



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**NUTRICIÓN POR ETAPAS FENOLÓGICAS EN TOMATE
CULTIVADO EN HIDROPONÍA**

CESAR SAN MARTÍN HERNÁNDEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2016

La presente tesis, titulada: "Nutrición por etapas fenológicas en tomate cultivado en hidroponía", realizada por el alumno: "Cesar San Martín Hernández", bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA**

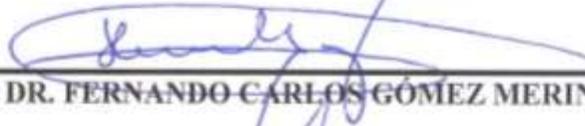
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



DRA. LIBIA IRIS TREJO TÉLLEZ

ASESOR:



DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ MERINO

ASESOR:



DR. PROMETEO SANCHEZ GARCÍA

ASESOR:



DR. CRESCENCIANO SAUCEDO VELOZ

ASESOR:



DR. JOSE ALBERTO ESCALANTE ESTRADA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, enero de 2016

NUTRICIÓN POR ETAPAS FENOLÓGICAS EN TOMATE CULTIVADO EN HIDROPONÍA

Cesar San Martín Hernández, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2016

Durante el ciclo biológico, las plantas demandan diferentes nutrimentos que afectan su fisiología, rendimiento y calidad de cosechas. De ahí que sea necesario investigar la nutrición por etapas fenológicas y evaluar su impacto en el crecimiento, rendimiento y calidad del fruto. Los objetivos de esta investigación fueron: a) evaluar el efecto concentraciones crecientes en la solución nutritiva de N a 10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³ aplicado en etapa vegetativa y K con 5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³ suministrado en etapa reproductiva, sobre la producción de biomasa, el crecimiento, el rendimiento y la calidad del fruto; b) identificar las dosis de N y K óptimas según el rendimiento y calidad del fruto de tomate hidropónico. Los resultados mostraron que en etapa vegetativa, al suministrar N de 10 a 16 mol_c m⁻³, se incrementaron el área foliar (AF), biomasa seca vegetativa (BSV), índice de área foliar (IAF), duración de área foliar (DAF) y el porcentaje de N de hojas y tallos; el crecimiento se ajustó a un modelo cuadrático que varió por el N. En la etapa reproductiva, conforme aumentó el K en la solución nutritiva de 5 a 13 mol_c m⁻³, se incrementaron AF, BSV, IAF y DAF; el crecimiento del cultivo se ajustó a un modelo lineal negativo y cuadrático con efectos del K; la concentración de N y K en hojas, tallos y frutos, creció según el nivel de N y K suministrado; también, la aplicación de N de 10 a 16 mol_c m⁻³, aumentaron los azúcares reductores y totales, vitamina C, luminosidad, porcentajes de jugo (% jugo) y acidez del fruto, pero disminuyeron los sólidos solubles totales (SST), Hue, licopeno y β-caroteno; y al elevar el K de 5 a 13 mol_c m⁻³, los azúcares reductores, SST, licopeno, luminosidad, % jugo, la acidez del fruto y el rendimiento aumentaron, pero el valor de Hue se redujo. Las dosis más recomendables para lograr la mejor calidad y rendimiento se encontraron con el suministro de N de 12 a 16 mol_c m⁻³ y K con 9 a 13 mol_c m⁻³. El incremento del suministro de N y K por etapas fenológicas mejora el crecimiento, rendimiento y la calidad del fruto de tomate hidropónico.

Palabras clave: crecimiento, azúcares, calidad de fruto, distribución nutrimental, fisiología.

NUTRITION BY PHENOLOGICAL STAGES IN TOMATO CULTIVATED IN HYDROPONICS

Cesar San Martín Hernández, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2016

During their life cycle, plants require different nutrients that affect physiology, yield and crop quality. Therefore, there is a dire need to investigate nutrition requirements per growth stages and assess its impact on growth, yield and fruit quality. The objectives of this research were: a) to evaluate the effect of increasing N concentrations in the nutrient solution at 10, 12, 14 and 16 mol_c m⁻³ applied in vegetative stage, and K concentration at 5, 7, 9, 11 and 13 mol_c m⁻³ supplied during the reproductive stage on biomass production, growth, yield and fruit quality; b) to identify the optimal dose of N and K on yield and fruit quality of hydroponic tomatoes. The results showed that in vegetative stage, the supply of 10-16 N mol_c m⁻³ increased leaf area (LA), vegetative dry biomass (VDB), leaf area index (LAI), leaf area duration (LAD) and the percentage of N of leaves and stems; growth was adjusted to a quadratic model that varied according to N concentrations supplied. In the reproductive stage, as K in the nutrient solution increased from 5-13 mol_c m⁻³, the LA, VDB, LAI and LAD also increased; crop growth was adjusted to a negative linear and quadratic model with effects of K; N and K concentration in leaves, stems and fruits, rose according to the levels of N and K supplied; also, the application of N 10-16 mol_c m⁻³, increased the reducing and total sugars, vitamin C, luminosity, percentages of juice (% juice) and fruit acidity, but decreased the total soluble solids (TSS), Hue, lycopene and β-carotene; while when increasing the K concentration from 5-13 mol_c m⁻³, the reducing sugars, TSS, lycopene, brightness, % juice, fruit acidity and yield increased, but decreased Hue values. The most recommended dose to ensure the best quality and yield are with N of 12-16 mol_c m⁻³ and K of 9-13 mol_c m⁻³. The increased supply of N and K by phenological stages improves growth, yield and fruit quality of hydroponic tomato.

Keywords: growth, sugars, fruit quality, nutrient distribution, physiology.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de doctorado.

Al Colegio de Postgraduados por las facilidades otorgadas para efectuar mis estudios e investigación de doctorado en ciencias.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por su valioso apoyo durante la elaboración del presente documento de tesis.

A la Dra. Libia Iris Trejo Téllez por compartir sus enseñanzas, por sus consejos, pero sobre todo por su invaluable apoyo para realizar y culminar esta investigación.

Al Dr. Fernando por sus valiosas observaciones durante el desarrollo de la investigación y escritura de tesis.

Al Dr. Prometeo por las sugerencias efectuadas para el establecimiento de este proyecto de tesis.

Al Dr. Crescenciano Saucedo Veloz por sus acertadas aportaciones durante el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Jose Alberto Escalante Estrada por sus importantes observaciones y sugerencias que mejoraron esta investigación.

