



RELACIÓN K^+/Ca^{2+} EN LA NUTRICIÓN MINERAL DE PEPINO PERSA

K^+/Ca^{2+} RATIO IN PERSIAN CUCUMBER MINERAL NUTRITION

Deni Ramos-Aguirre¹, Gelacio Alejo-Santiago¹, Circe Aidín Aburto-González^{1*}, Elizabeth Urbina-Sánchez², Cecilia Rocío Juárez-Rosete¹ y Eduardo Salcedo-Pérez³

¹Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Agricultura, Xalisco, Nayarit, México. ²Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Tenancingo, Tenancingo, Estado de México, México. ³Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Zapopan, Jalisco, México.

*Autor de correspondencia (circe.aburto@uan.edu.mx)

RESUMEN

El equilibrio entre potasio (K^+) y calcio (Ca^{2+}) en la solución nutritiva es determinante para el crecimiento, rendimiento y calidad de fruto en cultivos hortícolas establecidos en sistemas hidropónicos. En pepino Persa (*Cucumis sativus* L.), el desbalance catiónico entre estos elementos puede inducir alteraciones fisiológicas que afectan tanto el desarrollo vegetativo como la formación de frutos comerciales. En el presente estudio se evaluaron cinco relaciones K^+/Ca^{2+} : 0.45, 0.77, 1.28, 2.20 y 4.33 meq L^{-1} en plantas de pepino Persa cultivadas en invernadero, con el objetivo de determinar el efecto de dichas relaciones sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de fruto. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con 10 repeticiones. Se midieron variables de crecimiento como altura de planta y diámetro de tallo, rendimiento, número de frutos y producción, así como calidad, longitud, diámetro, peso fresco, volumen y sólidos solubles totales. Las relaciones intermedias (0.45-2.20 meq L^{-1}) promovieron mayor vigor vegetativo y aumento en rendimiento, mientras que la relación 4.33 meq L^{-1} redujo la absorción de Ca^{2+} , disminuyó la producción en más del 50 % e incrementó signos de deficiencia nutrimental. La relación 2.20 produjo los frutos de mayor tamaño y concentración de sólidos solubles, hasta 4.08 °Brix. Los resultados confirmaron que mantener un balance adecuado entre K^+ y Ca^{2+} es indispensable para evitar desórdenes fisiológicos y maximizar la productividad y calidad del fruto en sistemas hidropónicos de pepino Persa. Estos hallazgos permiten orientar recomendaciones nutrimentales para la agricultura protegida.

Palabras clave: *Cucumis sativus* L., agricultura protegida, hidroponía, nutrición mineral, potasio/calcio.

SUMMARY

Balance between potassium (K^+) and calcium (Ca^{2+}) in the nutrient solution is critical for growth, yield and fruit quality in horticultural crops grown under hydroponic systems. In Persian cucumber (*Cucumis sativus* L.), cation imbalance between these elements can induce physiological alterations that affect both vegetative development and marketable fruits formation. In this study five K^+/Ca^{2+} ratios: 0.45, 0.77, 1.28, 2.20 and 4.33 meq L^{-1} were evaluated in Persian cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants grown in greenhouse, with the objective of identifying the effect of those ratios that optimizes plant growth, yield and fruit quality. The experiment was established under a completely randomized design with 10 replicates. Growth traits such as plant height, stem diameter, yield, number of fruits and production, as

well as fruit quality attributes, length, diameter, fresh weight, volume and total soluble solids were measured. Intermediate ratios (0.45-2.20 meq L^{-1}) promoted greater vegetative vigor and yield increase, while the 4.33 meq L^{-1} ratio reduced Ca^{2+} absorption, decreased yield by more than 50 %, and intensified symptoms of nutrient deficiency. The ratio 2.20 produced fruits with the largest size and highest soluble solids content, up to 4.08 °Brix. Results confirmed that maintaining an adequate K^+/Ca^{2+} balance is essential to prevent physiological disorders and to maximize productivity and fruit quality of Persian cucumber in hydroponic systems. These findings provide guidance on nutritional recommendations for protected agriculture.

Index words: *Cucumis sativus* L., hydroponics, mineral nutrition, potassium/calcium, protected agriculture.

