 180 mg L<sup>-1</sup> en SS, con aporte de 110 mg L<sup>-1</sup> en la solución nutritiva, en suelo calcáreo. Los valores de pH se mantuvieron en 7.6-7.7, observándose una disminución del pH del suelo. El aporte de sulfatos en solución nutritiva disminuye el pH, por la lixiviación de calcio (Hernández, Orihuela, Pérez, Maríjuan y Furet, 2003), por otro lado, la liberación de ácidos orgánicos y de H<sup>+</sup> por la planta para la absorción de cationes, reduce el pH de la zona radicular (Osorio, 2012). El efecto regulador del pH del suelo, permite que los H<sup>+</sup> sean intercambiados por cationes adsorbidos en los coloides del suelo (Mengel y Kirkby, 2000). La variación en el pH del suelo a los observados en SS se atribuye a la lixiviación de iones base como Na<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup>, al aporte de sulfatos y pH de solución nutritiva y la absorción de cationes de la planta.

La disponibilidad de K<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup> en la SS, son estadísticamente similares para SF50, SF75 y SF100, incidiendo en la CE para estos tratamientos, con SN125, el aporte iónico de la solución nutritiva y el suelo incrementaron la CE. La CE es modificada por la cantidad de cationes y aniones aportados por fertilizantes solubles, suelo y agua, generando un incremento proporcional a la concentración de la solución nutritiva (Lao, Jiménez, Eymar, Fernández y Jiménez, 2003).

### Variables de Crecimiento

A 160 DDT, DTP generó estos resultados: SF125 > SF100 > SF75 > SF50 (Cuadro 2). Para LTI y LTS, se observó que en algunos casos la disponibilidad de nutrientes favoreció una mejor altura en TS y en otros casos en TI, así, para SF125, TS > TI en 2.18%, para SF100, TI > TS en 1.70%, con SF75, TS > TI en 3.32% y con SF50, TI > TS en 5.00%. (Cuadro 4). El uso de cubiertas plásticas en agricultura protegida,

limita la radiación fotosintéticamente activa, incentivando el crecimiento de las plantas por fototropismo (Zermeño-González, Kau, Munguía, Ramírez y Cadena, 2021). Por otro lado, se sugiere un efecto del genotipo sobre los valores de estas variables (Álvarez-Hernández, 2012) sin embargo, en el presente experimento se estableció un mismo genotipo y los resultados se atribuyen a la disponibilidad de nutrientes. De esta manera, la disponibilidad de  $\text{NO}_3^-$  en la SS como precursor de aminoácidos y proteínas estructurales y  $\text{Ca}^{2+}$  como formador estructural de la pared celular, un déficit de elementos como P, Fe y Mg, generan una disminución en la síntesis de clorofila, ATP y ADP requeridos para el desarrollo de la planta.

### Variables Fisiológicas

Los valores más altos para conductancia estomática (CEst) (Cuadro 3) en todos los tratamientos se registraron a las 12:00 h (CEst<sup>2</sup>). Los valores medios en el muestreo de las 8:00 h (CEst<sup>1</sup>) y los valores más bajos en el muestreo de las 16:00 h (CEst<sup>3</sup>). La temperatura alcanza su máximo entre las 12:00 y 14:00 h, lo que incrementa la actividad estomática. Deficiencias nutrimentales y fertilización limitada en tomate, provocan disminución de la CEst relacionada con la concentración de citoquinina (Glanz-Ilan y Wolf, 2020) Del mismo modo, Dell'Amico y Morales (2017) encontraron una reducción de la CEst en plantas con disponibilidad limitada de  $\text{K}^+$ , de  $0.36 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$  de suelo, reportando valores máximos a las 11:00 h de 308, 93, 102 y 151  $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  a los 36, 49, 63 y 77 DDT. La disponibilidad de  $\text{K}^+$  en la solución nutritiva, su disponibilidad en la SS y su absorción y acumulación en el tejido vegetal es vital debido a la participación de este ion en la apertura y cierre estomático y tolerancia al estrés hídrico (Xue *et al.*, 2021; Gao, Liang, Fu, Si y Hamani, 2022) modificando el potencial hídrico de la célula guarda, haciendo que absorba o libere agua (Lal *et al.*, 2018).

La cuantificación de clorofila "a" (Cl A), "b" (Cl B) y total (Cl T), encontró los valores en SF125 > SF100 > SF75 > SF50. El contenido de Cl A fue de 80.82 - 75.28% mayor al contenido de Cl B. Estos valores difieren con lo encontrado por Francesca *et al.* (2020) quienes reportaron rangos de 1.08 a 1.40  $\text{mg g}^{-1}$  de Cl A y 37.29 a 59.47  $\text{mg g}^{-1}$

**Cuadro 2. Valores medios de las variables de crecimiento de plantas de tomate cultivado en suelo, como efecto de la aplicación de cuatro concentraciones de la solución nutritiva.**

**Table 2. Mean values of growth variables of tomato plants grown in soil, as an effect of the application of four concentrations of the nutrient solution.**

Tratamiento	Variables de crecimiento		
	DTP	LTI	LTS
	mm	cm	
SF50%	18.58±0.77 b	399.61±23.89 b	379.61±28.05 b
SF75%	19.54±0.29 a	421.61±32.95 ab	436.11±11.21 a
SF100%	19.68±0.34 a	446.89±3.22 ab	439.28±9.89 a
SF125%	20±0.25 a	451.99±7.20 a†	462.07±15.73 a
Media	19.45	430.03	429.27
Tukey ( $P \leq 0.05$ )	0.73	51.74	43.91

† Medias con letras distintas en la misma columna refieren diferencias significativas, de acuerdo a la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). DTP = diámetro de tallo principal; LTI = longitud de tallo inferior; LTS = longitud de tallo superior; SF50% = solución nutritiva Steiner al 50%; SF75% = solución nutritiva Steiner al 75%; SF100% = solución nutritiva Steiner al 100%; SF125% = solución nutritiva Steiner al 125%.

† Means with different letters in the same column refer to significant differences, according to Tukey's test ( $P \leq 0.05$ ). DTP = main stem diameter; LTI = lower stem length; LTS = upper stem length; SF50% = Steiner nutrient solution at 50%; SF75% = Steiner nutrient solution at 75%; SF100% = Steiner nutrient solution at 100%; SF125% = Steiner nutrient solution at 125%.



**Cuadro 3. Valores promedio de la variable conductancia estomática y contenida de clorofila "a", "b" y total en tejido fresco, como efecto de la aplicación de cuatro concentraciones de solución nutritiva por fertirriego.**  
**Table 3. Average values of the variable stomatal conductance and chlorophyll "a", "b" and total chlorophyll content in fresh tissue, as an effect of the application of four concentrations of nutrient solution by fertigation.**

Tratamiento	Variables fisiológicas					
	CEst <sup>1</sup>	CEst <sup>2</sup>	CEst <sup>3</sup>	CIA	CIB	CIT
	mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>			mg g <sup>-1</sup>		
SF50%	391.52±29.60 c	432.04±12.00 c	336.1±16.15 d	0.73±0.05 c	0.14±0.02 c	0.88±0.08 c
SF75%	443.24±34.37 b	509.56±17.71 b	377.73±26.37 c	0.82±0.01 b	0.18±0.01 b	1.01±0.02 ab
SF100%	477.26±41.88 b	556.13±20.10 b	418.97±19.87 b	0.86±0.02 ab	0.2±0.01 b	1.05±0.02 b
SF125%	524.74±63.59 a	624.16±19.00 a	483.31±25.31 a <sup>†</sup>	0.89±0.01 a	0.22±0.01 a	1.11±0.02 a
Media	459.19	530.47	404.03	0.83	0.19	1.01
Tukey (P ≤ 0.05)	45.85	47.91	32.71	0.06	0.03	0.09

<sup>†</sup> Medias con letras distintas en la misma columna refieren diferencias significativas, de acuerdo con la prueba de Tukey (P ≤ 0.05). CEst<sup>1</sup> = conductancia estomática momento 1; CEst<sup>2</sup> = conductancia estomática momento 2; CEst<sup>3</sup> = conductancia estomática momento 3; CIA = clorofila "a"; CIB = clorofila "b"; CIT = clorofila total; SF50% = Steiner nutrient solution at 50%; SF75% = Steiner nutrient solution at 75%; SF100% = Steiner nutrient solution at 100%; SF125% = Steiner nutrient solution at 125%.

<sup>†</sup> Means with different letters in the same column refer to significant differences, according to Tukey's test (P ≤ 0.05). CEst<sup>1</sup> = stomatal conductance moment 1; CEst<sup>2</sup> = stomatal conductance moment 2; CEst<sup>3</sup> = stomatal conductance moment 3; CIA = chlorophyll "a"; CIB = chlorophyll "b"; CIT = total chlorophyll; SF50% = Steiner nutrient solution at 50%; SF75% = Steiner nutrient solution at 75%; SF100% = Steiner nutrient solution at 100%; SF125% = Steiner nutrient solution at 125%.

de CIB en tejido fresco en plantas de tomate. Se ha observado un efecto directo de la fuente de N sobre el contenido de clorofila en el cultivo de tomate (Rodríguez-Mendoza, Alcántar, Aguilar, Etchevers y Santizó, 1998). El N amoniacal como precursor de ácido glutámico ha incrementado el contenido de CIB en tomate (Serna-Rodríguez, Castro, Colinas, Sahagún y Rodríguez, 2011) a diferencia del presente experimento donde el total de N se aportó como NO<sub>3</sub>; Rodríguez *et al.*, (1998) reportaron decrementos del contenido de clorofila en relación a la edad de la planta, lo que explica los valores bajos obtenidos a los 260 DDT en el presente experimento.

### Variables de Calidad Comercial

Para FF (Cuadro 4), los resultados fueron SF125 > SF100 = SF75 > SF50. Al respecto Bilalis *et al.* (2018) mencionan que la fertilización mineral incrementa esta variable, obteniendo valores de 4.63 kg cm<sup>-2</sup> con fertilización mineral y de 4.40 kg cm<sup>-2</sup> sin fertilización mineral. La FF está relacionada con la disponibilidad de Ca<sup>2+</sup>, el cual se mueve por flujo másico del agua dentro de la planta. Poca disponibilidad de agua en el suelo o la presencia de sales disueltas, medidas con la CE, limitan la absorción de Ca<sup>2+</sup>. Pérez-Labrada *et al.* (2019), mencionan que el estrés salino reduce los valores medios de FF por la reducción en la absorción de agua y nutrientes. Para el presente experimento, los valores de Ca<sup>2+</sup> en SS satisfacen el requerimiento del cultivo y su disponibilidad es creciente en relación a la concentración de la solución nutritiva.

Para la variable SST, los resultados fueron: SN125 > SN100 > SN75 > SN50. Los valores de SF125 y SF100 concuerdan con valores para SST de 4.8 a 8.0% obtenidos por Zhang *et al.* (2020), mientras que SF75 y SF50 generaron valores más bajos. Se ha reportado un efecto positivo del estrés hídrico y la aplicación de compostas de algas marinas al suelo, sobre SST (Bilalis *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020), lo anterior modifica el potencial osmótico y la CE, aunque los autores no reportan datos sobre esta variable. En el presente experimento la CE fue estadísticamente similar en SF100, SF75 y SF50 y no se considera un factor determinante para SST. Por otro lado, el aporte de Mg y P en la solución nutritiva y su disponibilidad en la SS incide en SST, el Mg participa en la formación de clorofila, el proceso de fotosíntesis y

**Cuadro 4. Valores promedio de la variable firmeza de fruto y sólidos solubles totales, como efecto de la aplicación de cuatro concentraciones de solución nutritiva por fertirriego.**

**Table 4. Average values of fruit firmness and total soluble solids as an effect of the application of four concentrations of nutrient solution by fertigation.**

Tratamiento	Variables de calidad comercial	
	FF	SST
	kg cm <sup>-2</sup>	% °Brix
SF50%	5.33±0.13 c	4.46±0.13 d
SF75%	5.83±0.04 b	4.66±0.06 c
SF100%	6.15±0.20 b	4.85±0.11 b
SF125%	6.86±0.28 a	5.03±0.07 a
Media	6.04	4.75
Tukey ( $P \leq 0.05$ )	0.39	0.1

† Medias con letras distintas en la misma columna refieren diferencias significativas, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). FF = firmeza del fruto; SST = sólidos solubles totales; SF50% = solución nutritiva Steiner al 50%; SF75% = solución nutritiva Steiner al 75%; SF100% = solución nutritiva Steiner al 100%; SF125% = solución nutritiva Steiner al 125%.

† Means with different letters in the same column refer to significant differences, according to Tukey's test ( $P \leq 0.05$ ). FF = fruit firmness; TSS = total soluble solids; SF50% = Steiner nutrient solution at 50%; SF75% = Steiner nutrient solution at 75%; SF100% = Steiner nutrient solution at 100%; SF125% = Steiner nutrient solution at 125%.

absorción de CO<sub>2</sub>, por su parte, un aporte alto de fosfato inorgánico incrementa la translocación de fosfoglicerato y triosa fosfato, aumentando la síntesis de sacarosa y otros carbohidratos, considerados dentro de la variable (Mengel y Kirkby, 2000).

### Variables de Rendimiento

El NFR se redujo en los tratamientos en este orden: SF125 > SF100 > SF75 > SF50 (Cuadro 5) lo cual se relaciona con la disponibilidad de microelementos participes

**Cuadro 5. Valores promedio de la variable rendimiento, número de frutos por racimo y peso promedio de fruto, como efecto de la aplicación de cuatro concentraciones de solución nutritiva por fertirriego.**

**Table 5. Average values of the variable yield, number of fruits per bunch and average fruit weight, as an effect of the application of four concentrations of nutrient solution by fertigation.**

Tratamiento	Variables de producción		
	NFR	PPF	REND
	n	g	Mg ha <sup>-1</sup>
SF50%	3.93±0.34 d	79.07±3.98 b	186.79±25.38 d
SF75%	4.52±0.30 c	82.16±3.09 ab	223.7±21.43 c
SF100%	5.13±0.47 b	80.86±1.31 ab	249.01±27.26 b
SF125%	5.85±0.18 a	84.77±3.87 a	296.78±19.69 a
Media	4.86	81.72	239.07
Tukey ( $P \leq 0.05$ )	0.35	4.96	12.82

† Medias con letras distintas en la misma columna refieren diferencias significativas, de acuerdo a la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). NFR = número de frutos por racimo; PPF = peso promedio del fruto; REND = rendimiento; SF50% = solución nutritiva Steiner al 50%; SF75% = solución nutritiva Steiner al 75%; SF100% = solución nutritiva Steiner al 100%; SF125% = solución nutritiva Steiner al 125%.

† Means with different letters in the same column refer to significant differences, according to Tukey's test ( $P \leq 0.05$ ). NFR = number of fruits per bunch; PPF = average fruit weight; REND = yield; SF50% = Steiner nutrient solution at 50%; SF75% = Steiner nutrient solution at 75%; SF100% = Steiner nutrient solution at 100%; SF125% = Steiner nutrient solution at 125%.

del cuajado de frutos como B y Mo (Kabata-Pendias, 2010), aportados de forma decreciente en la solución nutritiva. Para la variable PPF, se obtuvieron los resultados con SF125 > SF75 > SF100 > SF50. La disponibilidad de K<sup>+</sup> en la nutrición del cultivo tiene un efecto positivo sobre esta variable (Jiménez y García-Seminario, 2017), lo que concuerda con los valores de K<sup>+</sup> en la SS observados en el experimento. Respecto a REND, los resultados se ordenaron, de tal manera que SF125 > SF100 > SF75 > SF50. De esta manera, SF125 superó por 16.09, 24.62 y 37.06% a SF100, SF75 y SF50 respectivamente. Partiendo de los resultados obtenidos con SN125, se observa que la aplicación de SN100 genera un decremento de la producción de 47.77 Mg ha<sup>-1</sup>, este decremento se incrementa a 73.08 Mg ha<sup>-1</sup> con SN75, mientras que con SN50 el decremento es de 109.99 Mg ha<sup>-1</sup>. Estos decrementos resultan de la disminución en conjunto de los nutrimentos requeridos por el cultivo, tal y como lo establece la Ley del Mínimo de Liebig (Mengel y Kirkby, 2000).

## CONCLUSIONES

La aplicación continua de solución nutritiva Steiner durante todo el ciclo productivo del cultivo de tomate a concentraciones de 50, 75, 100 y 125%, genera un efecto directo sobre el incremento en la concentración de iones en la solución del suelo, lo que a su vez aumentó proporcionalmente los niveles en las variables de crecimiento, fisiológicas, calidad comercial y rendimiento. Las soluciones nutritivas al 100 y 125% fueron los tratamientos más destacados, y de estos se puede reducir el uso de la fertilización de Ca bajo un respaldo en el monitoreo de este elemento en la solución del suelo.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No Aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados o analizados durante el estudio están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FONDOS

Los recursos e infraestructura empleada para la realización del experimento son propiedad de la UAAAN y de la dirección de investigación de la misma universidad.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Escritura: F.A.D.V. Conceptualización: A.S.R., M.C.F., y A.B.M. Análisis formal: A.B.M., y V.R.T. Análisis de datos: A.J.M. Supervisión: A.S.R., y A.G.L.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Dirección de Investigación de la UAAAN y al CONACYT por los auspicios para llevar a cabo el experimento.