Asimismo, al Dr. Humberto Vaquera Huerta, Dr. Victor Volke Haller, Dra. María de las Nieves Rodríguez Mendoza, Dr. R. Marcos Soto Hernández, M. C. Rubén San Miguel Chávez, y M. C. Antonio García E., por las facilidades y sugerencias realizadas en esta investigación.

Al Dr. Carlos Ortiz Solorio por mostrarme la sencillez de las matemáticas y a todos mis profesores que participaron durante mis estudios de doctorado.

DEDICATORIA

A DIOS por brindarme el hermoso regalo de vivir y conocer este mundo, así como por obsequiarme inmerecidamente fortaleza y sabiduría en mi camino.

A mi hermosa esposa GIOVANNA por sus atenciones, comprensión, tiempo y espacio dedicado en los momentos difíciles de esta etapa de mi vida.

A mis padres: ÁNGELA Y ANDRÉS de quienes desde el seno familiar he aprendido la cultura del trabajo, honestidad y justicia para conducirme por la vida.

A la DRA. LIBIA I. TREJO TÉLLEZ quien ha sido un ejemplo por su dedicación al trabajo, por su amplio acervo en nutrición vegetal y por mostrar siempre su calidad humana.

A mis hermanos, hermanas, sobrinos, sobrinas, tíos, tías, primos y primas; así como a mi nueva familia Alma Yadira, Ernesto, Rosa y Arturo; a mi suegra Águeda; a Luisa, María, Guadalupe, Cecilia, Jesús, Noé y Ángela Vargas; a Jaqueline Vargas, Ángel Sánchez, Froylan Rosas y demás familiares que me han brindado su apoyo en todo momento.

A mis amigos (as) Dalila Flores, Sara Rodríguez Paquini, Agustín Gervacio, Ramiro Maldonado, Mario Vaca, Guillermina, Humberto Ramírez, Víctor, Wenceslao y Ariadna, entre otros, por su valiosa amistad durante este trayecto de mi vida.

A mis profesores y compañeros con quienes aprendí mucho en el transcurso de mis estudios en el aula.

A todas aquellas personas que me compartieron momentos de trabajo y alegría.

Sinceramente

CESAR SAN MARTÍN HERNÁNDEZ

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | Página |
|---|--------|
| ÍNDICE DE CUADROS | xi |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiv |
| INTRODUCCIÓN GENERAL | 1 |
| 1. Justificación..... | 1 |
| 2. Objetivos..... | 4 |
| 3. Hipótesis..... | 5 |
| 4. Literatura citada..... | 6 |
| CAPÍTULO I. NITRÓGENO Y POTASIO EN LA BIOMASA Y CRECIMIENTO DEL TOMATE | 8 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| 1.2. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 9 |
| 1.2.1. Tratamientos y diseño experimental..... | 10 |
| 1.2.2. Establecimiento del cultivo..... | 10 |
| 1.2.3. Riego..... | 10 |
| 1.2.4. Solución nutritiva..... | 11 |
| 1.2.5. Variables evaluadas..... | 11 |
| 1.2.5.1. Área foliar (AF)..... | 11 |
| 1.2.5.2. Biomasa seca vegetativa (BSV)..... | 11 |
| 1.2.5.3. Índice de área foliar (IAF)..... | 11 |
| 1.2.5.4. Relación peso seco de hojas y tallos (H/T)..... | 12 |
| 1.2.5.5. Duración del área foliar (DAF)..... | 12 |
| 1.2.5.6. Análisis de tasas de crecimiento..... | 12 |
| 1.2.6. Análisis estadístico..... | 12 |
| 1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 13 |
| 1.3.1. Área foliar..... | 16 |
| 1.3.2. Biomasa seca vegetativa..... | 17 |
| 1.3.3. Relación peso seco de hojas y tallos (H/T)..... | 18 |
| 1.3.4. Índice de área foliar (IAF)..... | 19 |
| 1.3.5. Duración de área foliar..... | 20 |

| | |
|--|-----------|
| 1.3.6. Análisis de tasas de crecimiento..... | 21 |
| 1.3.6.1. Tasa de asimilación neta (TAN)..... | 21 |
| 1.3.6.2. Tasa de crecimiento relativo (TCR)..... | 23 |
| 1.3.6.3. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)..... | 26 |
| 1.4. CONCLUSIONES..... | 29 |
| 1.5. LITERATURA CITADA..... | 29 |
| CAPÍTULO 2. CONCENTRACIÓN DE N Y K EN ÓRGANOS DE PLANTAS DE TOMATE HIDROPÓNICO Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO.... | 34 |
| 2.1. INTRODUCCIÓN..... | 34 |
| 2.2. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 35 |
| 2.2.1. Diseño de tratamientos y diseño experimental..... | 35 |
| 2.2.2. Riego..... | 36 |
| 2.2.3. Variables evaluadas..... | 36 |
| 2.2.3.1. N en hojas, tallos y frutos..... | 36 |
| 2.2.3.2. K en hojas, tallos y frutos..... | 36 |
| 2.2.3.3. Rendimiento..... | 37 |
| 2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 37 |
| 2.3.1. Concentración de N en hojas, tallos y frutos..... | 37 |
| 2.3.2. Concentración de K en hojas, tallos y frutos..... | 41 |
| 2.3.3. Rendimiento..... | 44 |
| 2.4. CONCLUSIONES..... | 45 |
| 2.5. LITERATURA CITADA..... | 46 |
| CAPÍTULO 3. CALIDAD DEL FRUTO ENTRE RACIMOS EN TOMATE EN FUNCIÓN DEL N EN ETAPA VEGETATIVA Y K EN ETAPA REPRODUCTIVA..... | 48 |
| 3.1. INTRODUCCIÓN..... | 49 |
| 3.2. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 50 |
| 3.2.1. Material vegetal..... | 50 |
| 3.2.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental..... | 50 |
| 3.2.3. Variables evaluadas..... | 51 |
| 3.2.3.1. Porcentaje de jugo (% jugo)..... | 51 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.3.2. Sólidos solubles totales (SST)..... | 51 |
| 3.2.3.3. Acidez titulable (% ácido cítrico)..... | 51 |
| 3.2.3.4. Relación SST/Acidez titulable..... | 51 |
| 3.2.3.5. Azúcares reductores (Az reductores)..... | 51 |
| 3.2.3.6. Color..... | 52 |
| 3.2.3.7. Licopeno..... | 52 |
| 3.2.4. Análisis estadístico..... | 52 |
| 3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 53 |
| 3.3.1. Porcentaje de jugo (% jugo)..... | 53 |
| 3.3.2. Sólidos solubles totales (SST)..... | 54 |
| 3.3.3. % Acido cítrico..... | 56 |
| 3.3.4. Az reductores..... | 57 |
| 3.3.5. Relación SST/Acidez titulable..... | 58 |
| 3.3.6. Color..... | 59 |
| 3.3.6.1. Hue..... | 59 |
| 3.3.6.2. Luminosidad..... | 61 |
| 3.3.7. Licopeno..... | 62 |
| 3.4. CONCLUSIONES..... | 64 |
| 3.5. LITERATURA CITADA..... | 64 |
| CAPÍTULO 4. CAROTENOIDES, VITAMINA C Y AZÚCARES EN FUNCIÓN DE N Y K EN TOMATE HIDROPÓNICO..... | 71 |
| 4.1. INTRODUCCIÓN..... | 71 |
| 4.2. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 73 |
| 4.2.1. Variables evaluadas..... | 73 |
| 4.2.1.1. Azúcares totales..... | 73 |
| 4.2.1.2. Vitamina C..... | 74 |
| 4.2.1.3. Licopeno y β -caroteno..... | 74 |
| 4.2.4. Análisis estadístico..... | 76 |
| 4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 76 |
| 4.3.1. Azúcares totales..... | 76 |
| 4.3.2. Vitamina C..... | 78 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 4.3.3. Licopeno..... | 79 |
| 4.3.4. β -caroteno..... | 83 |
| 4.4. CONCLUSIONES..... | 84 |
| 4.5. LITERATURA CITADA..... | 85 |
| CONCLUSIONES GENERALES..... | 90 |