INTRODUCCIÓN

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es un cultivo de gran importancia en la economía mundial, su producción y consumo se distribuyen ampliamente en diversas regiones, siendo una de las hortalizas más producidas a nivel global, con una producción que supera los 90 millones de toneladas anuales (FAO, 2023), lo que refleja su relevancia en los sistemas hortícolas intensivos. Los híbridos de pepino tipo Persa o Beit Alpha se han adaptado ampliamente en sistemas protegidos de regiones cálidas, donde muestran buen comportamiento productivo bajo temperaturas relativamente elevadas, particularmente cuando se combina con prácticas como el uso de invernaderos, acolchado o injerto en portainjertos vigorosos (Lee *et al.*, 2010; Schwarz *et al.*, 2010), lo que los convierte en una opción viable para su producción en invernaderos de mediana tecnología.

La nutrición mineral es muy importante en el manejo de los cultivos hidropónicos (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012). En particular, la relación entre potasio (K^+) y calcio (Ca^{2+}) tiene un papel fundamental en la fisiología de las plantas hortícolas, ya que ambos cationes participan

en procesos asociados con la absorción nutrimental, la expansión celular y el desarrollo de frutos. Los elementos más importantes en el rendimiento y la calidad del fruto son el potasio, el calcio y el magnesio (Peralta *et al.*, 2023). Una relación adecuada entre estos dos elementos puede incrementar el rendimiento e incluso reducir el estrés salino en cultivos como el tomate (*Solanum lycopersicum*) (De Oliveira *et al.*, 2021); no obstante, la relación óptima entre K^+ y Ca^{2+} varía entre especies y condiciones de cultivo; en tomate, por ejemplo, se ha reportado que relaciones K^+/Ca^{2+} cercanas a 0.82-0.85 meq L^{-1} favorecen el rendimiento en el cultivar Clermont (Hernández-Pérez *et al.*, 2019), mientras que otros estudios han encontrado respuestas óptimas en intervalos de 0.54 a 0.64 meq L^{-1} bajo condiciones de invernadero (Salas-Rivera *et al.*, 2020). De manera similar, en pepino cultivado en sistemas sin suelo se ha observado que el equilibrio entre estos cationes en la solución nutritiva influye en la absorción nutrimental y en la productividad del cultivo (Sarro *et al.*, 1994). En este sentido, Sánchez-del-Castillo *et al.* (2024) señalaron que una relación elevada K^+/Ca^{2+} puede afectar negativamente la absorción de Ca^{2+} y comprometer la calidad del fruto, y que no existe una relación universal óptima entre estos nutrimentos, ya que su efecto depende del cultivo, del genotipo y de las condiciones de manejo.

El potasio es un nutrimento esencial para el rendimiento y la calidad del fruto en diversos cultivos hortícolas; sin embargo, su manejo debe mantenerse en equilibrio con el calcio y otros elementos minerales. Un suministro excesivo de K^+ , sin un balance adecuado con otros cationes, puede afectar negativamente la calidad del fruto y la absorción de calcio (Song *et al.*, 2025). Por otra parte, la deficiencia de este nutrimento provoca síntomas rápidos en las plantas debido a su alta demanda metabólica, lo que repercute negativamente en el crecimiento y el rendimiento del cultivo. En general, el papel del potasio en la calidad del fruto ha sido ampliamente documentado, ya que participa en procesos fisiológicos relacionados con el transporte de fotoasimilados y la regulación osmótica (Wan *et al.*, 2024).

El potasio (K^+) es uno de los macronutrimentos más importantes para el crecimiento, la productividad y la calidad del fruto en cultivos hortícolas, especialmente en sistemas hidropónicos. Este catión participa en diversos procesos fisiológicos, entre ellos la regulación osmótica, el mantenimiento del potencial hídrico celular y el funcionamiento estomático (Johnson *et al.*, 2022); además, interviene en la activación de numerosas enzimas relacionadas con la fotosíntesis, la síntesis de carbohidratos y el transporte de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos (Sardans y Peñuelas, 2021; White, 2012). Una adecuada disponibilidad de K^+ favorece la expansión celular, el llenado del fruto y el rendimiento del

cultivo; en contraste, su deficiencia o desbalance con otros cationes como Ca^{2+} o Mg^{2+} puede afectar negativamente la calidad del fruto y la tolerancia al estrés abiótico (Wan *et al.*, 2024).

El calcio (Ca^{2+}) desempeña un papel fundamental en la fisiología vegetal y su adecuada disponibilidad es determinante para el crecimiento y la calidad del fruto en sistemas hidropónicos. Este nutrimento cumple funciones estructurales importantes, ya que contribuye a la estabilidad de la pared celular y a la integridad de las membranas (White y Broadley, 2003); además, el Ca^{2+} participa en el mantenimiento del equilibrio iónico de los tejidos y actúa como segundo mensajero en diversos procesos de señalización relacionados con el crecimiento, la diferenciación celular y la respuesta al estrés ambiental (Wang *et al.*, 2023).