## LITERATURA CITADA

- Álvarez-Hernández, J. C. (2012). Comportamiento agronómico e incidencia de enfermedades en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) injertadas. *Acta Agronomica* 61(2), 117-125.
- Bárcena-Ibarra, A. (2022). *Efectos económicos y financieros en América Latina y el Caribe del conflicto entre la Federación de Rusia y Ucrania*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Bilalis, D., Krokida, M., Roussis, I., Papastylianou, P., Travlos, I., Cheimona, N., & Dede, A. (2018). Effects of organic and inorganic fertilization on yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Folia Horticulturae*, 30(2), 321-332. <http://doi.org/10.2478/fhort-2018-0027>
- Canales-Almendares, J. E., Borrego-Escalante, F., Narváez-Ortiz, W. A., González-Morales, S., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Impacto de diferentes fertilizantes en la solución del suelo y el crecimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26, 105-117. <http://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2941>
- Dell'Amico-Rodríguez, J. M., & Morales-Guevara, D. M. (2017). Stomatal conductance behavior of two Cuban tomato varieties in field conditions and limited irrigation. *Cultivos Tropicales*, 38(2), 137-144.
- Di Rienzo, J. A., Balzarini, M. G., González, L., Casanoves, F., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat. Manual del Usuario*. Córdoba, Argentina: Editorial Brujas.
- Francesca, S., Arena, C., Hay-Mele, B., Schettini, C., Ambrosino, P., Barone, A., & Rigano, M. M. (2020). The use of a plant-based biostimulant improves plant performances and fruit quality in tomato plants grown at elevated temperatures. *Agronomy*, 10(3), 1-14. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030363>
- Gao, Y., Liang, Y., Fu, Y., Si, Z., & Hamani, A. K. M. (2022). Interactive Effects of Intraspecific competition and drought on stomatal conductance and hormone concentrations in different tomato genotypes. *Horticulturae*, 8(1), 1-15. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010045>
- Glanz-Idan, N., & Wolf, S. (2020). Upregulation of photosynthesis in mineral nutrition-deficient tomato plants by reduced source-to-sink ratio. *Plant Signaling and Behavior*, 15(2), 1712543. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1712543>
- Hernandez, J. C., Orihuela, D. L., Pérez-Mohedano, S., Marijuan, L., & Furet, N. R. (2003). Efecto de la modificación del pH sobre la lixiviación de cationes en columnas de suelos calizos. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, 6, 99-104.
- Hernández-Díaz, M. I., Chailloux-Laffta, M., Moreno-Placeres, V., Igarza-Sánchez, A., & Ojeda-Veloz, A. (2014). Niveles referenciales de nutrientes en la solución del suelo para el diagnóstico nutricional en el cultivo protegido del tomate. *Idesia*, 32(2), 79-88. <http://doi.org/10.4067/S0718-34292014000200011>
- Jiménez, B., & García-Seminario, R. (2017). Influencia del potasio en el rendimiento y calidad del fruto de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Manglar*, 14(2), 125-131. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2017.016>
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants*. (4th ed.). Boca Raton, FL, USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Kim, M. Y., Lee, J. W., Park, D. J., Lee, J. Y., Myung, N. V., Kwon, S. H., & Lee, K. H. (2021). Highly stable potentiometric sensor with reduced graphene oxide aerogel as a solid contact for detection of nitrate and calcium ions. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 897(7), 15553. <http://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115553>
- Lal, M., Kathpalia, R., Sisodia, R., & Shakya, R. (2018). Biotic Stress. In S. C. Bathla, & A. M. Lal. (Eds.). *Plant Physiology, Development and Metabolism* (pp. 1045-1011). New Delhi, India: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1>
- Lao, M. T., Jiménez, S., Eymar, E., Fernández, E. J., & Jiménez, R. (2003). Determination of spatial variability of nutrient composition of soil solutions in greenhouses by using suction cups. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(5-6), 865-879. <http://doi.org/10.1081/CSS-120018980>
- Lao, M., Jiménez, S., Eymar, E., & Fernández, E. (2004). Nutrient levels of the soil solution obtained by means of suction cups in intensive tomato cultivation. *Phyton*, 73, 29-37.
- Lince-Salazar, L. A., Rodríguez-Valencia, N., & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2015). Disponibilidad de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> en función de las propiedades del suelo, zona cafetera central de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 1-14. <http://doi.org/10.22490/21456453.1261>
- Llenderal, A., García-Caparrós, P., Contreras, J. I., Segura, M. L., & Lao, M. T. (2019). Spatio-temporal variations in nutrient concentration in soil solution under greenhouse tomato. *Journal of Plant Nutrition* 42(8), 842-852. <http://doi.org/10.1080/01904167.2019.1584219>
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal*. Basilea, Suiza: Instituto Internacional de la Potasa.
- Munira, S., Hossain, M. M., Zakaria, M., Ahmed, J. U., & Islam, M. M. (2015). Evaluation of Potato Varieties against Salinity Stress in Bangladesh. *International Journal of Plant & Soil Science*, 6(2), 73-81. <http://doi.org/10.9734/ijpss/2015/15879>
- Narváez-Ortiz, W. A., Morales-Díaz, A. B., Benavides-Mendoza, A., & Reyes-Valdés, M. H. (2015). Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12, 1-15. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i12.769>
- Osorio, N. (2012). pH del Suelo y disponibilidad de Nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 4-7.
- Pacheco-Ávila, J., Pat-Canul, R., & Cabrera-Sansores, A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería*, 6(3), 73-81.

- Pask, A., Pietragalla, J., Mullan, D. M., Chávez-Dulanto, P. N., & Reynolds, M. P. (2013). *Fitomejoramiento fisiológico II: Una guía de campo para la caracterización fenotípica del trigo*. Distrito Federal, México: CIMMYT.
- Peña-Fleitas, M. T., Gallardo, M., Padilla, F. M., Rodríguez, A., & Thompson, R. B. (2021). Use of a portable rapid analysis system to measure nitrate concentration of nutrient and soil solution, and plant sap in greenhouse vegetable production. *Agronomy*, 11(5). 1-21. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050819>
- Pérez-Labrada, F., López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Responses of tomato plants under saline stress to foliar application of copper nanoparticles. *Plants*, 8(6), 1-17. <https://doi.org/10.3390/plants8060151>
- Rodríguez-Mendoza, M. N., Alcántar-González, G., Aguilar-Santelises, A., Etchevers-Barra, J. D., & Santizó-Rincón, J. A. (1998). Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra Latinoamericana*, 16(2), 135-141.
- Serna-Rodríguez, J. R., Castro-Brindis, R., Colinas-León, M. T., Sahagún-Castellanos, J., & Rodríguez-Pérez, J. E. (2011). Aplicación foliar de ácido glutámico en plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1), 9-13.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Tripathi, D. K., Singh, V. P., Chauhan, D. K., Prasad, S. M., & Dubey, N. K. (2014). Role of Macronutrients in Plant Growth and Acclimation: Recent advances and future prospective. In: P. Ahmad, R. M. Wani, M. M. Azoos, & L. S. P. Tran (Eds.). *Improvement of crops in the era of climatic changes* (pp. 197-216). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8830-9>
- USDA (United States Department of Agriculture). (1975). *Color classification requirements in United States standards for grades of fresh tomatoes*. Washington, DC, USA: USDA
- Xue, F., Liu, W., Cao, H., Song, L., Ji, S., Tong, L., & Ding, R. (2021). Stomatal conductance of tomato leaves is regulated by both abscisic acid and leaf water potential under combined water and salt stress. *Physiologia Plantarum*, 172(4), 2070-2078. <https://doi.org/10.1111/ppl.13441>
- Zermeño-González, A., Kau-Pérez, P. O., Munguía-López, J. P., Ramírez-Rodríguez, H., & Cadena-Zapata, M. (2021). Comparación de cubiertas de invernaderos en relación con crecimiento y rendimiento de tomate. *Agrociencia*, 55(6), 523-538. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i6.2557>
- Zhang, C., Li, X., Yan, H., Ullah, I., Zuo, Z., Li, L., & Yu, J. (2020). Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 241(10), 106263. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106263>

## SEGUNDO ARTÍCULO

Short-term dynamics of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$  in soil solution grown with tomato in greenhouse conditions

agronomy



1

2 Article

3 **Short-term dynamics of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$  in soil solution**  
4 **grown with tomato in greenhouse conditions**5 Felicitó Ausencio Díaz-Vázquez <sup>1</sup>, Marcelino Cabrera De La Fuente <sup>1</sup>, Valentín Robledo-Torres <sup>1</sup>, Antonio Juárez-Maldonado <sup>2</sup>, Adalberto Benavides-Mendoza <sup>1</sup> and Alberto Sandoval-Rangel <sup>1,\*</sup>

7

<sup>1</sup>Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; [ausenciodiaz1991@gmail.com](mailto:ausenciodiaz1991@gmail.com), [cafum7@hotmail.com](mailto:cafum7@hotmail.com), [robledo3031@gmail.com](mailto:robledo3031@gmail.com), [abenmen@gmail.com](mailto:abenmen@gmail.com), [asandovalr16@gmail.com](mailto:asandovalr16@gmail.com)

8

<sup>2</sup>Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; [juma841025@hotmail.com](mailto:juma841025@hotmail.com)

9

10

\* Correspondence: [asandovalr16@gmail.com](mailto:asandovalr16@gmail.com); Phone: +52 844 451 5404

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

**Abstract:** The soil solution is the medium where minerals for the plant nutrition are dissolved in assimilable forms and can be absorbed. The measurement of the availability of ions in soil solution can help to understand the absorption rates of the crop. Four concentrations of Steiner solution modified for tomato were applied to soil, under protected conditions. Soil solution was extracted at hourly intervals for 24 hours and the concentration of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  ions and the values for EC and pH were measured using selective ion electrodes, considering the ambient temperature at the time of sampling. Identical behavior of the ions was observed, regardless of the treatment used, varying only in the observed concentration.  $\text{K}^+$  decreased after hours of high temperature and the application of fertigation did not increase its concentration,  $\text{NO}_3^-$  presented more variations in hours of darkness,  $\text{Na}^+$  increased its concentration during hours of darkness as well as  $\text{Ca}^{2+}$ . The EC was modified by the application of fertigation while the pH did not present a significant variation. The concentration of ions depends to a large extent on the absorption rate of the crop and the adsorption processes of the soil colloids, varying only in the observed concentration.

24

**Keywords:** dynamics, ions; soil solution; ionometers, 24 hours

25

26

27

**1. Introduction**

In recent years, world agricultural production has shown reductions in the volume harvested for most crops, putting global food security at risk. On the one hand, the population increases rapidly while the agricultural area gradually decreases, at rates of 1-2% per year [1]. This growing demand for food demonstrates the need to increase the volume of production in relation to the cultivated area [2]. It should be remembered that the production volume of a crop is determined by the essential element available in less quantity, according to Justus von Liebig's Law of the Minimum [3], so that the production of crops in deficient soils or an inefficient management of mineral nutrition presents significant reductions in yield.

One factor that affects food production is the increase in the price of fertilizers, observed in recent years, which limits the mineral contribution to crops and the obtaining of optimal yields. Only for the northeast region of Mexico, the costs for fertilization in tomato cultivation under protected agriculture represent 13.95% of the total production costs [4] which may increase even more due to the current price of fertilizers.

In addition to this, environmental factors such as the deterioration of the quality of agricultural soils, erosion, loss of fertility, salinity and sodicity of soils, are involved in the reduction of agricultural production volumes [5,6]. These natural processes are accelerated by the indiscriminate use of subsoil waters rich in mineral salts [7] as well as the

28 **Quotation:**To be added by editorial  
29 staff during production.

30 Academic Editor: Firstname Last-  
31 name

32 Received: date

33 Revised: date

34 Accepted: date

35 Published: date



36 Copyright: © 2023 by the authors.

37 Submitted for possible open access

38 publication under the terms and

39 conditions of the Creative Commons

40 Attribution (CC BY) license

41 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

42

excessive application of nitrogenous fertilizers, even in non-arid areas [8].

In most intensive agricultural production systems, the nutritional requirements of the crop are provided by fertigation, with inorganic fertilizers dissolved in the nutrient solution, which increase the electrical conductivity of the soil solution. In these production schemes, the balanced supply of nutrients to the crop generates optimal growth and productivity. These soil areas are disturbed systems that export high amounts of mineral nutrients used in the formation of crop biomass, generating a rapid decrease in soil fertility, which will be mostly supplied by inorganic fertilizers [9].

These activities imply an intensive exploitation of the crop and the soil, in such a way that the nutritional contribution plays a key role in obtaining optimal yields, for which it is vital to know the concentration and dynamics of the ions present in the soil solution [10]. This can allow, in the medium term, to reduce the excessive concentration of ions not extracted by the crop and that influence the salinity levels of the soil [8] as well as reduce the loss or leaching of anions such as  $\text{NO}_3^-$  that contaminate groundwater and drinking water sources [11] and reduce fertilization costs by making its application more efficient.

To do this, measuring the availability of nutrients at a given time is feasible, so the mineral content of the soil solution must be considered, this being the medium in which the fraction of elements available or assimilable for the plant is kept dissolved [2].

Several studies show that the analysis of the concentration and dynamics of ions in the soil solution in the short term, allows measuring the efficiency in fertilization, issuing previous approaches on the behavior of these ions in the soil, in addition to evaluating the nutritional conditions of the soil and crop, correct deficiencies and imbalances in fertilization [10, 12, 13].

Technological advances have allowed the creation of tools and technological equipment that facilitates the monitoring of ions in the soil solution in real time [12, 14]. Currently, selective ion electrodes allow the measurement of specific ions such as calcium, potassium, sodium, nitrates, pH, and electrical conductivity. This allows to carry out measurements *in situ*, obtaining relevant information in relation to the concentrations of ions in the soil at certain times [15, 16].

In the medium term, through knowledge of the interactions of ions, the use of technological tools and information, the detection and selection of an ion or group of ions that act as predictors of the dynamics of other ions is projected in such a way that the fertilization is applied based on automated monitoring, improving the fertilization application based on the ion concentration in real time. For this reason, the objective of this experiment was to determine the dynamics of the  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  ions, as well as the pH and EC values in the soil solution, in the short term, as an effect of the application of different concentrations of nutrient solution to the soil, through continuous monitoring for 24 hours, using technological monitoring tools.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Experiment location and plant material

The research was carried out at the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, in Saltillo, Coahuila, México, in a low-tech greenhouse, with a metallic structure of a modified chapel type and lateral ventilation curtains.

Grafted Roma tomato plants of indeterminate growth led to two stems were used, composed of the graft of the Benedetti hybrid (Enza Zaden, Almería, Spain) on the Espartaco rootstock (Harris & Moran, CA., USA), established in soil, with plastic mulch, 0.7 m between plants and 0.6 m between rows. The control of pests and diseases was carried out using conventional methods, the water and nutritional demand was provided by a drip irrigation system, with two irrigation tapes per planting bed, with drippers every 0.2 m.

### 2.2. Experimental design

The experiment was established with a randomized complete block design with three repetitions, four fertigation nutritional treatments consisting of modified Steiner solution for tomato cultivation, at different concentrations (125%, 100%, 75% and 50%) were applied to soil (Table 1). Each treatment was applied to a portion of the planting bed 4 m long, 1 m wide and 0.35 m high, with silver-gray plastic mulch, planting density of 3 plants m<sup>-2</sup> in double row.

### 23. Experimental conditions

During the sampling period, the plants were in the reproductive stage, with bunch 10 in fruit formation and bunch 11 in flowering. In this stage, the water requirement is high, therefore, three irrigation pulses of 15 minutes were applied during the day (8:00 a.m., 12:00 p.m. and 4:00 p.m.). The temperature of the protected environment was between 30 and 9 °C. A saturated extract of soil paste was made from a sample obtained before starting the crop cycle, obtaining the concentrations of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (350 mg L<sup>-1</sup>), K<sup>+</sup> (213.3 mg L<sup>-1</sup>), Ca<sup>2+</sup> (153.3 mg L<sup>-1</sup>), Na<sup>+</sup> (910 mg L<sup>-1</sup>), pH (8.31) and EC (10.78 dS m<sup>-1</sup>). The water analysis showed values of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (7.42 mg L<sup>-1</sup>), K<sup>+</sup> (5.87 mg L<sup>-1</sup>), Ca<sup>2+</sup> (89.8 mg L<sup>-1</sup>), Na<sup>+</sup> (58 mg L<sup>-1</sup>), pH (7.68) and EC (0.96 dS m<sup>-1</sup>).