ÍNDICE DE CUADROS

Página

CAPÍTULO 1

- Cuadro 1** Significancias estadísticas de N en el área foliar, biomasa seca vegetativa, relación peso seco de hojas y tallos e índice de área foliar del cultivo de tomate durante la etapa vegetativa..... 15
- Cuadro 2** (A) Significancias estadísticas del N, K, y N*K, en el área foliar, biomasa seca vegetativa, relación peso seco de hojas y tallos e índice de área foliar del cultivo de tomate en etapa reproductiva; (B) Significancias estadísticas del N, K y su interacción, en la duración del área foliar del cultivo de tomate en etapa reproductiva a los 69, 126, 152 y 170 días después del trasplante..... 15-6
- Cuadro 3** Efecto de la concentración de N aplicado en etapa vegetativa en el área foliar, biomasa seca vegetativa y relación peso seco de hojas y tallos (H/T) del cultivo de tomate en hidroponía..... 16
- Cuadro 4** Efecto de la concentración de K aplicado en la solución nutritiva en el área foliar, biomasa seca vegetativa y relación peso seco de hojas y tallos (H/T) del cultivo de tomate en hidroponía en etapa reproductiva..... 18
- Cuadro 5** Modelos de mejor ajuste de las tasas de crecimiento en etapa vegetativa y reproductiva del cultivo de tomate hidropónico..... 23

CAPÍTULO 2

- Cuadro 1** Efectos de la dosis de aplicación de N en la solución nutritiva en etapa vegetativa en la concentración de N (%) en hoja y tallo de 3 fechas en tomate hidropónico..... 38
- Cuadro 2** Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de N (%) en hoja de 4 fechas de muestreo (ddt) en tomate hidropónico..... 38
- Cuadro 3** Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de N (%) en tallo de 4 fechas de muestreo (ddt) en tomate hidropónico..... 39

| | | |
|-----------------|---|----|
| Cuadro 4 | Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de N en frutos completamente rojos de 6 racimos (R) en tomate hidropónico..... | 40 |
| Cuadro 5 | Efecto de la combinación de N aplicado en la solución nutritiva durante la etapa vegetativa y del K en etapa reproductiva del cultivo del tomate en la concentración de N de frutos completamente rojos de dos racimos..... | 41 |
| Cuadro 6 | Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de K en hoja de 4 fechas de muestreos (ddt) en tomate hidropónico..... | 42 |
| Cuadro 7 | Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de K en tallo de 4 fechas de muestreos (ddt) en tomate hidropónico | 43 |
| Cuadro 8 | Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de K en frutos completamente rojos de 6 racimos (R) en tomate hidropónico..... | 44 |
| Cuadro 9 | Significancias estadísticas de los factores de estudio, en el rendimiento de tomate 110, 131 y 167 días después del trasplante (ddt), correspondientes a los racimos primero, tercero y quinto..... | 44 |

CAPÍTULO 3

| | | |
|-----------------|--|----|
| Cuadro 1 | Efectos de las concentraciones de N aplicado en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva y su interacción, sobre el porcentaje de jugo (% jugo) y los SST en frutos de tres racimos de tomate (R) cultivado en hidroponía..... | 55 |
| Cuadro 2 | Efectos de las concentraciones de N aplicado en etapa vegetativa y de K en etapa reproductiva y su interacción, en el porcentaje de acidez titulable (% ácido cítrico) y azúcares reductores (Az eductores) en frutos de tres racimos de tomate (R) cultivado en hidroponía..... | 57 |
| Cuadro 3 | Efectos de las concentraciones de N aplicado en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva y su interacción, sobre el valor de Hue y Luminosidad en frutos de tres racimos de tomate (R) cultivado en hidroponía..... | 60 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| Cuadro 4 | Efectos de las concentraciones de N aplicado en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva y su interacción, sobre el licopeno en frutos de tres racimos de tomate (R) cultivado en hidroponía..... | 62 |
|-----------------|---|----|

CAPÍTULO 4

| | | |
|-----------------|---|----|
| Cuadro 1 | Efecto del suministro de N en la solución nutritiva en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva y su interacción N*K sobre la concentración de azúcares totales y vitamina C en frutos de tomate de tres racimos..... | 76 |
|-----------------|---|----|

| | | |
|-----------------|--|----|
| Cuadro 2 | Efecto del suministro de N en la solución nutritiva en etapa vegetativa y del K en etapa reproductiva y de su interacción N*K en la concentración de licopeno y β -caroteno en frutos de tomate de tres racimos analizados por HPLC..... | 80 |
|-----------------|--|----|

| | | |
|-----------------|---|----|
| Cuadro 3 | Efecto de la combinación de N aplicado en la solución nutritiva durante la etapa vegetativa y del K en etapa reproductiva del cultivo del tomate en la concentración de licopeno y β -caroteno en frutos de diferentes racimos..... | 81 |
|-----------------|---|----|