Esta doble función estructural y señalizadora convierte al calcio en un nutrimento clave, cuya interacción con otros cationes, como el potasio, influye directamente en la firmeza, el desarrollo del fruto y la prevención de desórdenes fisiológicos asociados con deficiencias de Ca (Ho y White, 2005; White y Broadley, 2003).

Debido a estas funciones, el potasio constituye un elemento clave en el manejo nutrimental de cultivos en hidroponía y su relación con Ca^{2+} es determinante para mantener el rendimiento y la calidad del fruto. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de diferentes relaciones K^+/Ca^{2+} en la solución nutritiva sobre el crecimiento, el rendimiento y la calidad del fruto de pepino Persa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

La presente investigación se desarrolló en los meses de abril, mayo y junio de 2022 en la Universidad Autónoma de Nayarit en Tepic, Nayarit, México, ubicada en las coordenadas 21° 29' 19.1" N y 104° 53' 23.8" O, en un invernadero tipo capilla con ventilación doble cenital, utilizando una superficie de 60 m².

Material vegetal

Se utilizó pepino Persa cv. Khassib RZ F₁ de la empresa Rijk Zwaan, de planta abierta, muy precoz y fácil de trabajar en los brotes laterales, con buen equilibrio y balance. Presenta multifruto con dos o tres frutos por entrenudo, de muy buena forma, de color verde oscuro y excelente vida de anaquel.

Manejo del cultivo

El sistema hidropónico consistió en bolsas de polietileno color negro, calibre 400, de 15 L de capacidad. En el fondo se colocó una capa de un volumen de 2 L de tezontle rojo con tamaño de partícula de diámetro ≤ 1.0 cm y una capa de un volumen de 12 L de mezcla tezontle rojo con el mismo diámetro y fibra de coco, en una proporción 20:80, respectivamente. La siembra se realizó de manera directa colocando dos semillas por maceta, y la conducción de las plantas fue a un solo tallo, se dejó una sola planta por maceta, y se realizó poda de brotes laterales cada tercer día hasta que alcanzaron una altura de 1.75 m.

Las soluciones nutritivas utilizadas se formularon a partir de la solución universal de Steiner, modificando las concentraciones de K^+ y Ca^{2+} para establecer las diferentes relaciones K^+/Ca^{2+} evaluadas en el experimento. La concentración total de cationes se mantuvo constante con el fin de conservar el equilibrio iónico de la solución nutritiva y asegurar que el único factor de variación correspondiera a la relación entre estos dos nutrientes. La concentración de nitratos se ajustó a 15 meq L^{-1} , ligeramente superior a la propuesta en la solución universal de Steiner la cual indica 12 meq L^{-1} (Steiner, 1961), con el propósito de satisfacer la elevada demanda de nitrógeno del cultivo bajo condiciones de producción intensiva en hidroponía (Cuadro 1).

En los primeros seis días después de emergencia (DDE) se empleó riego con agua acidulada, a los cinco DDE se utilizó solución nutritiva diluida al 25 % y empleando un volumen de riego de 1 L d^{-1} por planta. Posteriormente, al aparecer las primeras dos hojas verdaderas, del día 10 al 15 DDE la concentración de la solución nutritiva fue al 50 % de su composición. A partir del día 16 DDE se inició con la aplicación de los tratamientos K^+/Ca^{2+} , hasta la cosecha. Cada semana se realizó la determinación de pH y CE en el lixiviado de cada planta como parte del seguimiento nutricional, para prevenir acumulación de sales.

El ciclo de cultivo tuvo una duración de 91 días. Se realizaron labores culturales para prevención de enfermedades.

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron cinco relaciones K^+/Ca^{2+} en la solución nutritiva, formuladas a partir de la solución universal de Steiner (1961) (Cuadro 2). La relación K^+/Ca^{2+} de 0.77, correspondiente a la proporción original propuesta por Steiner, se consideró como tratamiento testigo, mientras que las demás relaciones se obtuvieron mediante la modificación de las concentraciones de estos cationes. Cada tratamiento tuvo 10 repeticiones acomodadas en un diseño experimental completamente al azar, la unidad experimental fue una planta individual.