Table 1. Requirements of the modified Steiner solution for tomato cultivation and the requirements considered for each treatment.

	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Fe	Mn	Zn	B.	cu	Mo
	meq L <sup>-1</sup>						mg L <sup>-1</sup>					
S.B.	15.0	2.0	9.0	10.0	3.0	5.0	1.5	0.60	0.20	0.50	0.15	0.05
SN125	18.75	2.5	11.25	12.5	3.75	6.25	1.87	0.75	0.25	0.625	0.187	0.062
SN100	15.0	2.0	9.0	10.0	3.0	5.0	1.5	0.60	0.20	0.50	0.15	0.05
SN75	11.25	1.5	6.75	7.5	2.25	3.75	1.125	0.45	0.15	0.375	0.112	0.037
SN50	7.5	1.0	4.5	5.0	1.5	2.5	0.75	0.30	0.10	0.50	0.15	0.05

### 2.4 Extraction of soil solution samples

For the extraction of the soil solution (SS), SSAT 12" suction lysimeters (Irrometer Company, Inc., CA., USA) were used, placed at a depth of 0.20 m, to which a vacuum was applied at 60 kPa using a vacuum pump SSAT 1002 Vacuum Pump (Irrometer Company, Inc., CA., USA). The vacuum was performed at one hour intervals and after this time the soil solution was extracted with 20 mL plastic syringes. Considering that the first irrigation was carried out at 8:00 am, the vacuum was carried out fifteen minutes after the irrigation was applied, so the first sampling was carried out and reported at 9:00 am.

### 2.5 Ion concentration measurement

The concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Na<sup>+</sup> ions in the soil solution was measured with selective ion electrodes (HORIBA, Kyoto, Japan) with the LAQUAtwin-NO3-11, LAQUAtwin-K-11, LAQUAtwin-Ca-11 and LAQUAtwin-Na-11. The results were expressed in mg L<sup>-1</sup>.

The electrical conductivity (EC) and potential hydrogen (pH) parameters were measured in the soil solution, using the LAQUAtwin EC-11 and LAQUAtwin pH-11 selective ion electrodes (HORIBA, Kyoto, Japan) for electrical conductivity and pH respectively. The values obtained were expressed in dS m<sup>-1</sup> for CE and values from 0-14 for pH.

### 2.6 Statistic analysis

The results were analyzed under a randomized complete block model. An analysis of variance (P≤0.05) and a Tukey mean comparison test (P≤0.05) were applied with the Infostat v.2020 software [17]. To determine the dynamics of the ions in a period of 24



151  
152

hours, the values obtained for the parameters considered over the observed period of time were plotted.

153

### 3. Results

154

#### 3.1. Ion concentration in soil solution

155

The average values of the concentration of ions, pH and EC in the soil solution, measured in a period of 24 continuous hours, presented highly significant differences ( $P \leq 0.01$ ) for  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{K}^+$  and a significant difference ( $P \leq 0.05$ ) for  $\text{Ca}^{2+}$  and CE, as an effect of the evaluated treatments.

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

A positive relationship was observed between the concentration of ions in the soil solution with the concentration of the applied nutrient solution, for  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and CE. The observed means for  $\text{NO}_3^-$  exceeded by 14.75, 37.97, 39.64 and 42.34% the expected concentrations (464.65, 696.93, 929.25 and 1161.56  $\text{mg L}^{-1}$ ) for SN50, SN75, SN100 and SN125 respectively. The  $\text{K}^+$  concentrations exceeded by 10.32, 41.24, 39.42 and 39.05% the expected concentrations (175.95, 263.93, 351.9 and 439.87  $\text{mg L}^{-1}$ ) for SN50, SN75, SN100 and SN125. For  $\text{Ca}^{2+}$ , only the means obtained with SN100 presented a decrease of 9.3% in relation to the expected values (200  $\text{mg L}^{-1}$ ), on the contrary, the other means exceeded the expected values by 25.22, 8.52 and 9.25% (100, 150 and 250  $\text{mg L}^{-1}$ ) with the application of SN50, SN75 and SN125.

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

$\text{Na}^+$  was not contributed in any mineral source; however the irrigation water contained 2.52  $\text{mmol L}^{-1}$  equivalent to 58  $\text{mg L}^{-1}$ , likewise, the soil presented in the saturated paste extract, a content of 910  $\text{mg L}^{-1}$  in a soil sample taken before starting the establishment of the crop.

181

182

183

184

185

The pH in the same saturated extract presented values of 8.31, which decreased throughout the production cycle, presenting averages of 7.88 at the time of sampling. The EC in saturated extract reached means of 10.78  $\text{ds m}^{-1}$ . However, when carrying out heavy irrigation for the transplant, these values were reduced due to the washing of salts formed on the soil surface, as well as the displacement of ions such as  $\text{Na}^+$ , in this way, the values observed at the time of sampling are related directly with the concentration of the nutrient solution.

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

Table 2. Mean values for the concentration of ions, pH and EC in soil solution, according to a 24 hour continuous sampling, obtained by the Tukey means comparison test ( $P \leq 0.05$ ).

Treatments	Ion concentration and mean pH and EC values					
	$\text{NO}_3^-$ $\text{mg L}^{-1}$	$\text{K}^+$ $\text{mg L}^{-1}$	$\text{Ca}^{2+}$ $\text{mg L}^{-1}$	$\text{Na}^+$ $\text{mg L}^{-1}$	pH 0-14	EC $\text{dS m}^{-1}$
SN125 <sup>1</sup>	1653.47 ± 192.71 a	611.67 ± 40.40 a	273.13 ± 28.87 a	255.69 ± 49.80 a	7.78 ± 0.28 a	3.25 ± 0.15 a
SN100	1297.64 ± 174.67 ab	490.63 ± 40.71 b	181.39 ± 36.76 ab	250.97 ± 69.85 a	7.96 ± 0.02 a	2.84 ± 0.37 ab
SN75	961.53 ± 60.04 b	372.78 ± 34.15 c	162.78 ± 5.28 ab	228.33 ± 26.06 a	7.82 ± 0.04 a	2.35 ± 0.14 b
SN50 <sup>3</sup>	533.19 ± 88.43 c	194.1 ± 29.31 d	125.22 ± 51.05 b	191.81 ± 12.24 a	7.97 ± 0.21 a	1.75 ± 0.07 c
AVERAGE	1111.46	417.29	185.63	231.70	7.88	2.55
Tukey ( $P \leq 0.05$ ) <sup>2</sup>	381.54	84.44	111.18	126.36	0.52	0.57

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

#### Ion dynamics in soil solution

196

197

198

The maximum concentrations ( $C_{\text{max}}$ ) of the ions evaluated did not follow a pattern determined by the concentration of the nutrient solution, the environmental temperature and the sampling time, at least for  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$ , on the contrary  $\text{K}^+$  allowed us to

199 observe that the  $C_{max}$  coincides with the periods of high environmental temperature,  
200 registered between 11:00 and 12:00 hours of the day.

201 For the minimum concentrations ( $C_{min}$ ) no stable behavior of all the ions evaluated  
202 was found, so the concentration of the nutrient solution, the environmental temperature  
203 and the sampling time are not factors that could directly affect the decreases in the ion  
204 concentration. in the soil solution, in such a way that there may be other factors that cause  
205 the reduction of its availability at different times of the day (Table 3)

206 Table 3. Record of the time of day and the temperature of the greenhouse, for  $C_{max}$  and  
207  $C_{min}$  of the ions in soil solution, as an effect of the concentration of the nutrient solution  
208 applied.

Ion	Treatment	$C_{max}$		Temp. °C	$C_{min}$		Temp. °C
		mg L <sup>-1</sup>	Hour		mg L <sup>-1</sup>	Hour	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SN50	653.3	21:00	11.8	396.7	4:00 p.m.	28.8
	SN75	1,300.0	11:00	29.5	766.7	00:00	9.3
	SN100	1,633.3	21:00	11.8	1,096.7	09:00	15.0
	SN125	2,166.7	12:00	29.8	1,200.0	09:00	15.0
K <sup>+</sup>	SN50	380.0	11:00	29.5	143.3	06:00	9.5
	SN75	863.3	12:00	29.8	200.0	22:00	10.8
	SN100	1,060.0	12:00	29.8	370.0	06:00	9.5
	SN125	1,300.0	12:00	29.8	446.7	02:00	9.5
Ca <sup>2+</sup>	SN50	155.3	13:00	29.4	105.7	06:00	9.5
	SN75	200.0	22:00	10.8	140.0	18:00	16.1
	SN100	206.7	15:00	28.5	136.7	05:00	9.3
	SN125	336.7	13:00	29.4	233.3	18:00	16.1
Na <sup>+</sup>	SN50	260.0	09:00	15.0	136.7	18:00	16.1
	SN75	310.0	09:00	15.0	180.0	five pm	26.7
	SN100	356.7	09:00	15.0	190.0	10:00	25.0
	SN125	360.0	09:00	15.0	196.7	10:00	25.0

209  $C_{max}$ = Maximum concentration;  $C_{min}$ = Minimum concentration

210 The graph of the dynamics of the concentration of the ions in the soil solution describes  
211 their behavior and with this it can be inferred about the existence of correlation of the  
212 ions with the temperature of the protected environment, pH and EC (Figure 1 and 2).

213 Thus, in the case of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, a similar dynamic behavior was observed in the four  
214 treatments. The concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> at 0.20 m depth seems to be modified according to  
215 the advance of the humidity generated by the irrigation water towards the subsoil, the  
216 above is supported by the increases in the concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> after the application of  
217 fertigation. . The fertigation applied at 12:00 increased the concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in the  
218 soil solution, in the same way the application of fertigation at 18:00 generated increases in  
219 the concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> for a period of 2-3 subsequent hours. The reductions in the  
220 concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> would be more related to the rate of absorption of the crop. EC and  
221 pH do not show behavior related to NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dynamics.

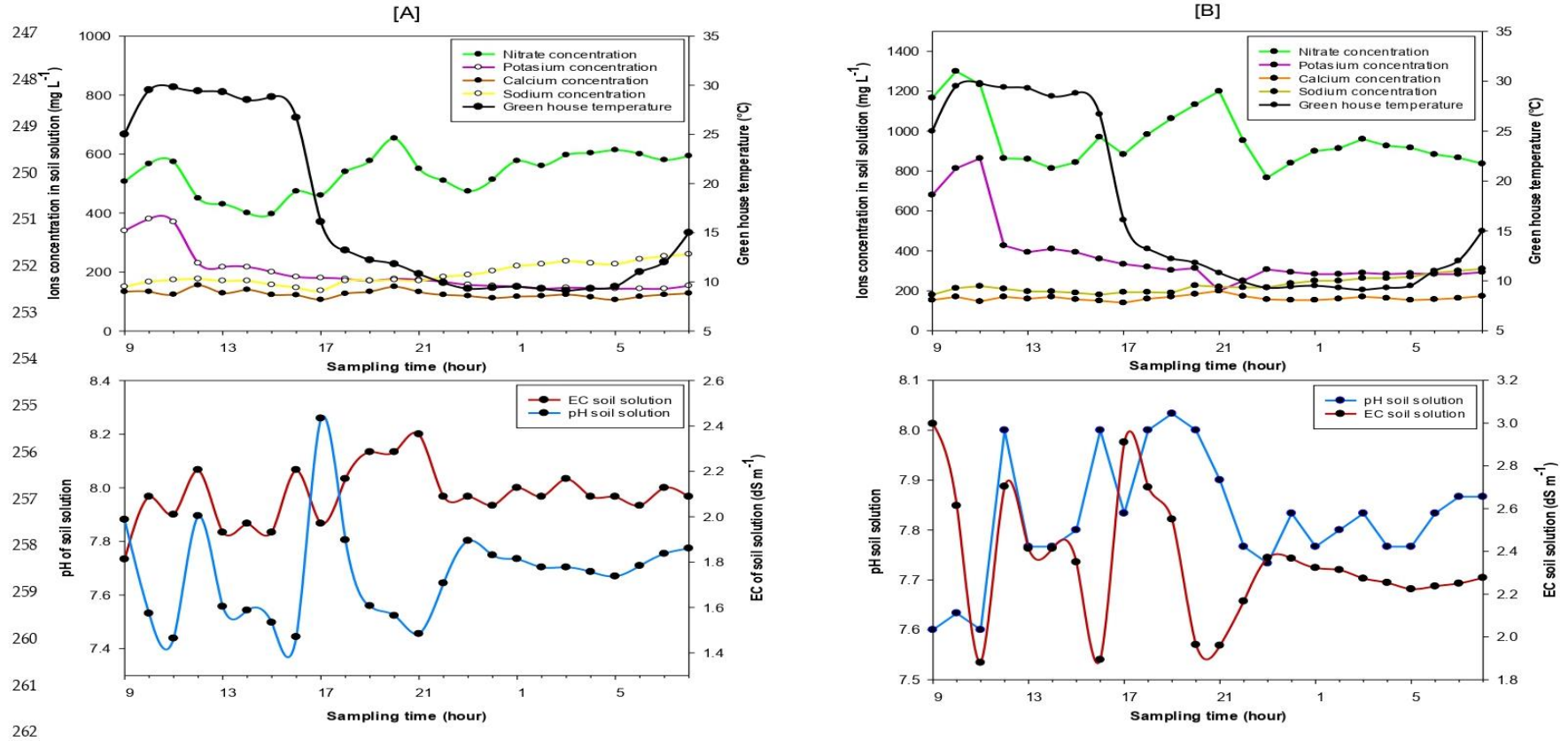
222 In the same way, K<sup>+</sup> showed a similar dynamic behavior in the four treatments,  
223 showing only variations in the ion concentration. Similarly, a direct effect of temperature  
224 on the concentration of the ion is observed. It was detected that during the high

225 temperature period, the concentrations of  $K^+$  reached  $C_{max}$  in all treatments. After this  
226 stage, the fertigation application did not modify or increase the availability of the ion. In  
227 treatments SN50 and SN100 CE showed a dynamic behavior similar to  $K^+$  and pH does  
228 not present a behavior directly related to the ion. Fertigation applications after  $C_{max}$  did  
229 not increase the availability of the ion.

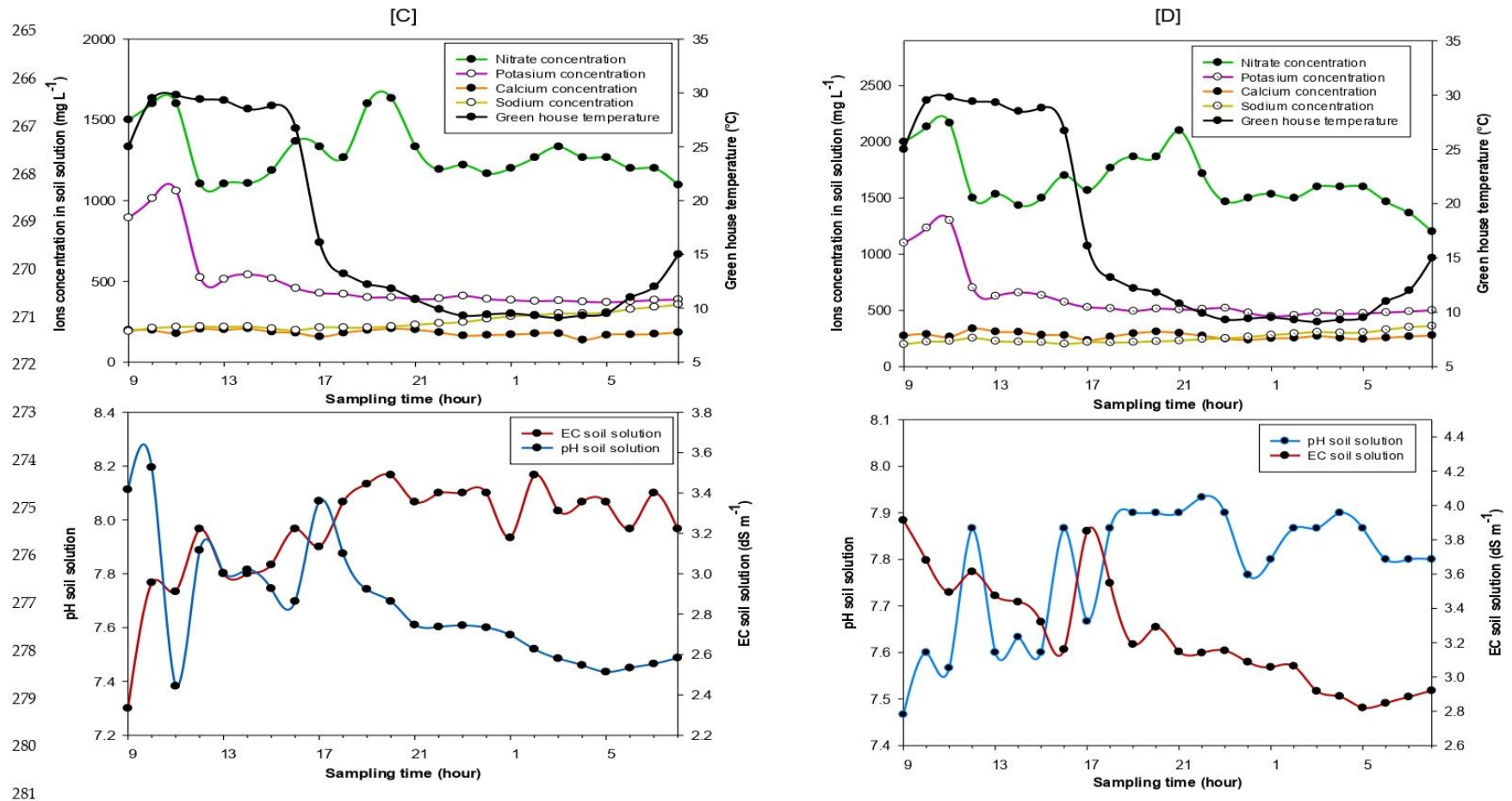
230  $Ca^{2+}$  had a stable dynamic behavior with variation in the concentrations of each  
231 treatment, environmental temperature, pH and EC did not show an effect on the ion  
232 concentration. The application of fertigation after the beginning of the sampling did not  
233 modify the dynamic behavior of the ion. The calcareous soil used allows the contribution  
234 of  $Ca^{2+}$  in such a way that there is availability of the ion in most of the sampling period.  
235 The same behavior is observed with  $Na^+$ .