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO 1

| | | |
|-----------------|---|----|
| Figura 1 | Temperaturas máximas y mínimas y radiación fotosintéticamente activa (PAR), registradas durante las etapas vegetativa (EV) y reproductiva (ER) del cultivo de tomate de julio a diciembre de 2012..... | 14 |
| Figura 2 | El índice de área foliar (IAF) en etapa vegetativa (a) y en etapa reproductiva (b). Barras en días después del trasplante (DDT) \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $P \leq 0.05$).... | 19 |
| Figura 3 | Efecto de la concentración de N y K en la solución nutritiva del cultivo de tomate sobre la duración del área foliar (DAF) en etapa vegetativa (a) y en etapa reproductiva (b). Barras en días después del trasplante (DDT) \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $P \leq 0.05$)..... | 21 |
| Figura 4 | Tasa de asimilación neta en función del tiempo (a) y de la concentración de N en la solución nutritiva (b), durante la etapa vegetativa del cultivo de tomate. Valores estimados por el modelo (Cuadro 5)..... | 22 |
| Figura 5 | Tasa de crecimiento relativo (a) y Tasa de crecimiento del cultivo (c), en función del tiempo y Tasa de crecimiento relativo (b) y tasa de crecimiento del cultivo (d) en función de la concentración de N en la solución nutritiva, durante la etapa vegetativa del cultivo de tomate. Estimado por modelo (Cuadro 5). | 25 |
| Figura 6 | Tasa de asimilación neta (a), tasa de crecimiento relativo (b) y tasa de crecimiento del cultivo (c) en función del tiempo y de la concentración de K en la solución nutritiva (d) durante la etapa reproductiva del cultivo de tomate. Valores estimados por el modelo (Cuadro 5)..... | 27 |

CAPÍTULO 2

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figura 1 | Rendimiento de tres racimos de tomate por efecto de la concentración de K en la solución nutritiva en etapa reproductiva. Barras de frutos del mismo racimo \pm DE con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $P \leq 0.05$)..... | 45 |
|-----------------|--|----|

CAPÍTULO 3

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figura 1 | Porcentaje de jugo en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm desviación estándar (DE) en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... | 54 |
| Figura 2 | Porcentaje de sólidos solubles totales (SST) en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... | 55 |
| Figura 3 | Acidez titulable (AT) en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... | 56 |
| Figura 4 | Az reductores en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... | 58 |
| Figura 5 | Relación SST/Acidez titulable en frutos de tres racimos del cultivo de tomate en hidroponía. Barras \pm DE, son promedios de 120 frutos por cada racimo.... | 59 |
| Figura 6 | Valores de Hue en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... | 60 |
| Figura 7 | Luminosidad en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... | 61 |
| Figura 8 | Concentración de licopeno en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) | |

del cultivo. Barras \pm DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... 63

CAPÍTULO 4

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figura 1 | Barrido espectral de carotenoides (a y b); y análisis de licopeno (1) y β -caroteno (2) por HPLC en frutos de tomate completamente rojos (c)..... | 75 |
| Figura 2 | Concentración de azúcares totales en frutos de tomate por efecto de la concentración de N (a) en la solución nutritiva en etapa vegetativa y de K (b) en etapa reproductiva. Barras \pm desviación estándar en frutos del mismo racimo con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $P \leq 0.05$)..... | 78 |
| Figura 3 | Concentración de vitamina C en frutos de tomate por efecto de la concentración de N (a) en la solución nutritiva en etapa vegetativa y de K (b) en etapa reproductiva. Barras \pm desviación estándar en frutos del mismo racimo con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $P \leq 0.05$)..... | 79 |
| Figura 4 | Efecto del suministro de N en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) durante el cultivo de tomate en la concentración de licopeno de frutos de tres racimos. Barras \pm desviación estándar con diferentes letras en cada racimo, indican diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$)..... | 82 |
| Figura 5 | Registro de temperaturas máximas y mínimas durante las etapas vegetativa (EV) y reproductiva (ER) del cultivo de tomate de julio a diciembre de 2012. | 82 |
| Figura 6 | Efecto del suministro de N en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) durante el cultivo de tomate en la concentración de β -caroteno de frutos de diferentes racimos. Barras \pm desviación estándar con diferentes letras indican diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$)..... | 83 |

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Justificación

El cultivo protegido, es un sector de la agricultura muy dinámico y en constante crecimiento. A pesar de las discrepancias en el número de hectáreas bajo esta tecnología productiva (Moreno-Reséndez *et al.*, 2011), según la Asociación Mexicana de Agricultura Protegida Asociación Civil, en nuestro país se cuentan alrededor de 15300 ha (Ortega-Martínez, 2014) distribuidas en las proporciones siguientes: 66 % invernaderos, 11 % macrotúneles, 10 % casas sombra, 5 % microtúneles, 5 % techo sombra y 3 % pabellón (SIAP, 2013), las cuales se encuentran dispersas en todo el territorio nacional, dedicadas a la producción agrícola para consumo regional en unidades menores de una ha o aquellas con más de una hectárea que destinan su producción a la venta en cadenas de supermercados o mercados selectos, logrando de esta forma los mayores precios y beneficios. De acuerdo con Juárez-López *et al.* (2011), los estados que concentran el mayor número de hectáreas de cultivo en invernaderos son: Sinaloa 22%, Baja California 14 %, Baja California Sur 12 % y Jalisco 10 %, representando más del 50 % de la producción total protegida; la producción agrícola en esta modalidad, es muy diversificada desde las hierbas aromáticas, las ornamentales, frutillas, las hortalizas de hoja y de fruto; en este último grupo destaca la producción de pepino 10 %, pimiento 16 %, otros 4 % y tomate, con más del 70 % de la superficie producida bajo invernadero en hidroponía o fertirriego (SAGARPA, 2012). Por otra parte, esta actividad también impacta en la economía local, por la generación de mano de obra requerida para su funcionamiento, siendo 8 empleos directos en promedio por cada unidad de área establecida (adaptado de Castellanos y Borbón, 2009).