Cuadro 1. Solución Steiner (1961) modificada.

Días después de la emergencia	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}
	meq L^{-1}					
5 - 9 (SN 25 %)	1.75	2.25	1.00	3.75	0.25	1.00
10 - 15 (SN 50 %)	3.50	4.50	2.00	7.50	0.50	2.00

SN: solución nutritiva.

Cuadro 2. Tratamientos para evaluar el efecto de la relación K^+/Ca^{2+} en el cultivo de pepino Persa.

Tratamiento †Relación K^+/Ca^{2+}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}
	meq L^{-1}					
0.77	7	9	4	15	1	4
0.45	5	11	4	15	1	4
1.28	9	7	4	15	1	4
2.20	11	5	4	15	1	4
4.33	13	3	4	15	1	4

†La relación K^+/Ca^{2+} es en términos de miliequivalentes químicos por litro.

Variables respuesta

Se evaluaron variables de crecimiento, rendimiento y calidad de fruto. Las variables de crecimiento fueron altura de planta (cm) y diámetro de tallo (mm), las cuales se registraron al final del ciclo del cultivo (91 días después de la siembra) utilizando una cinta métrica y un vernier digital (Modelo CALDI-6MP, Truper®, México). El rendimiento se determinó mediante el número total de frutos por planta y el rendimiento por planta (g) se obtuvo mediante la suma del peso fresco de los frutos cosechados durante todo el periodo de cosecha, se utilizó una báscula digital (Modelo BJ4100C, Precisa Instruments, Dietikon, Suiza).

Las variables de calidad de fruto incluyeron longitud (cm) y diámetro de fruto (cm) se midieron con un vernier digital, peso fresco (g) se determinó con una báscula digital, volumen de fruto (cm³) se estimó mediante desplazamiento de agua en una probeta graduada, peso específico se calculó como la relación entre peso fresco y volumen del fruto (g cm⁻³), firmeza de fruto, se midió con un penetrómetro digital (FT-327, QA Supplies®, Norfolk, Virginia, EUA), sólidos solubles totales (°Brix) fueron determinados con un refractómetro digital (Modelo PAL-1, ATAGO®, Tokio, Japón), pH medido con un potenciómetro (Modelo HI2211 Hanna®, Rhode Island, EUA), y pérdida de peso de fruto (%) calculada como la diferencia porcentual entre el peso inicial y final del fruto durante el periodo de almacenamiento que fue de 14 días en condiciones de 10 ± 1 °C y 90-95 % de humedad relativa durante 14 días, con evaluaciones cada tres días.

Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey (α = 0.05) con el software SAS 9.4 (SAS Institute, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza mostró efectos significativos de los tratamientos en el número total de frutos, producción por planta, altura y diámetro de planta, así como en materia seca total acumulada (Cuadro 3).

Las relaciones K⁺/Ca²⁺ de 0.45, 0.77, 1.28 y 2.20 meq L⁻¹ mantuvieron valores similares en el número de frutos y rendimiento por planta. Aunque la relación 1.28 meq L⁻¹ presentó los mayores promedios en ambas variables, esta no difirió estadísticamente de las relaciones 0.45, 0.77 y 2.20. En contraste, la relación 4.33 meq L⁻¹ redujo el número de frutos y el rendimiento por planta, con disminuciones de 56 y 52.45 %, respectivamente (Cuadro 4).

En cuanto al crecimiento, las relaciones 0.45, 1.28 y 2.20 meq L⁻¹ promovieron mayor altura de planta, mientras que la relación 4.33 meq L⁻¹ redujo esta variable en 16 %, lo que confirma que el exceso de K⁺ limita la absorción de Ca²⁺ tal como sucede en tomate (Bakr *et al.*, 2023).

Las relaciones K⁺/Ca²⁺ entre 0.45 y 2.20 meq L⁻¹ mantuvieron un desempeño productivo estadísticamente similar, lo que sugiere que este intervalo de relaciones proporciona un equilibrio nutrimental adecuado para el cultivo de pepino Persa. Estos resultados coinciden con lo reportado por Bar-Tal y Pressman (1996), quienes observaron que relaciones K⁺/Ca²⁺ cercanas a 2.20 meq L⁻¹ favorecieron el crecimiento del tomate; sin embargo, el rango óptimo de la relación K⁺/Ca²⁺ difirió entre ambos estudios, lo cual puede atribuirse a diferencias entre especies, cultivares y condiciones de cultivo. En este sentido, Salas-Rivera *et al.* (2020) reportaron valores óptimos de rendimiento en tomate con relaciones menores (0.54-0.82 meq L⁻¹), lo que confirma que la relación K⁺/Ca²⁺ óptima depende del cultivo y del intervalo de concentraciones evaluado.