236 In relation to pH, a highly variable behavior was observed, with visible increases  
237 and decreases in the reported values. However, a direct relationship of any evaluated  
238 ion, environmental temperature and treatment on the behavior of pH is not observed. It  
239 seems that pH is affected by other factors of the nutrient solution but not of the ions  
240 evaluated.

241 The results obtained for EC do show an effect of the treatments on the values of this  
242 parameter, increasing gradually in relation to increases in the concentration of the  
243 treatments. Unlike the pH, the EC does show variations in greater magnitude, this due to  
244 the difference in the concentration of nutrients of the applied nutrient solution. In such a  
245 way that the increases present a direct relationship with the concentration of the nutrient  
246 solution.



263 Figure 1. Dynamics of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  ions and pH and EC parameters in the short term, in soil solution cultivated with indeterminate tomato under  
 264 greenhouse conditions, as an effect of the application of Steiner nutrient solution at concentrations of 50% (A) and 75% (B).



282 Figure 1. Dynamics of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  ions and pH and EC parameters in the short term, in soil solution cultivated with indeterminate tomato under  
 283 greenhouse conditions, as an effect of the application of Steiner nutrient solution at concentrations of 100% (C) and 125% (D).

284  
285  
286  
287  
288  
289  
290  
291  
292  
293  
294  
295  
296  
297  
298  
299  
300  
301  
302  
303  
304  
305  
306  
307  
308  
309  
310  
311  
312  
313  
314  
315  
316  
317  
318  
319  
320  
321  
322  
323  
324  
325  
326  
327  
328  
329  
330  
331  
332  
333  
334  
335  
336

#### 4. Discussion

The fluctuations in the concentration of  $\text{NO}_3^-$  in the soil solution could be more related to the mineral uptake of the plant than to factors inherent to the soil, at least in the short term. Since  $\text{NO}_3^-$ , being an anion, flows in the SS, without being affected by the presence of cationic adsorption charges [10].

What if it could affect the concentration of the ion in the SS could be the environmental temperature and humidity, since the ion can be dragged by the mass flow of water generated by currents of evapotranspiration from the soil to the atmosphere, however, in systems with padding as in the experiment, the degree of evaporation is low. In this regard, was reported a dynamic absorption of  $\text{NO}_3^-$  characterized by a high absorption of the ion at noon, which could explain the progressive decrease in concentration until the afternoon [19]. It is important to mention that during the observation period, three irrigations were carried out, one at 10:00 a.m., another at 2:00 p.m., and another at 6:00 p.m.

It is observed how the first irrigation generated an increase in the concentration of  $\text{NO}_3^-$  until noon, from which the absorption by the plant generates decreases, this temporary increase of the ion in the soil, could be due to the fact that in the first hours of the day, the plant prioritizes the absorption of water, leaving the ions in the soil, however, the second irrigation does not generate any variation in the ion concentrations, very possibly influenced by the rapid assimilation of the ion by the plant, in the application. After the third irrigation, an increase in the ion concentration is observed in the early hours of the night, coinciding with the decrease in photosynthetic activity and water absorption by the plant, due to the drop in temperatures, it has been reported that the percentage of  $\text{NO}_3^-$  absorption by the plant occurs in ranges of 59% during the day and 41% during the night, so that low absorption rates and low temperatures favor increases of the ion in the SS [19].

In this regard, it has been observed that low temperatures pre-set during the night have a transient effect on the inhibition of nitrate reductase, generating protein synthesis at fluctuating periods of the night, which may be related to plant uptake rates. On the other hand, in soil, the effect of  $\text{NO}_3^-$  reduction to  $\text{NH}_4^+$  and subsequently to  $\text{NH}_3$  and its subsequent volatilization occurs mainly at high temperatures, so the considerable decrease in  $\text{NO}_3^-$  levels after high temperature phases may also be caused by this process [20].  $\text{K}^+$  showed a similar behavior in the four treatments, observing a direct relationship of the cation concentration in SS with respect to the environmental temperature values, the maximum values for all treatments were observed in the period from 11:00 to 12:00 hours, which coincides with the highest temperatures recorded during the sampling, which showed values of 29.5 to 29.8 °C. Immediately after the period of high temperatures, the concentration of  $\text{K}^+$  decreased, without showing a positive effect of the second and third irrigation, on the concentration of the ion.

The high concentrations of  $\text{K}^+$  at the beginning of the sampling were absorbed by the plant, being used in stomatal regulation functions, once the SS ions were absorbed, the subsequent contributions of  $\text{K}^+$  via fertigation were surely adsorbed by the clay particles and colloids from the ground, so they were not released in the SS. In this regard, has been reported how the rates of absorption of  $\text{K}^+$  by the plant follow a mostly diurnal pattern, reaching the highest absorption values during the middle of the photoperiod, observing an absorption rate total  $\text{K}^+$  63% during the day and 37% at night [19].

It is important to highlight that in the treatments with the lowest concentration (50% and 75%), the levels of  $\text{K}^+$  in SS were exceeded or equaled by  $\text{Na}^+$ , has been found that in soils within high  $\text{Na}^+$  concentrations, the absorption of  $\text{K}^+$  is diminished [8], this being a competitive process between both ions, in addition, they reported a higher level of  $\text{K}^+$  absorption when N is in nitric form and reductions when N is in ammoniacal form.

$\text{Ca}^{2+}$  showed a decreasing behavior at the end of the observation period, showing an inverse relationship with the concentration of  $\text{Na}^+$ , observing how in treatments with a

337 lower concentration of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  exceeded this cation in concentration, however, in  
338 treatments with more concentrated  $\text{Ca}^{2+}$ , the values ended up balancing at the end of the  
339 sampling. The optimal concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  in the substrate allow displacing  $\text{Na}^+$ , al-  
340 lowing greater availability and absorption of  $\text{K}^+$ , allowing less leakage of  $\text{K}^+$  from the cell,  
341 due to improved integrity of the plasma membrane in the root zone [8].

342 Regarding  $\text{Na}^+$ , an increase proportional to the concentration of the nutrient solution  
343 was observed, these values are above those recommended for irrigation water in pro-  
344 tected agriculture and open field schemes ( $<100 \text{ mg L}^{-1}$ ) [21], these high levels of  $\text{Na}^+$  af-  
345 fect the absorption and availability of  $\text{K}^+$ , since as observed in treatments with lower  $\text{K}^+$   
346 and  $\text{Ca}^{2+}$  content, the availability of these elements decreases even at levels lower than  
347  $\text{Na}^+$  [8].

348 In relation to pH, a direct relationship was observed between the concentrations of  
349  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$  with pH, in addition to an inverse relationship between pH and  $\text{K}^+$  [16].  
350 High concentrations of  $\text{NO}_3^-$  allow the release of organic bases by the plant, alkalinizing the  
351 rhizosphere area, therefore decreases in the concentration of this ion also generate de-  
352 creases in pH.

## 353 5. Conclusions

354  $\text{NO}_3^-$  presented fluctuations in its concentration throughout the observed period,  
355 since in its entirety,  $\text{NO}_3^-$  is contributed by fertilizer sources, the concentration presented  
356 variations in the short term that do not generate periods of starvation in relation to the  
357 expected values.

358  $\text{K}^+$  presented reductions in its concentration after the hours of high temperature,  
359 irrigation 2 and 3 did not generate increases in the ion concentration, so it can be affirmed  
360 that the mineral contribution of these irrigations was captured by the soil exchange  
361 phase, leaving little  $\text{K}^+$  available in the soil solution. The foregoing generates prolonged  
362 periods of starvation for the crop, which begin immediately after the hours of high  
363 temperature, extending until the early hours of the following day, at which time the  
364 exchange phase and the fertigation applied in the morning restore the levels of  $\text{K}^+$  in the  
365 soil solution.

366  $\text{Ca}^{2+}$  presented mostly a constant behavior, this behavior of the cation in the soil  
367 solution is caused by a constant flow of the ion both from the nutrient solution and from  
368 the exchange phase of the soil, which has a high ion content. In some cases the  
369 concentration of  $\text{Na}^+$  exceeds that of  $\text{Ca}^{2+}$ .

370 The EC presented variations related to the concentration of the mineral ions  
371 observed, influenced mainly by the concentrations of  $\text{K}^+$  available in the soil solution. For  
372 pH, variations related mainly to the availability of  $\text{NO}_3^-$  were observed, which generates  
373 the release of organic bases from the plant to carry out their exchange and absorption.

374 **Supplementary material:** Not applicable

375 **Author Contributions:** Conceptualization, F.A.D.V., A.S.R., M.C.F., A.J.M Methodology,  
376 A.B.M., A.S.R. and V.R.T., Software and Formal Analysis, A.J.M. and F.A.D.V., Writing  
377 and Review, A.S.R., A.B.M. and V.R.T. Project Administration, A.S.R., Investigation,  
378 F.A.D.V., M.C.F. All authors have read and agreed to the published version of the  
379 manuscript.

380 **Financing:** This research was funded by CONACYT México and federal budget granted  
381 to the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro for the research area.

382 **Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

383 **Consent Statement Report:** Not applicable.

384 **Data Availability Statement:** Not applicable.

385 **Thanks:** The authors thank the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro for  
386 allowing the use of its facilities and infrastructure and equipment for the experiment.

387 **Conflicts of interest:** The authors declare no conflict of interest. The funders had no role  
388 in the design of the study, analyses, interpretation of data, writing of the manuscript or in  
389 the decision to publish the results.

390

391

## 392 References

- 393 1. Hossain, S. (2019). Present Scenario of Global Salt Affected Soils, its Management and Importance of Salinity Research.  
394 *International Research Journal of Biological Sciences Perspective*. 1(1), 1–3.
- 395 2. Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2003). Fundamentos de fisiología vegetal. In *McGrawHill*.
- 396 3. Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal* (4ta ed.). Instituto Internacional de la Potasa. Suiza.
- 397 4. FIRA. (2021). *Costos de Producción tomate Rojo*. <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/TemasUsuario.jsp>
- 398 5. Wicke, B., Smeets, E., Dornburg, V., Vashev, B., Gaiser, T., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2011). The global technical and  
399 economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy and Environmental Science*. 4(8), 2669–2681.  
400 <https://doi.org/10.1039/c1ee01029h>
- 401 6. Cotler, H., Corona, J. A., & Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera  
402 aproximación. *Investigaciones Geográficas*. 101. <https://doi.org/10.14350/ig.59976>
- 403 7. Mata, I., Rodríguez, M. L., López, J., & Vela, G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital Del*  
404 *Departamento El Hombre y Su Ambiente*. 1(5), 26–35.
- 405 8. Fageria, N. K., Gheyi, H. R., & Moreira, A. (2011). Nutrient bioavailability in salt affected soils. *Journal of Plant Nutrition*,  
406 34(7), 945–962. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.555578>
- 407 9. Nair, K. P. (2019). Soil Fertility and Nutrient Management. In *Intelligent Soil Management for Sustainable Agriculture* (pp.  
408 165–189). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15530-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15530-8_17)
- 409 10. Hernández, M. I., Chailloux Laffita, M., Moreno Placeres, V., Igarza Sánchez, A., & Ojeda Veloz, A. (2014). Niveles  
410 referenciales de nutrientes en la solución del suelo para el diagnóstico nutricional en el cultivo protegido del tomate.  
411 *Idesia*, 32(2), 79–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000200011>
- 412 11. Egbi, C. D., Anornu, G. K., Ganyaglo, S. Y., Appiah-Adjei, E. K., Li, S. L., & Dampare, S. B. (2020). Nitrate contamination of  
413 groundwater in the Lower Volta River Basin of Ghana: Sources and related human health risks. *Ecotoxicology and*  
414 *Environmental Safety*, 191(May 2019), 110227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110227>
- 415 12. Narváes-Ortiz, W. A., Morales-Díaz, A. B., Benavides-Mendoza, A. and Reyes-Valdés, M. H. (2015). Dinámica de la com-  
416 posición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12, 2383-2397.
- 417 13. Canales-Almendares, J. E., Borrego-Escalante, F., Narvaez-Ortiz, W. A., González-Morales, S., & Benavides-Mendoza, A.  
418 (2021). Impacto de diferentes fertilizantes en la solución del suelo y el crecimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias*  
419 *Agrícolas*, 26, 105–117. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2941>
- 420 14. Peña-Fleitas, M. T., Gallardo, M., Padilla, F. M., Rodríguez, A., Thompson, R. B. (2021). Use of a portable rapid analysis



- 421 system to measure nitrate concentration of nutrient and soil solution, and plant sap in greenhouse vegetable production.  
422 *Agronomy*, 11, 819. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050819>
- 423 15. Llanderal, A., García-Caparrós, P., Contreras, J.I., Segura, M. L. & Lao, M. T. (2019): Spatio-temporal variations in nutri-  
424 ent concentration in soil solution under greenhouse tomato. *Journal of Plant Nutrition*, 10.1080/01904167.2019.1584219
- 425 16. Benavides-Mendoza, A., de Alba-Romenus, K., & Francisco-Francisco, N. (2021). Relation between soil solution  
426 composition and petiole cellular extract of crops in western Mexico. *Terra Latinoamericana*, 39(April), 1–13.  
427 <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.873>
- 428 17. Di Rienzo, J. A., Balzarini, M. G., González, L., Casanoves, F., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). InfoStat. Manual del  
429 Usuario. Córdoba, Argentina: Editorial Brujas.
- 430 18. Casas, A. , López, L. , Meca, D. , Martínez, E. , & Torres, J. . (2018). Uso de técnicas de diagnóstico nutricional rápido en  
431 invernaderos ecológicos. *Sistemas Alimentarios Agroecológicos y Cambio Climático*, 1(1), 287–295.
- 432 19. Le Bot, J., & Kirkby, E. A. (1992). Diurnal uptake of nitrate and potassium during the vegetative growth of tomato plants.  
433 *Journal of Plant Nutrition*, 15(2), 247–264. <https://doi.org/10.1080/01904169209364316>
- 434 20. Tucker, D. E., & Ort, D. R. (2002). Low temperature induces expression of nitrate reductase in tomato that temporarily  
435 overrides circadian regulation of activity. *Photosynthesis Research*, 72(3), 285–293. <https://doi.org/10.1023/A:1019892310988>
- 436 21. Breś, W., Kleiber, T., & Trelka, T. (2010). Quality of water used for drip irrigation and fertigation of horticultural plants.  
437 *Folia Horticulturae*, 22(2), 67–74. <https://doi.org/10.2478/fhort-2013-0161>

438

**TERCER ARTÍCULO**

Dynamics of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  in tomato petiole sap evaluated in short-term

**Article Research: Dynamics of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  in Tomato Petiole Sap Evaluated in Short-Term**

**Dynamics of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  in Tomato Petiole Sap Evaluated in Short-Term**

**Felicito Ausencio Díaz-Vázquez<sup>a</sup>** (0000-0003-0203-3036), **Marcelino Cabrera-De la Fuente<sup>a</sup>** (0000-0002-3292-2793), **Adalberto Benavides-Mendoza<sup>a</sup>** (0000-0002-2729-4315), **Valentín Robledo-Torres<sup>a</sup>** (0000-0001-5235-6584), **Antonio Juárez-Maldonado<sup>b</sup>** (0000-0003-3061-2297), **Raúl Alejandro Ramos-Salazar<sup>a</sup>** (0000-0003-3177-9320), **Alberto Sandoval-Rangel<sup>a\*</sup>** (0000-0003-4651-7980)

<sup>a</sup> Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro No. 1923, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>b</sup> Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro No. 1923, Saltillo, Coahuila, México.