En el contexto mundial con datos de la FAO (2013), desde el 2000 al 2012, la producción mundial de tomate ha crecido desde 110390673 hasta 161793834 ton, cantidad que ha sido contribuida principalmente en orden de importancia por China, India, Estados Unidos de America (EUA), Turquía, Egipto, Italia, Iran, España, Brasil, y México, nuestro país en donde ha permanecido generalmente en el lugar diez. Prácticamente el tomate se produce en todo nuestro territorio, los estados de Sinaloa, Baja California Norte y Sur, Michoacan, Jalisco y Zacatecas, son los mayores productores de esta especie, la cual gran parte se exporta a Estados Unidos de América, siendo la hortaliza que más contribuye en la captación de divisas.

En México, el consumo de esta hortaliza oscila alrededor del 60 % de la producción nacional, constituyendo el principal amortiguador cuando se presentan dificultades en la exportación; mientras en 1997 su consumo se estimaba en 13 kg por habitante (ASERCA, 1998); en el periodo de 2004 a 2008 fué entre 13 y 14 kg (FIRA, 2010). El fruto de esta hortaliza constituye uno de los elementos importantes de la alimentación diaria de la población de muchos países, ya que es una fuente de compuestos útiles en la salud humana como son los antioxidantes (Dorai *et al.*, 2001), sólidos solubles (azúcares) (Beckles, 2012), los ácidos orgánicos cítrico y málico, minerales, más de 400 componentes volátiles (Yilmaz, 2001), fibra, proteínas, vitaminas A, C, E y K (Palmer, 2009) y los carotenoides que le confieren el color característico al fruto (Inbaraj y Chen, 2008).

Las concentraciones de licopeno, vitamina C y K, entre otras moléculas, son importantes dentro del valor nutricional del tomate (Brunele-Caliman, *et al.*, 2010); sin embargo, su composición y proporción varía de acuerdo al genotipo (Sulieman *et al.*, 2011), el ambiente (temperatura, luz, humedad) (Cebolla-Cornejo *et al.*, 2011) y el factor nutrimental. De los 14 elementos minerales esenciales requeridos por las plantas, el nitrógeno (N) y potasio (K) destacan tanto por la mayor absorción como por sus funciones específicas para el crecimiento adecuado (Kirkby, 2012). Se ha demostrado que el N promueve la producción, partición y acumulación de materia seca en los cultivos (Akanbi *et al.*, 2007). En forma similar, el K por su gran requerimiento, desempeña funciones esenciales en cuanto a la síntesis de proteínas, metabolismo de carbohidratos, balance iónico, efecto osmótico, importante para el movimiento de metales pesados como el hierro, ayuda a superar y evitar las enfermedades y es importante en la formación del fruto, (Melendez, 2011) además del metabolismo fotosintético (Xiao-Wang *et al.*, 2014). El cultivo bajo agricultura protegida permite controlar el suministro de agua y nutrimentos. Sin embargo, para proporcionar las condiciones óptimas de producción, es importante emplear soluciones nutritivas balanceadas (Steiner, 1984; Lara, 1999) y que cumplan los requerimientos nutrimentales de los cultivos (Zekki *et al.*, 1996), en los que se sabe que la planta experimenta cambios durante su ciclo biológico que afectan la fisiología y su respuesta en la producción. Por tanto surge la necesidad de investigar la nutrición por etapas fenológicas y evaluar su impacto en el rendimiento, producción de biomasa, crecimiento, composición química y calidad del fruto. En este sentido, la evaluación de dosis crecientes de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva, puede informarnos sobre las concentraciones óptimas que requiere la planta para expresar el máximo potencial productivo y

sus efectos en parámetros de calidad que resulten en una producción con calidad competitiva debido a que si bien la concentración de compuestos nutraceuticos en el fruto es baja, sus altos niveles de consumo facilitan que pequeños incrementos en su contenido puedan tener consecuencias de gran alcance en la dieta del consumidor (Mellidou et al., 2012), lo cual se busca que sea promovido por el manejo de la nutrición nitrogenada en etapa vegetativa y la potásica en etapa reproductiva del cultivo de tomate en hidroponía.

2. Objetivos

General

- Evaluar el impacto de la aplicación en la solución nutritiva de diferentes concentraciones de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva sobre la fisiología, dinámica del crecimiento, producción de biomasa y atributos de calidad fisicoquímicos del fruto de tomate cultivado en hidroponía.

Específicos

- Evaluar el efecto del suministro de concentraciones crecientes en la solución nutritiva de N a 10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³ aplicado en etapa vegetativa y K con 5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³ en etapa reproductiva, sobre la producción de biomasa, el crecimiento, el rendimiento y la calidad del fruto de tomate cultivado en hidroponía.
- Evaluar el estado nutrimental de la hoja, tallo y fruto en las etapas vegetativa y reproductiva del cultivo de tomate.
- Determinar las dosis de N y K óptimas para las etapas vegetativa y reproductiva según el rendimiento y calidad del fruto de tomate hidropónico.

3. Hipótesis

General

- En virtud de los diferentes requerimientos nutrimentales durante el transcurso del ciclo biológico de la planta, las concentraciones de N y K aplicados en la solución nutritiva, influyen en el metabolismo vegetal y por tanto en la fisiología, el crecimiento, la producción de biomasa y la calidad del fruto obtenido.

Específicos

- Las concentraciones crecientes en la solución nutritiva de N de 10 a 16 mol_c m⁻³ suministrado en etapa vegetativa y K con 5 a 13 mol_c m⁻³ aplicado en etapa reproductiva, modifican el comportamiento de la biomasa, el crecimiento, el rendimiento y la calidad del fruto de tomate cultivado en hidroponía.
- El estado nutrimental de la hoja, tallo y fruto, varía con respecto a la etapa de desarrollo del cultivo de tomate.
- En virtud de los efectos fisiológicos de los nutrimentos, el máximo rendimiento y calidad del fruto de tomate es expresado a las mayores tasas de N y K aplicado en la solución nutritiva.