Cuadro 3. Probabilidad de significancia en la prueba de F del análisis de varianza y coeficientes de variación para las variables respuesta evaluadas en plantas de pepino Persa cultivados en soluciones nutritivas con diferentes relaciones K⁺/Ca²⁺.

Variable de respuesta	Pr > F	C.V. (%)
Número total de frutos	0.0002 **	25.69
Producción por planta (g)	0.0001 **	24.29
Altura de planta (cm)	0.0001 **	3.34
Diámetro de tallo (mm)	0.0058 **	7.42
Materia seca total acumulada (g)	0.0038 **	17.59

**Significancia estadística (altamente significativas), C.V.: coeficiente de variación.

Cuadro 4. Comparación de medias Tukey de las variables en pepino Persa cultivado en soluciones nutritivas con diferentes relaciones K⁺/Ca²⁺.

Tratamiento (Relación K ⁺ /Ca ²⁺)	Número total de frutos	Producción por planta (g)	Altura (cm)
T1: 0.77	13.50 a	2206.71 a	171.30 c
T2: 0.45	13.90 a	2273.30 a	179.00 ab
T3: 1.28	14.50 a	2423.31 a	183.40 a
T4: 2.2	11.44 ab	1934.80 a	174.33 ab
T5: 4.33	7.77 b	1152.42 b	154.11 d
DSH	4.1226	637.63	7.5228

Medias con letras iguales en columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$); DSH: diferencia significativa honesta.

Entre los dos nutrimentos evaluados (K⁺ y Ca²⁺), los resultados sugieren que el potasio tuvo una mayor influencia en la producción del cultivo, mientras que el calcio desempeñó un papel fundamental en la calidad del fruto. Un incremento en la concentración de K⁺ favoreció el crecimiento y la producción, pero relaciones elevadas K⁺/Ca²⁺, como 4.33 meq L⁻¹, provocaron un desbalance iónico que limitó la absorción de Ca²⁺ y redujo significativamente el desempeño del cultivo.

Este comportamiento se puede explicar por la competencia entre cationes durante la absorción radical, donde concentraciones altas de K⁺ pueden inhibir la absorción de Ca²⁺, afectando procesos fisiológicos asociados con la estabilidad de membranas, la firmeza del fruto y la integridad celular (Sardans y Peñuelas, 2021; White, 2012). En este sentido, los resultados obtenidos confirman que un balance adecuado entre K⁺ y Ca²⁺ resulta determinante para optimizar simultáneamente el rendimiento y la calidad del fruto en sistemas hidropónicos.

El mayor diámetro de tallo se registró en las plantas correspondientes a las relaciones K⁺/Ca²⁺ de 0.77, 0.45 y 1.28 meq L⁻¹. En particular, la relación 1.28 meq L⁻¹ mostró un incremento significativo respecto a los tratamientos 2.20 y 4.33 meq L⁻¹, superándolos en 10.49 y 9.75 %, respectivamente. Asimismo, la materia seca total acumulada mostró una reducción numérica bajo la solución nutritiva con relación K⁺/Ca²⁺ de 4.33 meq L⁻¹, lo que indica que el desbalance catiónico desfavoreció el crecimiento vegetativo (Cuadro 5).

Las relaciones K⁺/Ca²⁺ de 2.20 y 4.33 meq L⁻¹ redujeron significativamente el diámetro de tallo, lo que sugiere que la menor disponibilidad de Ca²⁺ afectó la formación y estabilidad de la pared celular. Este comportamiento coincide con lo reportado por Bakr *et al.* (2023) y Hernández-Pérez *et al.* (2019), quienes señalaron que un exceso de K⁺ limita la absorción de Ca²⁺ por competencia entre cationes, reduciendo la integridad estructural de los tejidos jóvenes; asimismo, Bar-Tal y Pressman (1996)

Cuadro 5. Comparación de medias de las variables en plantas de pepino Persa cultivadas en soluciones nutritivas con diferentes relaciones K⁺/Ca²⁺.