\*Corresponding author: Alberto Sandoval-Rangel ([asandovalr16@gmail.com](mailto:asandovalr16@gmail.com))

## ABSTRACT

Ion concentration in the petiole sap shows variations in the short term, caused by increases in cellular metabolism favored by environmental conditions. A study on this dynamics allows to observe the moments of greatest demand of the crop for a specific ion. In order to study the variations in the concentration of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  in the cellular extract of the petiole of a tomato crop, an experiment was carried out applying four concentrations of Steiner solution, modified for tomato crop, through fertigation, to indeterminate growth tomato plants established in soil, under greenhouse conditions. Petiole sap was obtained for a period of 24 hours at hourly intervals, measuring the concentration of ions with selective ion electrodes, considering the ambient temperature at the time of sampling. The ions showed a specific dynamic behavior, however, the dynamic behavior was not modified by the applied treatment.  $\text{NO}_3^-$  showed fluctuations at shorter time ranges during the night,  $\text{K}^+$  showed a direct relationship between concentration and ambient temperature, and  $\text{Ca}^{2+}$  showed fluctuations even during the dark stage and low temperatures. The dynamics of  $\text{NO}_3^-$  could be related to a regulation of the ion flow by the nitrate reductase enzyme,  $\text{K}^+$  seems to be more related to stomatal regulation, while the dynamics of  $\text{Ca}^{2+}$  seems to be modified by other forms of transport unrelated to the mass flow of water.

**Keywords:** dynamic, nitrate, potassium, calcium, extract, petiole sap, 24 hours, electrodes

**Word count:** 5790 words

## INTRODUCTION

Ion availability in the nutritional management of a crop, determined by soil fertility and mineral input in irrigation, can directly affect the yield, growth, and nutritional status of the crop (Santillano *et al.*, 2019). J. von Liebig's Law of the Minimum states that the development and productive potential of a crop will be conditioned by the mineral element present in limited quantities for the crop (Mengel & Kirkby, 2000). In this regard, tomato crop, being one of the main vegetables produced worldwide, is highly sensitive to applied nutritional management, being very demanding of minerals such as  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Ca}^{2+}$  (Ferrati *et al.*, 2022). Nutritional imbalances in tomato crops are directly related to reductions in their development and yield (Rodríguez-Ortega *et al.*, 2019).

In soil-based production systems, the soil solution is the medium where mineral elements are partially dissolved in absorbable forms for the plant. However, a series of factors specific to the soil microenvironment, the plant, and the type of fertilization used, can modify the degree of absorption of these elements, even if they are available in the soil solution (Hernández *et al.*, 2014) (Canales-Almendares *et al.*, 2021) (Geraldo *et al.*, 2021). Crop evapotranspiration, vapor pressure deficit and leaf area index have been shown to be significant variables in predicting nutrient concentration in petiole sap through modeling (Llanderal *et al.*, 2020). However, real-time measurement of nutrient concentration in the field allows to know the real values considering some environmental factors.

In the soil solution of some studied crops, a positive correlation has been observed between the concentration of  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions with the values obtained in petiole sap. Otherwise, negative correlations have been detected for  $\text{NO}_3^-$  (Benavides-Mendoza *et al.*, 2021). Ordaz *et al.* (2021) mention that  $\text{NO}_3^-$  concentrations are affected by the substrate and the source of nutrition, with a positive effect of mineral nutrition on this ion being observed. Estrada-Arellano *et al.* (2022) suggest a greater effect of genotype on mineral sources for  $\text{NO}_3^-$  levels in tomato petioles sap.

The study of the soil solution provides an approximation of the amount of dissolved and available mineral elements for the plant (Sonneveld & Voogt, 2009). However, it does not guarantee that this amount of elements will be absorbed. Therefore, the analysis of petiole sap is considered the method that provides information with a more accurate approximation of the nutritional conditions of the crop (Cadahía, 2015).

Measuring the mineral content of the sap allows us to observe scenarios of "luxury consumption" when the levels of the absorbed ion are higher than the levels metabolized by the plant. On the other hand, a scenario called "limiting factor for development" can be generated by deficient plant absorption or high photosynthetic activity caused by favorable environmental conditions (Cadahía, 2015). This last scenario will generate periods of starvation for the crop, negatively affecting the development and productive potential.

Monitoring the concentration of ions of interest in petiole sap involves a process in which the extraction of the sap, as well as the measurement of its mineral content, is compared with reference values determined in previous studies (Casas *et al.*, 2018). The determination of the mineral content, either of dried leaves or petioles, can be carried out through laboratory techniques, in which the cost, time, and specialized equipment required are factors to consider, especially if adjustments to the nutritional management of the crop are necessary (Hochmuth, 1994).

The use of selective ion electrode (ISE) technology has allowed carrying out this type of measurements with a high degree of approximation, allowing measurements of the ion concentration in petiole sap in real time and in the same extraction site (Gómez *et al.*, 2017), (Llanderal *et al.*, 2019), (Hochmuth & Kinslow, 2020), (Peña-Fleitas *et al.*, 2021), which has allowed to observe the variations in the ion concentration due to the effect of the environment (Llanderal *et al.*, 2019), making it possible to carry out nutritional adjustments in a shorter time compared to conventional laboratory methods.

Based on previous studies, Casas *et al.* (2018) mention that the samplings to carry out measurements of the ion concentration in petiole sap must be

performed during the morning. Otherwise, it has been demonstrated that there are high variations in nutrient concentration among leaves that are in different stages of development (García & Azuara, 1991). Meanwhile, Llanderal *et al.* (2018) mention that the selection of the leaf sample does not generate variations in  $\text{Ca}^{2+}$  but it does in  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{K}^+$ , so a proper sampling can improve the level of approximation of the measurements taken. Samples taken in the morning will undoubtedly show the ion concentration at the start of the day, at which point fertigation has possibly been applied, providing the soil solution with a sufficient load of mineral nutrients. However, there is no information on the variations in ion concentration throughout the day, much less information on the effect of environmental factors such as temperature, on the dynamics of these ions in the plant, in the short term.

Therefore, the objective of this experiment was to measure the short term concentration of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions, through periodic sampling of tomato petioles sap treated with four levels of mineral nutrition, grown in soil under greenhouse conditions. Using the information obtained, an approximation of the absorption and flow dynamics of these ions in the tomato petiole was established, considering for this the greenhouse temperature at the time of sampling, This will allow us to observe if critical values of the ion in the petiole cell extract are reached at any point during the day, related to periods of starvation for the plant.

## MATERIALS AND METHODS

### Experiment Location

The assay was carried out at the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro in Saltillo, Coahuila, within the greenhouses area of the Department of Horticulture, at coordinates 25° 21' 24.3" N and 101° 02' 06.1" W. This region has clayey calcareous soils with a medium content of organic matter and an average annual temperature of 18.8 °C, with considerable increases during the spring-summer season.

### Plant Material

Indeterminate growth roma variety tomato plants were used. The plant consisted of Benedetti graft (Enza Zaden, Almería, Spain) on Espartaco rootstock (Harris & Moran, California, USA). A two-stem management system was carried out, with pest and disease control under conventional methods.

### Experimental Design

The experiment was established under a Randomized Complete Block Design with four treatments and three replications, consisting of 50%, 75%, 100% and 125% Steiner solution concentrations. Each treatment was applied through drip irrigation to an experimental plot represented by a section of the planting bed, with dimensions of 4 m in length, 1 m in width, and 0.35 m in height, and a planting density of 3 plants m<sup>-2</sup>, in a double row.

### Obtaining Petiole Sap

For each treatment and replication, leaves located between bunch 12 (in fruit development) and bunch 13 (in flowering) of the plants located at the center of the experimental plot were selected. These leaves were extracted every hour for a period of 24 hours. The leaflets were removed from each leaf, and the petiole was divided into small pieces, which were then introduced into a C-type manual press, obtaining the petiole sap.

### Ion Concentration Measurement in Petiole Sap

The concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> ions was measured using the LAQUAtwin-NO3-11, LAQUAtwin-K-11, and LAQUAtwin-Ca-11 ionometers (HORIBA, Kyoto, Japan), respectively, for each treatment and replication, every hour of the day. The results for the concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, and Ca<sup>2+</sup> were expressed in mg L<sup>-1</sup>.

### **Electrical Conductivity and pH Measurement in Petiole Sap**

The parameters of electrical conductivity (EC) and pH were measured using the LAQUAtwin EC-11 and LAQUAtwin pH-11 ion-selective electrodes (HORIBA, Kyoto, Japan), respectively. The obtained values were expressed in  $\text{dS m}^{-1}$  for EC and range values of 0-14 for pH.

### **Statistical Analysis**

The results were analyzed using a Randomized Complete Block Design with three replications, using Infostat v.2020 software (Di Rienzo *et al.*, 2020). An analysis of variance ( $p \leq 0.05$ ) and a Tukey's mean comparison test ( $p \leq 0.05$ ) were applied to the average values of ions, pH, and EC obtained for each treatment and replication. Additionally, the results obtained at each sampling time were graphed, allowing the temporal dynamics of ion concentration in a 24-hour period in the cellular extract of the petiole to be observed, also integrating the environmental temperature values.



## RESULTS

### Ion concentration, pH, and EC in Petiole Sap

The variance analysis reported the existence of a highly significant difference ( $p \leq 0.01$ ) for the values of  $K^+$  concentration and EC, in addition a significant difference ( $p \leq 0.05$ ) was detected for the concentration of  $Ca^{2+}$  in the petiole sap, between the evaluated treatments. For the values of  $NO_3^-$  concentration and pH, no significant difference was found between treatments (Table 1).

The mean comparison test (Table 2) did not detect significant differences in the concentrations of  $NO_3^-$  in the tomato petiole sap. Regarding  $K^+$ , it was observed that SN75 followed by SN125 had the highest values for this ion, surpassing SN50 and SN100 by 3.33% and 7.39%, and by 5.11% and 9.24%, respectively. For the  $Ca^{2+}$  ion, it was found that SN100 exceeded the values presented by SN50, SN125, and SN75 by 7.76%, 17.18%, and 32.80%, respectively. In relation to EC, the values found in SN75 exceeded the values generated by SN125, SN100, and SN50 by 3.66%, 4.19%, and 4.94%, respectively.

### Ion dynamics, pH, and EC in Petiole Sap In Short Term

Based on the dynamic analysis of ion concentration, similar patterns of ion behavior were observed regardless of the treatment. However, maximum ( $C_{max}$ ) and minimum ( $C_{min}$ ) concentrations were found at variable time intervals for  $NO_3^-$  and  $Ca^{2+}$ , unlike  $K^+$  which showed  $C_{max}$  and  $C_{min}$  values at similar time periods across all treatments. Furthermore,  $K^+$  exhibited a direct correlation with the recorded temperature values (Table 3).

Regarding the ions temporal dynamics (Figures 1 and 2), different behaviors were observed for each ion, but an identical behavior of the ion between treatments. During the observation period, the dynamics of  $NO_3^-$  did not exhibit a pattern directly related to temperature, as both the values for  $C_{max}$  and  $C_{min}$  were found at different times of day and temperatures for all treatments applied, suggesting that the regulation of  $NO_3^-$  concentrations in petiole sap is controlled by other factors. On the contrary,  $K^+$  showed a direct relationship between concentration and temperature, and for  $Ca^{2+}$ , fluctuations in ion concentration were observed even during periods of low temperature and darkness.

## DISCUSSION

### Levels of $\text{NO}_3^-$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , pH, and EC in Petiole Sap

Regarding the values obtained for  $\text{NO}_3^-$ , Benavides-Mendoza *et al.* (2021) reported the existence of a negative correlation between the concentration of this ion in the soil solution and the values found in petiole sap for melon, raspberry, and pepper, while a positive correlation was observed for broccoli and cauliflower. The values found for  $\text{NO}_3^-$  are similar to those found by Llanderal *et al.* (2018), who observed values of 4,488.02 mg L<sup>-1</sup> of  $\text{NO}_3^-$  in mature leaves of tomato crop.

Regarding the  $\text{K}^+$  ion, Benavides-Mendoza *et al.* (2021) reported similar values in petiole sap ranging from 4100 to 5550 mg L<sup>-1</sup> in a pepper crop at harvest stage. They observed a positive correlation between the concentration of ions in soil solution and the cellular extract of petiole in crops such as avocado, blueberry, papaya, and pepper. However, a negative correlation without significance was observed in broccoli, lettuce, and melon. For their part, Hochmuth & Kinslow (2020) report similar values of  $\text{K}^+$  in petiole sap within a range of 3,500 to 4,000 mg L<sup>-1</sup> for greenhouse tomato crop at similar stages of development, in the same way, Casas *et al.* (2018) reported  $\text{K}^+$  concentration values in tomato petioles under protected conditions ranging from 4,529 to 4,142 mg L<sup>-1</sup>.

The observed values for the  $\text{Ca}^{2+}$  ion are consistent with those reported by Casas *et al.* (2018), who found concentrations of 528 to 194 mg L<sup>-1</sup> in petiole sap of greenhouse-grown tomatoes. Similarly, Llanderal *et al.* (2018) reported average values of  $\text{Ca}^{2+}$  in petiole sap of 524.42 mg L<sup>-1</sup> determined by HPLC. On the other hand, Cadahía (2015) reported values of 1,344, 789, and 496 mg L<sup>-1</sup> for  $\text{Ca}^{2+}$  in old, developed young and very young leaves, respectively, in a tomato crop under greenhouse conditions. Benavides-Mendoza *et al.* (2021) reported a positive correlation between the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  in soil solution and the cellular extract of petiole in avocado, cauliflower, lettuce, melon, raspberry, strawberry, and papaya crops.

The concentration of ions in the soil solution determined by the nutritional supply through fertigation and the concentration of ions in the petiole sap show correlations that vary depending on the crop studied. In addition, the values found for the evaluated ions in petiole sap are within the range of values reported in several studies. It was observed that the nutritional treatments employed have a direct relationship with the concentration of ions in petiole sap.

Casas *et al.* (2018) reported EC values ranging from 20.8 to 16.6 mS cm<sup>-1</sup> for the same crop under protected conditions. The EC values are possibly

determined by the concentrations of cations such as  $K^+$  and  $Ca^{2+}$  and other cations present in petiole sap. As for pH, no significant difference was observed. In this regard, Casas *et al.* (2018) reported pH values from 5.1 to 6 in an analysis conducted over 6 months. However, in the short term (24 hours), such high variations were not observed as this variable presented some stability in the present experiment.

### **Flux dynamics and $NO_3^-$ , $K^+$ and $Ca^{2+}$ transportation in Petiole Sap**

The dynamics of  $NO_3^-$  during the observation period did not exhibit a pattern directly related to temperature, as both the values for  $C_{max}$  and  $C_{min}$  were located at different times of the day, at different temperatures for all the applied treatments, suggesting that the regulation of  $NO_3^-$  concentrations in petiole sap were by other factors.

Plants accumulate high amounts of  $NO_3^-$ , which is reduced to organic forms of nitrogen in the cytoplasm of root and apical shoots cells, with excess being stored in vacuoles and used to maintain ion homeostasis when metabolized (Burns *et al.*, 2011). The enzyme Nitrate Reductase (NR) is responsible for catalyzing the reduction of  $NO_3^-$  to  $NH_4^+$  during nitrate metabolism in the cytoplasm (Kathpalia & Bhatla, 2018). Regarding this, Rohilla & Parkash (2020) mention that there are several factors that regulate NR synthesis, including an increase in cytoplasmic nitrate, which directly influences the amount, activity, and accumulation of NR mRNA transcripts. The same author agrees with Taiz & Zeiger (2002) who suggest an exponential increase and accumulation of mRNA and a linear accumulation of NR, due to slow protein synthesis.

On the other hand, Rohilla & Parkash (2020) mention other factors that affect the activity of NR mRNA transcripts, such as light induction, plastids, and diurnal differences in NR expression. In this sense, Galangau *et al.* (1988) reported that the amount of NR mRNA decreases steadily during the day and increases during periods of darkness, with fluctuations in NR levels ranging from 3 to 5 hours. Tucker & Ort (2002) mention the effect of low temperatures as inducers of NR synthesis and activity in crops sensitive to temperature drops, such as tomato. Similarly, Tucker *et al.* (2004) mention that NR has an active lifespan of approximately 2.5 hours when the plant is exposed to darkness, resulting in phosphorylation and reduction of active NR. A new synthesis of NR will increase its activity, promoting the transport and metabolism of  $NO_3^-$ . Thus, the fluctuations in  $NO_3^-$  levels in petiole sap obtained in the present experiment could be determined both by transport systems regulated by  $NO_3^-$  concentration, as well as by NR behavior mediated by light and dark periods, as well as the low temperatures observed at night, since as seen in Figures 1 and 2, there are more fluctuations in  $NO_3^-$  concentration in petiole sap during the dark period.