4. Literatura citada

- Akanbi, W. B., A. O. Togun, O. A. Olaniran, J. O. Akinfasoye, and F. M. Tairu. 2007. Physico-chemical properties of Eggplant (*Solanum meloongena* L.) fruit in response to nitrogen fertilizer and fruit size. *Agriculture Journal* 2: 140–148.
- ASERCA. 1998. Jitomate y soya. *Claridades Agropecuarias* 62: 1-36.
- Beckles, D. M. 2012. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. Review. *Postharvest Biology and Technology* 63, 129-140.
- Brunele-Caliman F. R., D. J. Henriques-da Silva, P. C. Stringheta, P. C. Rezende-Fontes, G. Rodrigues-Moreira, and E. Chartuni-Mantovani. 2010. Quality of tomates grown under a protected environment and field conditions. *IDESIA (Chile)* 28(2): 75-82.
- Castellanos J. Z. y C. Borbón M. 2009. Panorama de la horticultura protegida en México. In: J. Z. Castellanos (ed.). *Manual de producción hortícola en invernadero*. Intagri, S. C. México. pp. 43-90.
- Cebolla-Cornejo J., S. Roselló, M. Valcárcel, E. Serrano, J. Beltrán, and F. Nuez. 2011. Evaluation of genotype and environment effects on taste and aroma flavor components of Spanish fresh tomato varieties. *J. Agric. Food Chem.*, 59(6): 2440-2450.
- Dorai, M., P. Papadopoulos and A. Gosselin. 2001. Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie* 21(4): 367-383.
- FAO. 2013. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT. Disponible en: <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>. Consulta 10/11/2015
- FIRA. 2010. Oportunidades de negocio en agricultura protegida. *Boletín Informativo* 7: 1-99.
- Inbaraj, B. S., Chen, B. H., 2008. Carotenoids in tomato plants. In: Preedy, V. R., Watson, R. R. (Eds.). *Tomatoes and tomato products, nutritional, medicinal and therapeutic properties*. Science Publishers, CRC Press. pp. 133-164.
- Juárez-López P., R. Bugarín-Montoya, R. Castro-Brindis, A. L. Sánchez-Monteón, E. Cruz-Crespo, C. R. Juárez-Rosete, G. Alejo-Santiago, R. Balois-Morales. 2011. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente Año* 3(8): 21-27.
- Kirkby E. 2012. Introduction, definition and classification of nutrients. In: P. Marschner (ed.) *Marschner's Mineral nutrition of higher plants*. Third edition. Academic Press, Elsevier, U.S.A. pp. 3-6.

- Lara, H. A. 1999. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra* 17(3): 221-229.
- Melendez, M. 2011. Potassium deficiency in tomato crops. *Vegetable Crops Edition* 17(4): 1-2.
- Mellidou I., J. Keulemans, A. K. Kanellis and M. W. Davey. 2012. Regulation of fruit ascorbic acid concentrations during ripening in high and low vitamin C tomato cultivars. *BMC Plant Biology* 12: 239: 1-19.
- Moreno-Reséndez A., J. Aguilar-Durón y A. Luévano-González. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios* 15(29): 763-774.
- Ortega-Martínez, L.D., J. Ocampo-Mendoza, E. Sandoval-Castro, C. Martínez-Valenzuela, A. Huerta-De La Peña, J. L. Jaramillo-Villanueva. 2014. Caracterización y funcionalidad de invernaderos en Chignahuapan, Puebla, México. *Revista Bio Ciencias* 2(4): 261-270.
- Palmer S. 2009. Understanding the health benefits of tomato products. *SCANNERS*, 2(2): 1-3.
- SAGARPA. 2012. Agricultura Protegida 2012. Disponible en: <http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx> Consulta: 22/10/2015.
- SIAP. 2013. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Boletín semanal del SIAP de la SAGARPA, 2. Disponible en: <http://www.campomexicano.gob.mx/boletinsiap/002-e.html>. Consulta 14/11/2015.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In: *Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC*. Lunteren, Wageningen, The Netherlands. pp. 633-650.
- Suliman A. M. E, K. M. A. Awn and M. T. Yusif. 2011. Suitability of some tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) genotypes for paste production. *Journal of Science and Technology* 12(2): 45-51.
- Xiao-Guang, W., Xin-hua, Z., Chun-ji, J., Chun-hong, L., CONG-Shan, WU-Di, Yan-qiu, C., Hai-qiu Y., Chun-yan, W., 2014. Effects of potassium deficiency on photosynthesis and photo-protection mechanisms in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Journal of Integrative Agriculture*, Advance Online Publication.
- Yilmaz, E., 2001. The chemistry of fresh tomato flavor. *Turk J. Agric. F.* 25, 149-155.

CAPÍTULO 1. NITRÓGENO Y POTASIO EN LA BIOMASA Y CRECIMIENTO DEL TOMATE

RESUMEN

Durante el ciclo de cultivo, las plantas presentan cambios bioquímicos y fisiológicos, requieren nutrimentos con funciones específicas en cada fase de su desarrollo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la nutrición nitrogenada y potásica por etapas fenológicas en la producción de biomasa vegetativa y crecimiento del tomate cultivado en hidroponía. El N a 10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³ fue evaluado en etapa vegetativa; mientras que el K a 5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³ se evaluó en etapa reproductiva. Se utilizó un arreglo factorial en parcelas divididas, donde se designó al N como parcela grande y K como parcela chica, con un total de 20 tratamientos y 4 repeticiones. La unidad experimental fue una planta por maceta con 13 L de tezontle rojo. Las variables evaluadas fueron: área foliar (AF), biomasa seca vegetativa (BSV), relación peso seco de hojas y tallos (H/T), índice de área foliar (IAF), duración de área foliar (DAF), y las tasas de crecimiento relativo (TCR), de asimilación neta (TAN) y del crecimiento del cultivo (TCC). En etapa vegetativa, el N presentó efectos sobre las variables AF, BSV, IAF y DAF, con la mayor respuesta a concentraciones de 14 y 16 mol_c m⁻³. En etapa reproductiva, sólo se observó respuesta significativa por K. Un incremento de K de 5 a 13 mol_c m⁻³, aumentó el AF, BSV, IAF, DAF y en menor medida en la relación (H/T). Las tasas de crecimiento TAN y TCC se caracterizaron por un comportamiento cuadrático en etapa vegetativa; mientras que en etapa reproductiva, presentaron una tendencia asintótica negativa en TAN y en TCC fue lineal negativa y cuadrática. El N y K afectaron positivamente las variables fisiológicas evaluadas en las etapas vegetativa y reproductiva, aumentando el potencial productivo del cultivo de tomate hidropónico.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum*, etapas fenológicas, fisiología, modelo de regresión.