Relación K ⁺ /Ca ²⁺	Diámetro de tallo (mm)	Materia seca total acumulada por planta (g)
T1: 0.77	12.40 ab	176.57 a
T2: 0.45	12.69 ab	190.50 a
T3: 1.28	13.43 a	183.37 a
T4: 2.2	12.02 b	166.47 a
T5: 4.33	12.12 b	79.37 b
DSH	1.20	75.31

Medias con letras iguales en columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). DSH: diferencia significativa honesta.

demostraron que una mayor disponibilidad de Ca favorece su acumulación en los tejidos vegetales, lo que resalta la importancia de mantener un equilibrio adecuado entre ambos nutrimentos.

El calcio desempeña un papel fundamental en el fortalecimiento estructural de tallos y órganos de rápido crecimiento, debido a su función en la estabilidad de la pared celular y en la integridad de las membranas (Ho y White, 2005; White y Broadley, 2003). En cuanto a la acumulación de materia seca, se observaron diferencias significativas entre tratamientos, la relación 4.33 K⁺/Ca²⁺ meq L⁻¹ registró la menor acumulación de MS, 41.66 % menor respecto al tratamiento 0.45 meq L⁻¹, lo que indica que el desbalance catiónico extremo redujo la capacidad de la planta para generar biomasa.

En cuanto a las variables de calidad de fruto, el análisis de varianza indicó diferencias altamente significativas en longitud, diámetro, peso fresco y volumen de fruto, así como en sólidos solubles totales (Cuadro 6). En contraste, no se detectaron diferencias significativas en el peso específico, el pH del fruto ni en la pérdida de peso del fruto.

Las relaciones K⁺/Ca²⁺ de 0.77, 0.45, 1.28 y 2.20 meq L⁻¹ promovieron los mayores valores de longitud, diámetro, peso fresco y volumen; en contraste, la relación K⁺/Ca²⁺ de 4.33 meq L⁻¹ ocasionó reducciones marcadas en estas variables, disminuyendo la longitud en 23.4 %, el peso fresco en 42.3 % y el volumen en 41.4 %. Respecto a los sólidos solubles totales, las relaciones 1.28, 2.20 y 4.33

meq L⁻¹ registraron los valores más elevados, mientras que las relaciones 0.45 y 0.77 meq L⁻¹ presentaron los valores más bajos (Cuadro 7). Aunque la relación 4.33 meq L⁻¹ presentó valores altos de sólidos solubles, este tratamiento redujo significativamente el rendimiento y el crecimiento, por lo que no se considera agrónomicamente favorable.

La solución nutritiva con relación K⁺/Ca²⁺ 4.33 meq L⁻¹, cuya concentración de Ca²⁺ en la solución nutritiva es más baja, redujo la longitud de fruto, peso fresco y volumen de fruto significativamente, lo que indica que esta relación K⁺/Ca²⁺ afecta negativamente muchas de las propiedades atribuidas a calidad de fruto. Algo similar reportaron Escorcia-Luna *et al.* (2020), ya que en variedades de fresa (*Fragaria × ananassa*) encontraron que relaciones K⁺/Ca²⁺ de 0.77 y 0.51 meq L⁻¹ afectaron negativamente la calidad postcosecha.

La relación K⁺/Ca²⁺ de 0.77 meq L⁻¹ presentó el menor contenido de sólidos solubles totales, lo que sugiere que una menor disponibilidad de potasio limita la acumulación de azúcares en el fruto. Este comportamiento concuerda con la función del K⁺ en la traslocación de fotoasimilados desde las hojas hacia los órganos de almacenamiento (Sardans y Peñuelas, 2021). En contraste, las relaciones de 1.28, 2.20 y 4.33 meq L⁻¹ presentaron los valores más altos; sin embargo, este incremento no necesariamente se traduce en una mejor calidad comercial en pepino. De acuerdo con Chacón-Padilla y Monge-Pérez (2020), los frutos de calidad presentan contenidos de 2.5 a 5.0 °Brix,

Cuadro 6. Resultados del análisis de varianza para las variables de respuesta evaluadas en fruto de pepino Persa cultivado en soluciones nutritivas con diferentes relaciones K⁺/Ca²⁺.

Variable de respuesta	Pr > F	C.V. (%)
Longitud de fruto (cm)	0.0001 **	8.53
Diámetro de fruto (cm)	0.0061 **	6.61
Peso fresco de fruto (g)	0.0001 **	17.38
Volumen de fruto (cm ³)	0.0003 **	17.97
Peso específico de fruto (g cm ⁻³)	0.9373 NS	15.11
Firmeza de fruto (N)	0.5854 NS	14.65
Sólidos solubles totales (°Brix)	0.0010 **	6.54
pH	0.0808 NS	1.88
Pérdida de peso de fruto (%)	0.0531 NS	15.56

NS: diferencia no significativa (Tukey, P > 0.05), **: diferencia significativa (Tukey, P ≤ 0.01). C.V.: coeficiente de variación.