The behavior of the  $K^+$  ion showed a direct relationship with the temperature of the greenhouse, which is related to the stomatal opening and closing in the plant. In addition to temperature levels, the availability of light must also be considered. Azcón-Bieto & Talón (2003) mention that sunlight promotes the process of photosynthesis, increasing the need for  $CO_2$  absorption, so the stomata must remain open by increasing their osmotic potential in the occlusive cells. Similarly, Bhatla *et al.* (2018) mention that other physiological processes of the plant and environmental factors influence stomatal opening, such as light, cellular respiration ( $CO_2$  fixation), relative humidity, pH, water stress, and temperature.

In the case of temperature, the authors mention that stomata close at temperatures of 30-35 °C. These temperatures can generate an increase in respiration rate, increasing the amount of  $CO_2$  at the cellular level, leading to stomatal closure. In some cases, temperature can induce stomatal opening to regulate leaf temperature. In either case, and whenever the guard cells of the stomata have to open or close,  $K^+$  fluxes will participate in increases or decreases in the osmotic potential of the guard cells.

In the experiment, it is possible to observe how temperatures of 32.5-35 °C generate the highest values for the concentration of  $K^+$  in petiole sap. Under optimal soil moisture conditions, transpiration increases, and the light intensity related to photosynthesis is regularly higher at this time of day, while respiration also increases, resulting in an internal saturation of  $CO_2$ . As a consequence, there is a reduction in stomatal opening after the hours of high temperature and radiation.

The increases in  $K^+$  at the cellular level obey the generation of a concentration gradient by  $H^+$ -ATPase linked to the plasma membrane, which pumps protons to the outside, benefiting the entry of  $K^+$  through selective channels (Dreyer & Uozumi, 2011). Stomatal closure, on the other hand, is caused by the synthesis of ABA, which opens  $Cl^-$  channels, expelling them out of the guard cells. ABA also inhibits the activity of  $H^+$ -ATPase. This ionic imbalance generates the flow of  $K^+$  out of the cell, decreasing the concentration of solutes and consequently causing water loss, closing the stomata (Kathpalia & Bhatla, 2018).

For  $Ca^{2+}$ , variations in ion concentration showed an increasing trend during the day, reaching the maximum during the hours with the highest temperature, followed by a continuous decrease until the beginning of the dark period. During the dark period, fluctuations in values were observed, reaching the maximum concentration of the entire sampling period in this stage for all treatments. The dynamics of the ion during the day can be explained by the passive transport of the ion in the plant, through transpiration currents or mass flow of water (Mengel & Kirkby, 2000) (Hocking *et al.*, 2016). The  $Ca^{2+}$  transportation from roots to xylem can occur via the apoplast or symplast pathway. The use of the apoplast

pathway is necessary to meet shoot demand without compromising intracellular signaling (White, 2001). Evidence of  $\text{Ca}^{2+}$  transport promoted by root pressure has been found in cabbages (Palzkill & Tibbits, 1977), although it has been suggested that its movement could be mediated by indoleacetic acid (IAA) through the activation of a proton pump in growth points (Taylor *et al.*, 1961) (Marschner & Osseberg-Neuhaus, 1977) (Xu *et al.*, 2012) when respiratory activity is almost nil, which could explain fluctuations in  $\text{Ca}^{2+}$  in petiole sap during the night. Salas-Rivera *et al.* (2020) mention that vapor pressure deficit is a factor that affects ion absorption and flow in the sap. Furthermore, they mention that when  $\text{K}^+$  levels in the soil solution are low, the absorption and transport of  $\text{Ca}^{2+}$  are favored. This can explain the fluctuations and increases of  $\text{Ca}^{2+}$  in the petiole sap after high-temperature phases, when  $\text{K}^+$  begins to decrease, which also shows low availability of  $\text{K}^+$  in the nutrient solution after high demand. Regarding concentrations,  $\text{Ca}^{2+}$  has low intracellular concentration (1  $\mu\text{M}$ ), being stored in the vacuole in the form of oxalates, carbonates, sulfates, or phosphates. In addition to the endoplasmic reticulum and chloroplast, high concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  are found in the apoplast, integrating into pectates of the middle lamella and cell membranes (Azcón-Bieto & Talón, 2003).

For pH and EC values, a similar behavior was observed for all treatments. The dynamics reflected an inverse relationship between the values of these parameters, with an inverse behavior observed during the period from 16:00 to 1:00, during which EC showed a decrease, remaining stable at the new levels reached. On the other hand, pH increased during this period and remained stable until the trends of both parameters were reversed again. The behavior of  $\text{K}^+$  concentrations related to stomatal opening and closure is directly related to pH, as when the  $\text{H}^+$ -ATPase is activated, the  $\text{H}^+$  pumped out of the cell to create the gradient that allows  $\text{K}^+$  entry, comes from water photolysis, generating an  $\text{OH}^-$  concentration inside the cell that increases pH (Azcón-Bieto & Talón, 2003). However, when  $\text{K}^+$  concentrations stabilize, pH recovers its initial levels.

## CONCLUSIONS

The results of the concentrations of the ions evaluated in petiole sap in the short term allowed to observe that  $K^+$  presents greater stability in its behavior in all applied treatments, showing a direct effect of the ambient temperature on the levels of the ion in petiole sap, as a response to respiration, photosynthesis, and stomatal regulation processes. Regarding  $NO_3^-$ , a fluctuating behavior was observed possibly related to the rhythms of enzyme activity related to its cellular metabolism, showing fluctuations even in stages of darkness.  $Ca^{2+}$  showed a fluctuating behavior related to the transpiration flows of the plant and the low intracellular concentration. The variable flows of  $Ca^{2+}$  in the dark phase may be related to transport mediated by IAA. The behavior of pH and EC can be explained by the flows of the evaluated ions.

The nutritional treatments at different concentrations allowed to observe the dynamics and variations of the ion concentration throughout the observation period. The temperature and nutrient concentration in the nutrient solution modify the ion concentration in petiole sap, which generates variations in pH and EC. However, the dynamic behavior of the ions is independent of their concentration in the soil solution, only showing variation in concentration levels but not in their dynamic behavior, which is similar in all evaluated treatments.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología and the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro for their support in financing the research.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest in the writing and publication of the results in the manuscript.

## REFERENCES

- Azcón-Bieto, J. & Talón, M. (2003). *Fundamentals of plant physiology*. McGraw-Hill. España.
- Benavides-Mendoza, A., de Alba-Romenus, K. & Francisco-Francisco, N. (2021). Relation between soil solution composition and petiole cellular extract of crops in western Mexico. *Terra Latinoamericana*, 39(April), 1–13. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.873>
- Burns, I. G., Zhang, K., Turner, M. K. & Edmondson, R. (2011). Iso-osmotic regulation of nitrate accumulation in lettuce. *Journal of Plant Nutrition*, 34(2), 283–313. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.533328>
- Cadahía, C. (2015). Sap analysis as a fertilization index for tomato plants. Madrid University. España.
- Canales-Almendares, J. E., Borrego-Escalante, F., Narvaez-Ortíz, W. A., González-Morales, S. & Benavides-Mendoza, A. (2021). Impact of different fertilizers on the soil solution and tomato growth. *Mexican Journal of Agricultural Sciences*, 26, 105–117. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2941>
- Casas, A., López, L., Meca, D., Martínez, E. & Torres, J. (2018). Use of rapid nutritional diagnosis techniques in ecological greenhouses. *Agroecological Food Systems and Climate Change*, 1(1), 287–295.
- Di Rienzo, J., Di Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. & Robledo, C. W. (2020). InfoStat, Version 2020 (No. 2020; p. 336).
- Dreyer, I. & Uozumi, N. (2011). Potassium channels in plant cells. *FEBS Journal*, 278(22), 4293–4303. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2011.08371.x>
- Estrada-Arellano, E., Murillo-Amador, B., Cervantes-Vázquez, T. J. A., Gallegos-Robles, M. A., Fortis-Hernández, M. & Vázquez-Vázquez, C. (2022). Organic fertilization to improve nutraceutical quality of tomato hybrids and its effect on the chemical properties of the soil. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1613>
- Ferrari Putti, F., Vacaro de Souza, A., Leoti Zanetti, W.A., Bueno Nogueira, B., Domingues Neto, F.J., de Queiroz Barcelos, J.P. & de Lucca Sartori, D. (2022) Growth and absorption curve of nutrients in tomato crop ‘BRS imigrante’ cultivar

grown in coconut fiber. *Journal of Plant Nutrition*, 45:15, 2239-2250, DOI: 10.1080/01904167.2022.2063734

Galangau, F., Daniel-Vedele, F., Moureaux, T., Dorbe, M. F., Leydecker, M. T. & Caboche, M. (1988). Expression of leaf nitrate reductase genes from tomato and tobacco in relation to light-dark regimes and nitrate supply. *Plant Physiology*, 88(2), 383–388. <https://doi.org/10.1104/pp.88.2.383>

García López, M. E. & Azuara, P. (1991). Evaluation of the most adequate organ of reference for sap analysis in the tomato plant. *Biologia Plantarum (PRAHA)*, 33(2), 91–96. <https://doi.org/10.1007/BF02897784>

Geraldo de Moraes, E., Alberto Silva, C., Guimarães Moreira Maluf, H.J. (2021). Soaking of Seedlings Roots in Humic Acid as an Effective Practice to Improve Eucalyptus Nutrition and Growth . *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(12), 1399-1415. doi:10.1080/00103624.2021.1885686

Gómez, M., Magnitskiy, S. & Rodríguez, L. (2017). Diagnosis of K<sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in sap to determine the nutritional status of potatoes (*Solanum tuberosum* L. subsp. Andigena). *Colombian Journal of Horticultural Sciences*, 11(1), 133-142. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.6132>

Hernández Díaz, M. I., Chailloux Laffita, M., Moreno Placeres, V., Igarza Sánchez, A. & Ojeda Veloz, A. (2014). Reference levels of nutrients in the soil solution for nutritional diagnosis in protected tomato cultivation. *Idesia*, 32(2), 79–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000200011>

Hochmuth, G. J. (1994). Efficiency ranges for nitrate-nitrogen and potassium for vegetable petiole sap quick tests. *HortTechnology*, 4(3), 218–222. <https://doi.org/10.21273/horttech.4.3.218>

Hochmuth, G. & Kinslow, M. P. (2020). Monitoring of Vegetable Petiole Sap. *Edis*, 2020(4), 1–5. <https://doi.org/10.32473/edis-hs1368-2020>

Hocking, B., Tyerman, S. D., Burton, R.A. and Gilliham, M. (2016). Fruit Calcium: Transport and Physiology. *Frontiers of Plant Science*. 7:569. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00569>.



- Kathpalia, R. & Bhatla, S. (2018). Plant water relations. In S. C. Bhatla & M. A. Lal (Eds.) *Plant physiology, development and metabolism*. Springer Singapore. Singapore. p. 1251
- Bhatla, S. C. & Lal, M. A. (2018). *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1\\_32](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_32)
- Llanderal, A., García-Caparrós, P., Contreras, J. I., Segura, M. L. & Lao, M. T. (2018). Evaluation of the nutrients variability in sap of different petiole samples in tomato plant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(6), 745–750. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1435797>
- Llanderal, Alfonso, García-Caparrós, P., Pérez-Alonso, J., Contreras, J. I., Segura, M. L., Reza, J., & Lao, M. T. (2020). Approach to petiole sap nutritional diagnosis method by empirical model based on climatic and growth parameters. *Agronomy*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy10020188>
- Llanderal, Alfonso, García-Caparrós, P., Segura, M. L., Contreras, J. I., & Lao, M. T. (2019). Nutritional changes in petiole sap over space and time in a tomato crop greenhouse. *Journal of Plant Nutrition*, 42(10), 1205–1217. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1609504>
- Marschner, H. and Ossenberg-Neuhaus, H. (1977). Effect of 2,3,5-trijodobenzoic acid (TIBA) on calcium translocation and cation exchange capacity in sunflower. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*, 85(1), 29-44. [https://doi.org/10.1016/S0044-328X\(77\)80262-6](https://doi.org/10.1016/S0044-328X(77)80262-6)
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principles of Plant Nutrition* (4th ed.). International Potasa Institute. Suiza. p. 608
- Ordaz Gallegos, J., Sánchez Escudero, J., Marquez de la Cruz, J. E., Cabanzo Atilano, I., & Rodríguez Mendoza, M. D. L. N. (2021). Kale production in different substrates under greenhouse conditions. *TECNOCIENCIA Chihuahua*, 15(1), 38–51. <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i1.757>
- Palzkill, D. A. and Tibbitts, T. W. (1977). Evidence that root pressure flow is required for calcium transport to head leaves of cabbage. *Plant Physiology*, 60(6), 854-856. doi: 10.1104/pp.60.6.854.

Peña-Fleitas, M. T., Gallardo, M., Padilla, F. M., Rodríguez, A., & Thompson, R. B. (2021). Use of a portable rapid analysis system to measure nitrate concentration of nutrient and soil solution, and plant sap in greenhouse vegetable production. *Agronomy*, 11(5).

<https://doi.org/10.3390/agronomy11050819>

Rodríguez-Ortega, W. M., Martínez, V., Nieves, M., Simón, I., Lidón, V., Fernández-Zapata, J. C., Martínez-Nicolas, J. J., Cámara-Zapata, J. M. and García-Sánchez, F. (2019). Agricultural and Physiological Responses of Tomato Plants Grown in Different Soilless Culture Systems with Saline Water under Greenhouse Conditions. *Scientific Reports*, 9, 6733. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42805-7>

Rohilla, P. & Parkash, J. (2020). Nitrate Reductase Structure, Role and Factors Affecting Its Regulation: a Review. *Plant Archives*, 20(2), 5787–5793.

Salas-Rivera, R., Valdez-Aguilar, L. A., Alvarado-Camarillo, D., Rascón-Alvarado, E., Peña-Ramos, F. M., & González-Fuentes, J. A. (2020). Potassium:calcium balance, relationship with vapor pressure deficit and photosynthetically active radiation in greenhouse tomato. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 311–321. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.589>

Santillano Cázares, J., Roque Díaz, L. G., Núñez Ramírez, F., Grijalva Contreras, R. L., Robles Contreras, F., Macías Duarte, R., Escobosa García, I., & Cárdenas Salazar, V. (2019). Soil fertility affects the growth, nutrition and yield of cotton grown in two irrigation systems and different doses of nitrogen. *Terra Latinoamericana*, 37(1), 7. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i1.304>

Sonneveld, C. & Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer Dordrecht, 433 p. doi:10.1007/978-90-481-2532-6

Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant physiology* (3<sup>rd</sup> edition). Sinauer Associates. United Kingdom. p. 690.

Taylor, G. A., Moore, J. N. and Drinkwater, W. O. (1961). Influence of 2,3,5-triiodobenzoic acid, indole-3-acetic acid & method of sample collection on translocation of foliar applied radiocalcium. *Plant Physiology*, 36(3), 360-363. <https://doi.org/10.1104/pp.36.3.360>

Tucker, D. E., Allen, D. J. & Ort, D. R. (2004). Control of nitrate reductase by circadian and diurnal rhythms in tomato. *Planta*, 219(2), 277–285. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1213-x>

Tucker, D. E. & Ort, D. R. (2002). Low temperature induces expression of nitrate reductase in tomato that temporarily overrides circadian regulation of activity. *Photosynthesis Research*, 72(3), 285–293. <https://doi.org/10.1023/A:1019892310988>

White, P. J. (2001). The pathways of calcium movement to the xylem. *Journal of Experimental Botany*, 52(358), 891–899, <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.358.891>

Xu, T., Li, J. H., Qi, M. F., Lv, S. S., Zuo, X. H., Gao, S., Li, H. and Li, T.L. (2012). The effect of calcium on auxin depletion-induced tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) pedicel abscission. *African Journal of Biotechnology*, 11(81), 14638-14643. [10.5897/AJB12.1773](https://doi.org/10.5897/AJB12.1773)

Table 1. ANVA ( $p \leq 0.05$ ) of the concentration of ions, pH and CE in petiole sap, as an effect of the concentration of the nutrient solution, in a period of 24 hours in indeterminate tomato crop grown under greenhouse conditions.