1.1. INTRODUCCIÓN

En cualquier sistema biológico, el crecimiento es consecuencia de la división celular y de la elongación celular (Casierra y Cardozo, 2009). Taiz y Zeiger (2002) definen al crecimiento de las plantas como un incremento irreversible en volumen. Para el análisis matemático de crecimiento, se usan medidas directas tales como peso seco, área foliar y tiempo, a partir de las cuales se calculan los índices de crecimiento: tasa relativa de crecimiento, tasa de crecimiento del cultivo,

tasa de asimilación neta, índice de área foliar y duración de área foliar, entre otros (Hunt, 1978; Escalante y Kohashi, 1993). Estos índices permiten analizar el crecimiento de la planta a través de la acumulación de materia seca, la cual depende del tamaño de área foliar, tiempo de funcionamiento de las hojas (Tekalign y Hammes, 2005), interceptación y uso de la radiación solar, las prácticas de manejo durante el ciclo de cultivo entre las que se encuentran el manejo de la fertilización (Santos *et al.*, 2010). En este sentido, de acuerdo la tendencia del crecimiento observada, resulta importante proponer modelos que puedan predecir el comportamiento de las tasas de crecimiento por efecto del N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva, los cuales además del tiempo, pueden ser factores determinantes en las diferentes etapas fenológicas del cultivo de tomate. En esta dinámica del crecimiento, durante el desarrollo del cultivo, se presentan cambios en algunos nutrimentos debido a la edad de los órganos los cuales varían su composición mineral (Lara, 1999). El nivel de N, P y K, disminuye durante la etapa vegetativa y al final del ciclo de desarrollo, el 60 a 70 % del N, P o K absorbido se acumula en los frutos (Dumas, 1990), los cuales representan del 52 al 72 % de la biomasa seca total de la planta (Peil y Galvez, 2005). En este contexto, el establecimiento de relaciones N/K apropiadas para las diferentes fases del cultivo es factor fundamental para la producción del tomate en invernadero (Hernández-Díaz *et al.*, 2009). Esta relación afecta el equilibrio entre procesos que ocurren en la etapa vegetativa y reproductiva, donde el K actúa como regulador de crecimiento cuando la disponibilidad de N es alta.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la concentración de N en etapa vegetativa y de K en etapa reproductiva, sobre la producción de biomasa vegetativa y dinámica del crecimiento del cultivo de tomate *cv.* Charleston bajo condiciones hidropónicas en invernadero.

1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en condiciones de invernadero e hidroponía en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Los datos climáticos se reportan durante el ciclo experimental de julio a diciembre de 2012. En el interior del invernadero, se usó un Data Logger Hobo H8 Onset Computer Corporation^R situado inmediatamente superior al dosel vegetal para registrar la temperatura máxima y mínima diaria; y la radiación solar se obtuvo de la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados (19° 29' N y 98° 53' O y 2250 msnm). Los datos de

radiación solar se transformaron a radiación fotosintéticamente activa (PAR) con el factor de corrección 0.47 de acuerdo con Blackburn y Proctor (1983) y posteriormente se hizo la corrección dado que el plástico del invernadero presentaba una transmitancia del 74 %, lo cual fue corroborado por mediciones aleatorias efectuadas con un sensor de luz (Spectrum Technologies 3415FX, USA). Los datos climáticos se reportan como promedios decenales y la radiación PAR correspondió a valores entre las 12 y 14 h del día.

1.2.1. Tratamientos y diseño experimental

El experimento se realizó en dos etapas. Primera: en etapa vegetativa se evaluó cuatro niveles de nitrógeno (N) en la solución nutritiva con 10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³, bajo un diseño completamente aleatorizado y cuatro repeticiones por tratamiento. Segunda, las plantas que recibieron tratamientos de la primera etapa, se utilizaron para evaluar cinco concentraciones de potasio (K): 5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³ en etapa reproductiva; la combinación de N x K, originó 20 tratamientos, los cuales se establecieron bajo un diseño en parcelas divididas completamente al azar con cuatro repeticiones, tomando como unidad experimental una planta por maceta; el N se designó como parcela grande y el K como parcela chica.

1.2.2. Establecimiento del cultivo

Las semillas de tomate bola *cv.* Charleston se sembraron en una charola de 200 cavidades con una mezcla de turba y agrolita en la proporción 4:1 (v/v). Las plántulas se regaron con agua corriente hasta la primera hoja verdadera; después y hasta los 37 días se aplicó la solución Steiner (1984) al 25% de su concentración. El trasplante se realizó a los 37 días después de la siembra a una densidad de 3.8 plantas m⁻², colocando una planta por bolsa negra de polietileno de 40 x 40 cm con 13 L de tezontle rojo (≤ 1.2 mm diámetro) empleado como sustrato. Una vez realizado el trasplante, el experimento duró 170 d. A los 108 días se despuntó el ápice para evitar riesgos del cultivo a daños por heladas ya que este fenómeno se presenta frecuentemente posterior a diciembre.

1.2.3. Riego

Con un sistema de riego por goteo se aplicó ocho riegos diarios con un volumen de 134 mL por cada evento durante los primeros 30 días después del trasplante (DDT). Posteriormente hasta terminar el ciclo de cultivo (170 DDT), se aplicaron 16 riegos diarios de 140 mL cada uno.

1.2.4. Solución nutritiva

La solución nutritiva Steiner (1984) fue utilizada variando la concentración y composición de acuerdo a la etapa fenológica. En la primera semana la solución nutritiva se aplicó al 50% de concentración original. Después de la primera semana y hasta los 45 DDT, se cambió la composición de la solución nutritiva en la concentración de N desde 10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³, correspondiendo a la etapa vegetativa del cultivo. Posteriormente, en la etapa reproductiva la solución nutritiva fue modificada por la concentración de K, de 5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³. En las etapas fenológicas vegetativa y reproductiva, la solución nutritiva fue ajustada a un valor de 2 dS m⁻¹ de conductividad eléctrica, con un potencial osmótico de -0.072 MPa según Villegas-Torres *et al.* (2005).

1.2.5. Variables evaluadas

Durante el ciclo de cultivo se realizaron muestreos destructivos para determinar las variables en las etapas de crecimiento vegetativo (primeros 45 DDT) y reproductivo (46 a 170 DDT). Los muestreos se realizaron a los 14, 28 y 42 DDT en la etapa vegetativa y a los 69, 126, 152 y 170 DDT en la etapa reproductiva, como se indican a continuación.