Cuadro 7. Comparación de medias de las variables en fruto pepino Persa cultivado en soluciones nutritivas con diferentes relaciones K^+/Ca^{2+} .

Tratamiento: Relación K^+/Ca^{2+}	Longitud de fruto (cm)	Diámetro de fruto (cm)	Peso fresco (g)	Volumen de fruto (cm ³)	SST (°Brix)
T1: 0.77	16.35 a	3.69 ab	151.49 a	157.86 a	3.27 b
T2: 0.45	16.88 a	3.73 ab	158.56 a	161.43 a	3.60 ab
T3: 1.28	16.92 a	3.81 a	163.81 a	165.71 a	3.86 a
T4: 2.20	17.47 a	3.96 a	181.03 a	182.86 a	4.08 a
T5: 4.33	13.38 b	3.42 a	104.37 b	107.14 b	4.12 a
DSH	2.14	3.82	40.92	43.19	0.54

Medias con letras iguales en columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$); DSH: diferencia significativa honesta, SST: sólidos solubles totales.

con un intervalo óptimo de 3.0 a 3.6 °Brix; los valores elevados deben interpretarse con cautela, ya que en esta hortaliza la calidad se asocia principalmente con atributos como firmeza, tamaño y apariencia, más que con el contenido de azúcares.

Adicionalmente, las relaciones K^+/Ca^{2+} de 2.20 y 4.33 implicaron concentraciones de K^+ superiores a 9 meq L⁻¹ y de Ca por debajo de 7 meq L⁻¹, fuera de los intervalos establecidos por la solución universal de Steiner (1961). Este desbalance catiónico podría estar asociado con la disminución observada en crecimiento y rendimiento, aun cuando se registraron valores elevados de sólidos solubles. Los resultados de la presente investigación concuerdan con lo reportado por Salas-Rivera *et al.* (2020), quienes indicaron que las relaciones K^+/Ca^{2+} de 0.64 y 0.78 meq L⁻¹ redujeron los sólidos solubles totales en tomate.

CONCLUSIONES

La relación K^+/Ca^{2+} en la solución nutritiva constituye un factor determinante para optimizar el crecimiento, el rendimiento y la calidad del fruto de pepino Persa en hidroponía. Las relaciones comprendidas entre 0.45 y 2.20 meq L⁻¹ inducen un desempeño productivo estadísticamente similar, lo que indica que este intervalo proporciona un adecuado equilibrio nutrimental para el cultivo. En contraste, relaciones elevadas provocan un desbalance entre K^+ y Ca^{2+} que afecta negativamente el crecimiento, el rendimiento y algunos atributos de calidad del fruto. Estos resultados evidencian la importancia de mantener un balance adecuado entre ambos nutrimentos para diseñar programas de fertirrigación orientados a maximizar la productividad del pepino Persa en condiciones de agricultura protegida.