VF	DF	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	pH	EC
% Steiner Solution	3	2 198 129.27 <sup>ns</sup>	51 380.85 <sup>**</sup>	16 676.75 <sup>*</sup>	0.000022 <sup>ns</sup>	0.14 <sup>**</sup>
Block	2	5 653 383.86 <sup>ns</sup>	5158.6 <sup>ns</sup>	271.18 <sup>ns</sup>	0.00026 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>*</sup>
Error	6	541 044.81	3784.93	2476.34	0.00035	0.01
CV (%)		16.77	1.82	7.98	0.34	1.05

VF= Variation factor; DF= Degrees of freedom; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>= Nitrates; K<sup>+</sup>= Potassium; Ca<sup>2+</sup>= Calcium; pH= Potential of Hydrogen; EC= Electrical Conductivity; CV= Coefficient of variation.

Table 2. Mean values and standard deviation for the concentration of ions, pH and EC in tomato petiole sap grown under greenhouse conditions, as an effect of nutritional treatments with different concentrations.

Tratamientos	Ion concentration and mean pH and EC values				
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg L <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup> mg L <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup> mg L <sup>-1</sup>	pH 0-14	CE dS m <sup>-1</sup>
SN125	5226.39 ± 754.64 a	3450.00 ± 54.17 a	602.22 ± 17.29 ab	5.47 ± 0.02 a	9.83 ± 0.06 b
SN100	4275.00 ± 1248.88 a	3212.50 ± 72.65 b	705.69 ± 40.38 a	5.47 ± 0.02 a	9.78 ± 0.12 b
SN75	4797.22 ± 1386.27 a	3509.44 ± 45.03 a	531.39 ± 44.52 b	5.47 ± 0.01 a	10.19 ± 0.15 a
SN50	3241.25 ± 1796.00 a	3338.89 ± 79.20 ab	654.86 ± 61.56 ab	5.47 ± 0.02 a	9.71 ± 0.25 b
MEAN	4384.97	3377.71	623.54	5.47	9.88
Tukey ( $p \leq 0.05$ )	2079.04	173.89	140.65	0.05	0.29

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>= nitrate, K<sup>+</sup>= potassium, Ca<sup>2+</sup>= Calcium, pH= potential of hydrogen, EC= electrical conductivity, SN125= 125% Steiner solution, SN100= 100% Steiner solution, SN75= 75% Steiner solution, SN50= Steiner solution at 50%

Table 3. Record of the time of day and greenhouse temperature, for  $C_{\max}$  and  $C_{\min}$  of  $\text{NO}_3$ , K, and Ca ions in petiole sap, as an effect of the applied nutrient solution concentration.

Ion	Treatment	$C_{\max}$ $\text{mg L}^{-1}$	Hour	Temp. $^{\circ}\text{C}$	$C_{\min}$ $\text{mg L}^{-1}$	Hour	Temp. $^{\circ}\text{C}$
$\text{NO}_3^-$	SN 50%	5,033.3	14:00	32.5	1,933.3	23:00	16.0
	SN 75%	6,766.7	00:00	16.5	3,066.7	08:00	12.9
	SN 100%	7,033.3	21:00	16.0	2,266.7	18:00	23.4
	SN 125%	6,933.3	15:00	33.0	3,266.7	11:00	30.2
$\text{K}^+$	SN 50%	6,200.0	11:00	30.2	1,933.3	23:00	16.0
	SN 75%	6,733.3	11:00	30.2	2,200.0	22:00	16.0
	SN 100%	5,900.0	11:00	30.2	1,933.3	01:00	14.0
	SN 125%	6,966.7	12:00	35.0	2,200.0	22:00	16.0
$\text{Ca}^{2+}$	SN 50%	1,133.3	03:00	13.1	343.3	16:00	31.5
	SN 75%	833.3	06:00	12.2	216.7	16:00	31.5
	SN 100%	1,213.3	02:00	13.4	206.7	16:00	31.5
	SN 125%	1,040.0	18:00	23.4	323.3	12:00	35.0

$C_{\max}$ = Maximum concentration;  $C_{\min}$ = Minimum concentration

Figure 1. Dynamics of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions, as well as pH, EC, and temperature parameters in petiole sap of indeterminate tomato crop under greenhouse conditions, as an effect of the application of Steiner nutrient solution at concentrations of 50% (A) and 75% (B).

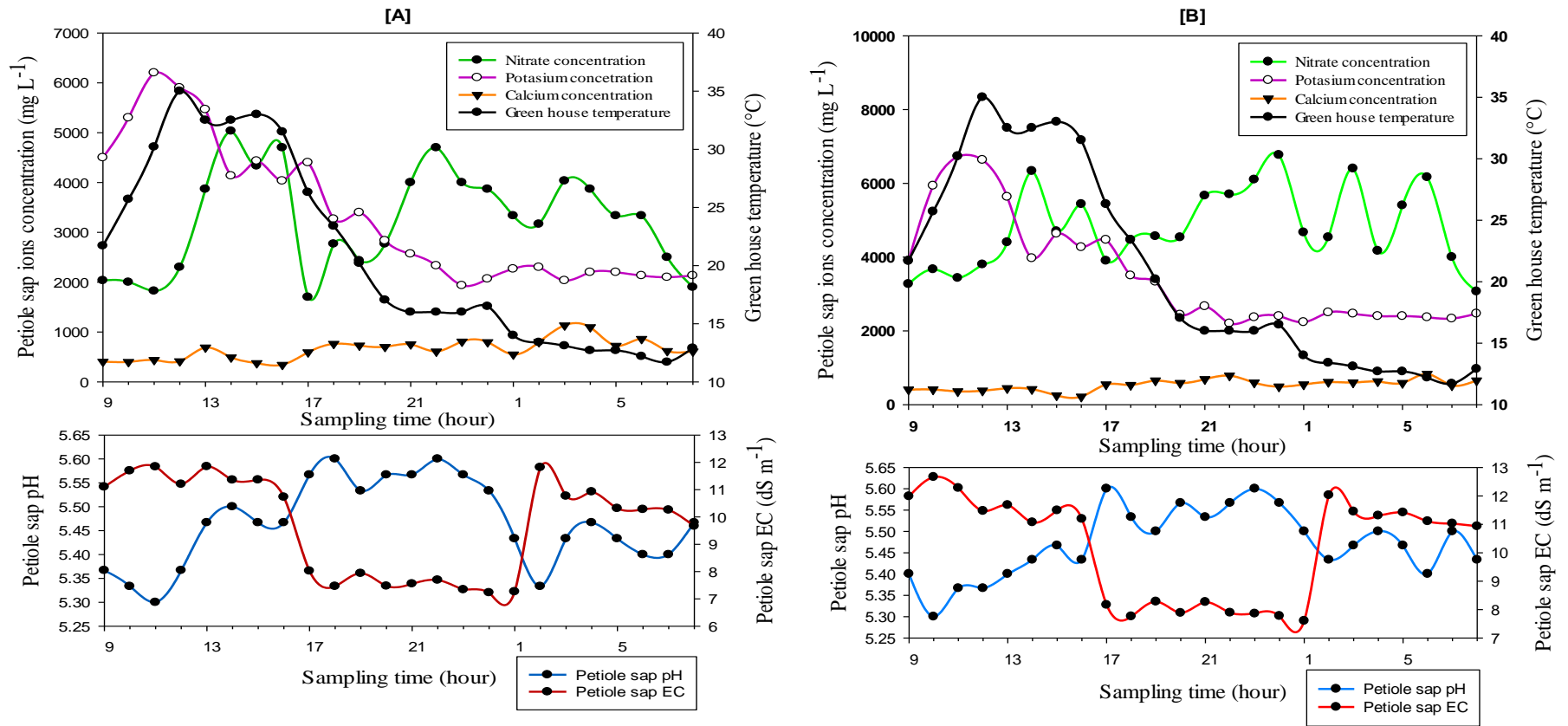
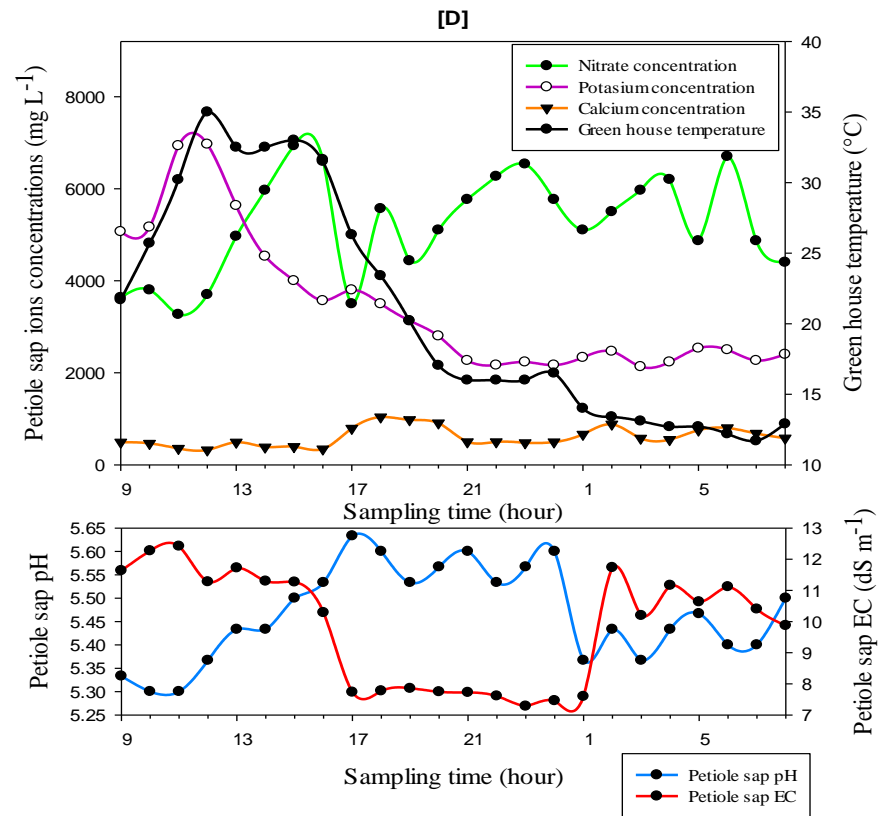
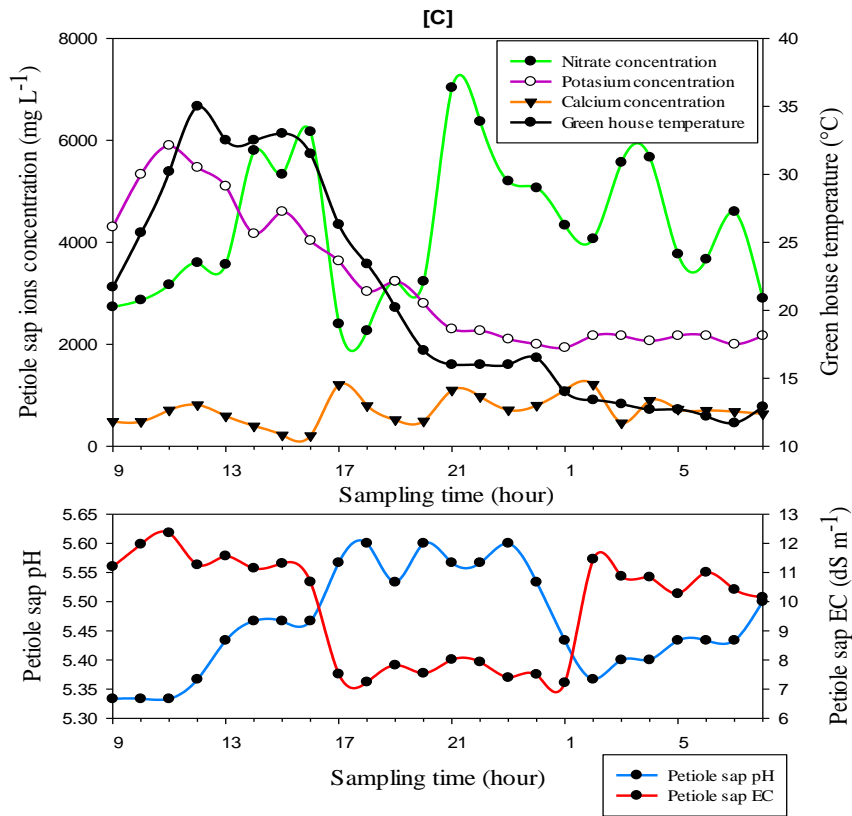


Figure 2. Dynamics of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions, as well as pH, EC, and temperature parameters in the petiole sap of indeterminate tomato crop under greenhouse conditions, as a result of the application of 100% (C) and 125% (D) Steiner nutrient solution concentrations.



## CONCLUSIONES GENERALES

1. La concentración del ion nitrato, superó los valores esperados en función de la concentración de la solución nutritiva. El ritmo de absorción de la planta aunado a un aporte de la totalidad de  $\text{NO}_3^-$  por fuentes exógenas y a que el ion no participa en los procesos de intercambio iónico con la fase de cambio del suelo, permiten que este ion fluya libremente en la solución del suelo.
2. La concentración del ion  $\text{K}^+$  correspondió en términos generales a los valores esperados en función de la concentración de la solución nutritiva aplicada. Los aportes superiores a la demanda del cultivo en etapas tempranas permite reestablecer los niveles de  $\text{K}^+$  las micras del suelo, haciendo posible una mayor disponibilidad de  $\text{K}^+$  en etapas posteriores de desarrollo del cultivo.
3. El ion  $\text{Ca}^{2+}$  mostró valores de concentración elevados aun con bajo aporte mineral por la solución nutritiva, dichos valores elevados son originados por el tipo de suelo, el cual presenta alto contenido de calcio mineral.
4. La concentración de la solución nutritiva aplicada al suelo y su posterior disponibilidad en la solución del suelo, genera un incremento proporcional a las variables de crecimiento, fisiológicas, de calidad de fruto y rendimiento en cultivo de tomate.
5. El monitoreo periódico de los niveles de biodisponibilidad de los iones en la solución del suelo, puede ayudar a reducir el gasto económico por el aporte de elementos con suficiencia en la solución del suelo y permite adecuar el aporte de otros iones como  $\text{K}^+$  en función de los ritmos de absorción y desarrollo del cultivo.
6. La biodisponibilidad de iones en la solución del suelo incide directamente en la cantidad de iones absorbidos y transportados por el xilema, medido en extracto celular de peciolo y por ende, impacta en los procesos fisiológicos como apertura estomática ( $\text{K}^+$ ), firmeza del fruto ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y desarrollo vegetativo de la planta ( $\text{NO}_3^-$ ).