BIBLIOGRAFÍA

- Bakr A. A. E. M. A., K. G. Abdelrasheed and A. M. El Mahdy (2023) Effect of calcium–potassium equilibrium on tomato plants grown hydroponically. *New Valley Journal of Agricultural Science* 3:823-832, <https://doi.org/10.21608/nvjas.2023.210421.1206>
- Bar-Tal A. and E. Pressman (1996) Root restriction and potassium and calcium solution concentrations affect dry-matter production, cation uptake, and blossom-end rot in greenhouse tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 121:649-655, <https://doi.org/10.21273/JASHS.121.4.649>
- Chacón-Padilla K. y J. E. Monge-Pérez (2020) Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero: comparación entre tipos de pepino. *Revista Tecnología en Marcha* 33:17-35, <https://doi.org/10.18845/tm.v33i1.5018>
- De Oliveira F. A., F. I. G. Paiva, J. F. De Medeiros, M. R. S. Melo, M. K. T. de Oliveira and R. C. P. da Silvas (2021) Salinity tolerance of tomato fertigated with different K^+/Ca^{2+} proportions in protected environment. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering* 25:620-625, <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n9p620-625>
- Escorcia-Luna A., R. Bugarín-Montoya, G. Luna-Esquivel, G. Alejo-Santiago, C. R. Juárez R., G. Calderón-Zavala and P. Sánchez-García (2020) Concentration of K^+ , Ca^{2+} and NH_4^+ on yield, fruit quality and vegetative sprouting of four cultivars of strawberry. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 23:23, <https://doi.org/10.56369/tsaes.2943>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023) FAOSTAT. Crops and livestock products: Cucumbers and gherkins (production). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize> (March 2026).
- Hernández-Pérez O. I., L. A. Valdez-Aguilar, I. Alía-Tejagal, A. D. Carmill and D. L. Cartmill (2019) Tomato fruit yield, quality, and nutrient status in response to potassium:calcium balance and electrical conductivity in the nutrient solution. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 20:484-492, <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00133-9>
- Ho L. C. and P. J. White (2005) A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato fruit. *Annals of Botany* 95:571-581, <https://doi.org/10.1093/aob/mci065>
- Johnson R., K. Vishwakarma, M. S. Hossen, V. Kumar, A. M. Shackira, J. T. Puthur, ... and M. Hasanuzzaman (2022) Potassium in plants: growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry* 172:56-69, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001>
- Lee J. M., C. Kubota, S. J. Tsao, Z. Bie, Z., P. Hoyos Echevarria, L. Morra and M. Oda (2010) Current status of vegetable grafting: Diffusion, grafting techniques, automation. *Scientia Horticulturae* 127:93-105, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.08.003>

- Peralta M. R. M., R. Delgado M., A. Benavides M., A. Juárez M. and M. Cabrera F. (2023) Calcium, potassium, and magnesium affect the nutritional value of tomato grafted fruits grown in a nutrient film technique system. *Agriculture* 13:2189, <https://doi.org/10.3390/agriculture13122189>
- Salas-Rivera R., L. A. Valdez-Aguilar, D. Alvarado-Camarillo, E. Rascón-Alvarado, F. M. Peña-Ramos y J. A. González-Fuentes (2020) Balance potasio: calcio, relación con el déficit de presión de vapor y la radiación fotosintéticamente activa en tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana* 38:301-311, <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.589>
- Sánchez-del Castillo F., E. C. Moreno-Pérez, J. Pineda-Pineda and L. A. Aragón-Ramírez (2024) Nutrient dynamics and yield of tomato with different fertilizer sources and nutrient solution concentrations. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 31:e2023.009, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2023.10.009>
- Sardans J. and J. Peñuelas (2021) Potassium control of plant functions: ecological and agricultural implications. *Plants* 10:419, <https://doi.org/10.3390/plants10020419>
- Sarro M. J., R. M. Paz, M. D. Caceres and J. M. Penalosa (1994) Effect of calcium/potassium ratio and ammonium supply on nutrition and yields of cucumber plants. *Journal of Plant Nutrition* 17:1489-1500, <https://doi.org/10.1080/01904169409364822>
- SAS Institute (2013) SAS/STAT® 9.4 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
- Schwarz D., Y. Roupael, G. Colla and J. H. Venema (2010) Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses: thermal stress, water stress and organic pollutants. *Scientia Horticulturae* 127:162-171, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.016>
- Song J., R. Zhang, B. Fu, H. Chen, X. Song, G. Lv and R. Zhang (2025) Effects of potassium supply in nutrient solution on water and nutrient absorption of substrate-grown tomato plants. *Horticulturae* 11:629, <https://doi.org/10.3390/horticulturae11060629>
- Steiner A. A. (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15:134-154, <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Trejo-Téllez L. I. and F. C. Gómez-Merino (2012) Nutrient solutions for hydroponic systems. In: *Hydroponics: A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. T. Asao (ed.). InTech. Rijeka, Croatia. pp:1-22, <https://doi.org/10.5772/37578>
- Wan R., Z. Shi, Y. Li, T. Huang, Y. Cao, W. An, ... and L. Yang (2024) Effect of potassium on the agronomic traits and fruit quality of Goji (*Lycium barbarum* L.). *Scientific Reports* 14:21477, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72472-2>
- Wang T., X. Chen, C. Ju and C. Wang (2023) Calcium signaling in plant mineral nutrition: From uptake to transport. *Plant Communications* 4:100678, <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2023.100678>
- White P. J. (2012) Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. In: *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd edition. P. Marschner (ed.). Academic Press. San Diego, California, USA. pp:7-47, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00002-9>
- White P. J. and M. R. Broadley (2003) Calcium in plants. *Annals of Botany* 92:487-511, <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>