## REFERENCIAS

- Adekiya, A. O., Ejue, W. S., Olayanju, A., Dunsin, O., Aboyeji, C. M., Aremu, C., Adegbite, K., & Akinpelu, O. (2020). Different organic manure sources and NPK fertilizer on soil chemical properties, growth, yield and quality of okra. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73291-x>
- Agbeshie, A. A., Logah, V., Opoku, A., Tuffour, H. O., Abubakari, A., & Quansah, C. (2020). Mineral nitrogen dynamics in compacted soil under organic amendment. *Scientific African*, *9*. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00488>
- Alam, M. S., Tester, M., Fiene, G., & Mousa, M. A. A. (2021). Early growth stage characterization and the biochemical responses for salinity stress in tomato. *Plants*, *10*(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants10040712>
- Andrade Muñoz, L. B. (2020). Zonificación del pH, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica y materia orgánica en la parroquia Cangahua, provincia Pichincha. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, *4*(35), 47–56. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol4iss35.2020pp47-56>
- Attia, M. S., Osman, M. S., Mohamed, A. S., Mahgoub, H. A., Garada, M. O., Abdelmouty, E. S., & Latef, A. A. H. A. (2021). Impact of foliar application of chitosan dissolved in different organic acids on isozymes, protein patterns and physio-biochemical characteristics of tomato grown under salinity stress. *Plants*, *10*(2), 1–24. <https://doi.org/10.3390/plants10020388>
- Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (2007). *Handbook of Plant Nutrition*. Taylor & Francis.
- Bell, M. J., Ransom, M. D., Thompson, M. L., Hinsinger, P., Florence, A. M., Moody, P. W., & Guppy, C. N. (2020). Considering soil potassium pools with dissimilar plant availability. In T. S. Murrell, R. L. Mikkelsen, G. Sulewski, R. Norton, & M. L. Thompson (Eds.), *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops* (pp. 163–190). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_3)
- Betancourt, P., & Pierre, F. (2013). Extracción de macronutrientes por el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. var. Alba) en casas de cultivo en Quíbor, Estado Lara. *Bioagro*, *25*(3), 181–188.
- Bilalis, Di., Krokida, M., Roussis, I., Papastylianou, P., Travlos, I., Cheimona, N., & Dede, A. (2018). Effects of organic and inorganic fertilization on yield and

- quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Folia Horticulturae*, 30(2), 321–332. <https://doi.org/10.2478/fhort-2018-0027>
- Bołzan, B. D.-. (2017). Effect of pH and soil environment. *World News of Natural Sciences*, 8, 50–60.
- Canales-Almendares, J. E., Borrego-Escalante, F., Narvaez-Ortíz, W. A., González-Morales, S., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Impacto de diferentes fertilizantes en la solución del suelo y el crecimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26, 105–117. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2941>
- CEDRSSA. (2020). *Análisis de la producción y consumo de hortalizas*.
- Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., & Gordillo-Curiel, A. (2020). Effect of organic matter and cation exchange capacity on the acidity of soils cultured with corn in two regions of Chiapas, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 475–480. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- De la Rosa-Rodríguez, R., Lara-Herrera, A., Trejo-Téllez, L. I., Padilla-Bernal, L. E., Solis-Sánchez, L. O., & Ortiz-Rodríguez, J. M. (2020). Water and fertilizers use efficiency in two hydroponic systems for tomato production. *Horticultura Brasileira*, 38(1), 47–52. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620200107>
- De Luca, A., Corell, M., Chivet, M., Parrado, M. A., Pardo, J. M., & Leidi, E. O. (2021). Reassessing the role of potassium in tomato grown with water shortages. *Horticulturae*, 7(2), 1–13. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7020020>
- Egbi, C. D., Anornu, G. K., Ganyaglo, S. Y., Appiah-Adjei, E. K., Li, S. L., & Dampare, S. B. (2020). Nitrate contamination of groundwater in the Lower Volta River Basin of Ghana: Sources and related human health risks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191(May 2019), 110227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110227>
- Escobar, H., & Lee, R. (2009). *Manual de Producción de tomate bajo invernadero*. Fundación Universidad de Bogota Jorge Tadeo Lozano, 180 p.
- Esteban, W., Bustos, R., Hurtado, E., Badillo, E., Corro, G., Angel, Y., y Bastías, E. (2021). Comportamiento fisiológico de líneas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) generación F3 cultivadas en condiciones de salinidad y exceso de boro. *Idesia (Chile)*, 39(4), 71–77. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292021000400071>

- FAO. (2023). *Produccion de tomate*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Feyissa, A., Yang, F., Wu, J., Chen, Q., Zhang, D., & Cheng, X. (2021). Soil nitrogen dynamics at a regional scale along a precipitation gradient in secondary grassland of China. *Science of the Total Environment*, 781(2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146736>
- García-León, Á., Robledo-Torres, V., Mendoza-Villarreal, R., Ramírez-Godina, F., Valdez-Aguilar, L. A., y Gordillo-Melgoza, F. A. (2018). Producción de variedades tradicionales de tomate con acolchado en invernadero. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 303–308. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1439>
- García-Raya, P., Ruiz-Olmos, C., Marín-Guirao, J. I., Asensio-Grima, C., Tello-Marquina, J. C., & de Cara-García, M. (2019). Greenhouse soil biosolarization with tomato plant debris as a unique fertilizer for tomato crops. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ijerph16020279>
- Gaspar, L. (n.d.). *Nutrición Del Cultivo De Tomate Para Industria* (Issue 54).
- Gázquez, J. C., Pérez, C., Meca, D. E., Segura, M. D., Domene, M. A., De La Cruz, E., López, J. C., & Buendía, D. (2017). Comparative study of tomato production strategies for long-cycle crop in enarenado and for inter-planting in different substrates systems in the Mediterranean area. *Acta Horticulturae*, 1170, 773–776. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.98>
- Gong, H., Luo, H., Qi, Y., Pang, X., Wang, X., & Li, G. (2019). Effect of enhanced ammonium rate on growth and fertilizer use efficiency of greenhouse tomato in an annual succession cropping system. *Journal of Plant Nutrition*, 42(20), 2731–2744. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1656244>
- Gu, C., Zhang, S., Han, P., Hu, X., Xie, L., Li, Y., Brooks, M., Liao, X., & Qin, L. (2019). Soil enzyme activity in soils subjected to flooding and the effect on nitrogen and phosphorus uptake by oilseed rape. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00368>
- Hailegnaw, N. S., Mercl, F., Pračke, K., Száková, J., & Tlustoš, P. (2019). Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 19(5), 2405–2416. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02264-z>
- Haleema, B., Rab, A., Hussain, S. A., Sajid, M., Arif, M., Shah, S. T., Ullah, I., Miraj, G., Humaira, & Basit, A. (2020). Influence of calcium concentrations

and sources on the fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) at different storage conditions. *Fresenius Environmental Bulletin*, 29(3), 1866–1877.

- Hernández, M. I., Chailloux Laffita, M., Moreno Placeres, V., Igarza Sánchez, A., y Ojeda Veloz, A. (2014). Niveles referenciales de nutrientes en la solución del suelo para el diagnóstico nutricional en el cultivo protegido del tomate. *Idesia*, 32(2), 79–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000200011>
- Hinsinger, P. (2021). Potassium. In B. D. Fath & S. E. Jorgensen (Eds.), *Managing Global Resources and Universal Processes* (2nd ed., pp. 315–322). CRC Press (Taylor and Francis Group).
- Hu, Z., Li, J., Ding, S., Cheng, F., Li, X., Jiang, Y., Yu, J., Foyer, C. H., & Shi, K. (2021). The protein kinase CPK28 phosphorylates ascorbate peroxidase and enhances thermotolerance in tomato. *Plant Physiology*, 186(2), 1302–1317. <https://doi.org/10.1093/PLPHYS/KIAB120>
- Johnston, J. (2011). *Assessing soil fertility: the importance of soil analysis and its interpretation*.
- Komosa, A., Markiewicz, B., Kleiber, T., Mieloszyk, E., & Mieloch, M. (2020). Yield and nutrient status of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.) grown in new and re-used rockwool, polyurethane, nft and aeroponics. *Journal of Elementology*, 25(2), 523–536. <https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.3.1894>
- Kumaragamage, D., Amarawansa, G. S., Indraratne, S. P., Jayarathne, K., Flaten, D. N., Svomuya, F., & Akinremi, O. O. (2019). Degree of phosphorus saturation as a predictor of redox-induced phosphorus release from flooded soils to floodwater. *Journal of Environmental Quality*, 48, 1817–1825. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.04.0154>
- Kuśmierz, S., Skowrońska, M., Tkaczyk, P., Lipiński, W., & Mielniczuk, J. (2023). Soil organic carbon and mineral nitrogen contents in soils as affected by their pH, texture and fertilization. *Agronomy*, 13(1), 267. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010267>
- Labate, J. A., Grandillo, S., Fulton, T., Muños, S., Caicedo, A., Peralta, I., Ji, Y., Chetelat, R. T., Scott, J. W., Gonzalo, M. J., Francis, D., Yang, W., van der Knaap, E., Baldo, A., Smith-White, B., Mueller, L. A., Prince, J. P., Blanchard, N. E., Storey, D. B., ... Causse, M. (2007). Tomato. In C. Cole (Ed.), *Vegetables. Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants* (Vol. 5, pp. 1–125). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00015-5>

- Lal, M., Kathpalia, R., Sisodia, R., & Shakya, R. (2018). *Plant Physiology, Development and Metabolism*. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1\\_32](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_32)
- Lao, M., Jiménez, S., Eymar, E., & Fernández, E. (2004). Nutrient levels of the soil solution obtained by means of suction cups in intensive tomato cultivation. *Phyton (Buenos Aires)*, 73, 29–37.
- Lazcano-Bello, M. I., Sandoval-Castro, E., Tornero-Campante, M. A., Hernández-Hernández, B. N., Ocampo-Fletes, I., y Díaz-Ruíz, R. (2021). Evaluación de sustratos, solución nutritiva y enraizador en producción de plántulas de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(1), 77–88. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2450>
- Leana-Acevedo, J. L., Juárez-López, P., Palemón-Alberto, F., Sainz-Aispuro, M. de J., Alía-Tejacal, I., Avonce-Vergara, N., Damián-Nava, A., y Ortega-Acosta, S. Á. (2022). Competitividad agronómica de ecotipos nativos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivados en invernadero. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 8(1). <https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.0081017>
- Li, H., Li, Y., Xu, Y., & Lu, X. (2019). Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125471>
- Lince, L. A., Rodríguez, N., & Sadeghian, S. (2015). Disponibilidad de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^{+}$  en función de las propiedades del suelo, zona cafetera central de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 29. <https://doi.org/10.22490/21456453.1261>
- Linnaeus, C. (1753). *Species Plantarum*.
- Llenderal, A., García-Caparrós, P., Contreras, J. I., Segura, M. L., & Teresa Lao, M. (2019). Spatio-temporal variations in nutrient concentration in soil solution under greenhouse tomato. *Journal of Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1584219>
- Luckwill, L. C. (1943). The genus *Lycopersicon*: an historical, biological, and taxonomic survey of the wild and cultivated tomatoes. *Aberdeen University Studies*, 120, 1–44.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd Editio). Academic Press-ELSEVIER.
- Marschner, P. (2021). Processes in submerged soils – linking redox potential, soil organic matter turnover and plants to nutrient cycling. *Plant and Soil*, 464(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05040-6>

- Masud, M. M., Baquy, M. A. Al, Akhter, S., Sen, R., Barman, A., & Khatun, M. R. (2020). Liming effects of poultry litter derived biochar on soil acidity amelioration and maize growth. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202(February), 110865. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110865>
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal* (4ta ed.). Instituto Internacional de la Potasa.
- Monge-Pérez, J. E., y Loría-Coto, M. (2021). Determinación de criterios de selección para el rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado bajo invernadero. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 25(1), 7–19.
- Murillo-Amador, B., Borrego-Escalante, F., & Troyo-Diequez, E. (2000). Physiological characteristics and yield of eight tomato cultivars under experimental greenhouse conditions. *Phyton Int J Exp Bot Arg*, 66(January), 107–117.
- Narváez-Ortiz, W. A., Morales-Díaz, A. B., Benavides-Mendoza, A., & Reyes-Valdés, M. H. (2015). Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12, 2383. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i12.769>
- Neina, D. (2019). The role of soil ph in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Nommik, H., & Vahtras, K. (1982). Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils. *Nitrogen in Agricultural Soils*, 22, 123–171. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr22.c4>
- Panda, S., Busatto, N., Hussain, K., & Kamble, A. (2019). Piriformospora indica-primed transcriptional reprogramming induces defense response against early blight in tomato. *Scientia Horticulturae*, 255(January), 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.031>
- Panzardi, C. A., Quiroz, N. C., y Erkia, S. (2020). Recuperación de Suelos Sódicos. *Agrotecnia*, 29(1), 73–76. <https://doi.org/10.30972/agr.0294523>
- Pathak, J., Ahmed, H., Kumari, N., Pandey, A., Rajneesh, & Sinha, R. P. (2020). Role of calcium and potassium in amelioration of environmental stress in plants. *Protective Chemical Agents in the Amelioration of Plant Abiotic Stress*, 535–562. <https://doi.org/10.1002/9781119552154.ch27>
- Pepper, I. ., & Brusseau, M. L. (2019). Physical-chemical characteristics of soils

- and the subsurface. In *Environmental and Pollution Science* (3rd ed., pp. 9–22). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814719-1.00002-1>
- Peralta, I. E., & Spooner, D. M. (2007). History, origin and early cultivation of tomato (*Solanaceae*). In M. K. Razdan & A. K. Mattoo (Eds.), *Genetic Improvement of Solanaceous Crops Volume 2: Tomato* (Vol. 2, pp. 1–24). Science Publishers.
- Raddatz, N., Morales de los Ríos, L., Lindahl, M., Quintero, F. J., & Pardo, J. M. (2020). Coordinated transport of nitrate, potassium, and sodium. *Frontiers in Plant Science*, 11(March), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00247>
- Rodríguez-Delgado, I., Pérez-Iglesias, H. I., & García-Bautista, R. M. (2022). Comportamiento de algunas propiedades químicas de un suelo inceptisol en los cultivos de maíz y cacao. *Revista Científica Groecosistemas*, 10(2), 44–50.
- Sánchez-González, M. J., Sánchez-Guerrero, M. C., Medrano, E., Porras, M. E., Baeza, E. J., García, M. L., & Lorenzo, P. (2014). Efectos de la salinidad y el enriquecimiento carbónico en invernadero sobre la bioproductividad y el contenido de nutrientes en un cultivo de tomate híbrido Raf (cv. Delizia). *Actas de Horticultura*, 66(2014), 78–84.
- Sánchez del Castillo, F., Cabañas Díaz, A., Pineda Pineda, J., González Molina, L., y Moreno Pérez, E. del C. (2021). Evaluación de métodos de recirculación de solución nutritiva para la producción de jitomate en ciclos cortos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 433–445. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i3.2419>
- Schwab, P. (2012). Soil Solution. In P. Ming Huang, Y. Li, & M. E. Summer (Eds.), *Hand Book of Soil Sciences Properties and Processes* (2nd ed., p. 1427). CRC Press (Taylor and Francis Group).
- Segura, M. L., y Contreras, J. I. (2015). *Fertilización adaptada a las necesidades del cultivo: curvas de absorción de nutrientes*. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.
- Seifikalhor, M., Aliniaefard, S., Shomali, A., Azad, N., Hassani, B., Lastochkina, O., & Li, T. (2019). Calcium signaling and salt tolerance are diversely entwined in plants. *Plant Signaling and Behavior*, 14(11), 1–15. <https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1665455>
- SIAP. (2022a). *Panorama Agroalimentario 2022*. <https://drive.google.com/file/d/1jVWS4EFKK7HGwQOBpGeljUyaDT8X8lyz/view>

- SIAP. (2022b). *Producción Agrícola Nacional-Tomate*. [https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/](https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/)
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134–154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Strawn, D. G., Bohn, H. L., & O'Connor, G. A. (2020). *Soil Chemistry* (5ta ed., Vol. 13, Issue 1). Jhon Wiley & Sons.
- Thor, K., Jiang, S., Michard, E., George, J., Scherzer, S., Huang, S., Dindas, J., Derbyshire, P., Leitão, N., DeFalco, T. A., Köster, P., Hunter, K., Kimura, S., Gronnier, J., Stransfeld, L., Kadota, Y., Bücherl, C. A., Charpentier, M., Wrzaczek, M., ... Zipfel, C. (2020). The calcium-permeable channel OSCA1.3 regulates plant stomatal immunity. *Nature*, 585(7826), 569–573. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2702-1>
- Toýmurodovna, A. H., & Ibrohimovna, U. G. (2022). Soil composition and its effects on fertility in Romitan. *Web of Scientist: International Scientific Research Journal*, 3(1), 701–704.
- Toledo, V. M., y Barrera-Bassols, N. (2020). La milpa y la memoria biocultural de mesoamérica. In M. V. Camejo Pereira & F. Kessler Dal Soglio (Eds.), *A conservação das sementes crioulas: uma visão interdisciplinar da agrobiodiversidade* (pp. 61–81). PGDR, Universidade Federal do Rio Grande.
- Torres, J., Gutierrez, J. A., y Beltran, H. A. (2017). Compactación , Una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Revista de La Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 3(3), 18–22.
- Tournefort, J. P. D. (1694). *Elements de Botanique*. In *l'Imprimerie royale*.
- Vazquez, H., Díaz, B., Díaz, B., Manuel, J., Romero, C., & Arbeu, B. (2014). Rentabilidad de la producción de jitomate silvestre orgánico (*Solanum Lycopersicum L.*). *Revista Mexicana de Agronegocios*, 34, 773–783.
- Wang, R., Shi, W., Kronzucker, H. J., & Li, Y. (2023). Oxygenation promotes vegetable growth by enhancing P nutrient availability and facilitating a stable soil bacteria community in compacted soil. *Soil and Tillage Research*, 230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105686>
- Xiaohui, F., Kai, G., Ce, Y., Jinsong, L., Huanyu, C., & Xiaojing, L. (2019). Growth and fruit production of tomato grafted onto wolfberry (*Lycium chinense*)



- rootstock in saline soil. *Scientia Horticulturae*, 255(May), 298–305.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.028>
- Xiong, T., Tan, Q., Li, S., Mazars, C., Galaud, J. P., & Zhu, X. (2021). Interactions between calcium and ABA signaling pathways in the regulation of fruit ripening. *Journal of Plant Physiology*, 256(483).  
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153309>
- Yansheng, C., Fengliang, Z., Zhongyi, Z., Tongbin, Z., & Huayun, X. (2020). Biotic and abiotic nitrogen immobilization in soil incorporated with crop residue. *Soil and Tillage Research*, 202(March).  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104664>
- Zhang, Z., Cao, B., Chen, Z., & Xu, K. (2022). Grafting enhances the photosynthesis and nitrogen absorption of tomato plants under low-nitrogen stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(4), 1714–1725.  
<https://doi.org/10.1007/s00344-021-10414-2>
- Zhang, Z., Cao, B., Gao, S., & Xu, K. (2019). Grafting improves tomato drought tolerance through enhancing photosynthetic capacity and reducing ROS accumulation. *Protoplasma*, 256(2019), 1013–1024.