1.2.5.1. Área foliar (AF)

Se registró el área de la lámina foliar mediante un integrador de área foliar (LI-COR, LI-3000A, USA), reportando este valor en dm². En etapa reproductiva la determinación de esta variable se realizó de acuerdo con Astegiano *et al.* (2001).

1.2.5.2. Biomasa seca vegetativa (BSV)

Las plantas separadas en hojas y tallos se colocaron en una estufa (Riosa HCF-125D, México) con circulación de aire a 70 °C por 72 h hasta obtener peso seco constante (g) de acuerdo con Alcántar y Sandoval (1999) y Escalante y Kohashi, (1993).

1.2.5.3. Índice de área foliar (IAF)

Este índice se obtuvo mediante la ecuación $(AF*DP)/100 \text{ dm}^2 \text{ m}^{-2}$, donde AF= área foliar (dm²) y DP= densidad de plantas por m², siendo este valor adimensional e indicando el número de capas de área foliar por cada unidad de superficie de cultivo.

1.2.5.4. Relación peso seco de hojas y tallos (H/T)

La relación fue determinada como el cociente del peso seco de hojas (H) entre el peso seco de tallos (T), siendo este valor adimensional.

1.2.5.5. Duración del área foliar (DAF)

Esta variable se cuantificó mediante la ecuación $(IAF1+IAF2)(T2-T1)/2$, donde IAF1 y IAF2 son los índices de área foliar en los tiempos inicial (T1) y final (T2) expresados en días, respectivamente (Escalante y Kohashi, 1993).

1.2.5.6. Análisis de tasas de crecimiento

También se evaluaron las tasas de crecimiento tanto en etapa vegetativa como en etapa reproductiva a través de la tasa de asimilación neta (**TAN**, $\text{mg dm}^{-2} \text{ d}^{-1}$), tasa de crecimiento relativo (**TCR**, $\text{mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) y la tasa de crecimiento del cultivo (**TCC** g d^{-1}) de acuerdo con Hunt (1981) y Escalante y Kohashi (1993) como a continuación se indica.

$$TAN = \left(\frac{PS_2 - PS_1}{AF_2 - AF_1} \right) \left(\frac{\ln AF_2 - \ln AF_1}{t_2 - t_1} \right) ; \quad TCR = \left(\frac{\ln PS_2 - \ln PS_1}{t_2 - t_1} \right) ; \quad TCC = \left(\frac{PS_2 - PS_1}{t_2 - t_1} \right)$$

Donde:

$PS_{1,2}$ = peso seco inicial y final del intervalo de tiempo; $AF_{1,2}$ = área foliar inicial y final del intervalo de tiempo; \ln = logaritmo natural; $t_{1,2}$ = tiempo inicial y final.

1.2.6. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza y las medias se compararon con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Para el análisis de los datos se utilizó el programa Statistical Analysis System (SAS, 2002, V9). En las tasas de crecimiento se especificaron los modelos iniciales de regresión con base en la forma de la respuesta de la variable de interés a los factores en estudio, siendo N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva; además, el tiempo en días después del trasplante (DDT). También se consideran signos e interacciones hasta obtener modelos de mejor ajuste tomando el cuadrado medio del error (CME) como criterio de bondad de acuerdo con Volke *et al.* (2005). El análisis se hizo con el procedimiento PROC REG de SAS. A continuación se presentan los modelos iniciales empleados.

| Tasa de crecimiento | Etapa vegetativa |
|---------------------|--|
| | $Y = \beta_0 + \beta_1 * (1/N) + \beta_2 * DDT - \beta_3 * DDT^2 + E$ |
| | $Y = \beta_0 + \beta_1 * N^{0.25} + \beta_2 * DDT - \beta_3 * DDT^2 + E$ |
| TAN | $Y = \beta_0 + \beta_1 * N + \beta_2 * DDT - \beta_3 * DDT^2 + E$ |
| | $Y = \beta_0 + \beta_1 * N + \beta_2 * DDT - \beta_3 * DDT^2 + E$ |
| | $Y = \beta_0 + \beta_1 * N^{0.25} + \beta_2 * DDT - \beta_3 * DDT^2 + E$ |
| TCR | $Y = \beta_0 + \beta_1 * N^{0.1} + \beta_2 * DDT - \beta_3 * DDT^2 + E$ |
| | $Y = \beta_0 + \beta_1 * DDT + \beta_2 * DDT^2 + \beta_3 * N^{0.25} + \beta_4 * NDDT^2 + E$ |
| | $Y = \beta_0 + \beta_1 * DDT + \beta_2 * DDT^2 + \beta_3 * NDDT^2 - \beta_4 * N^2 DDT^2 + E$ |
| TCC | $Y = \beta_0 + \beta_1 * DDT + \beta_2 * DDT^2 + \beta_3 * NDDT^2 - \beta_4 * N^3 DDT^2 + E$ |
| | Etapa Reproductiva |
| | $Y = \beta_0 - \beta_1 * DDT + \beta_2 * DDT^2 + E$ |
| TAN y | $Y = \beta_0 - \beta_1 * DDT + \beta_2 * DDT^{1.125} + E$ |
| TCR | $Y = \beta_0 + \beta_1 * DDT - \beta_2 * DDT^{0.75} + E$ |
| | $Y = \beta_0 - \beta_1 * DDT + \beta_2 * DDT^2 + \beta_3 * K^{0.05} + E$ |
| | $Y = \beta_0 - \beta_1 * DDT + \beta_2 * DDT^2 + \beta_3 * K^{0.0125} + E$ |
| TCC | $Y = \beta_0 - \beta_1 * DDT + \beta_2 * DDT^2 + \beta_3 * K + E$ |

1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra una oscilación de la temperatura de 9 a 28 °C durante el transcurso del ciclo de cultivo de tomate. En la etapa vegetativa la temperatura promedio máxima y mínima fueron 28 y 12 °C; mientras que en etapa reproductiva fueron 29 y 6 °C, respectivamente. La radiación PAR presentó variaciones con valores promedio máximos de julio a octubre con 300 W m⁻², pero este fenómeno tendió a disminuir a 251 W m⁻² de noviembre a diciembre, lo cual coincidió con la etapa final del crecimiento del cultivo.

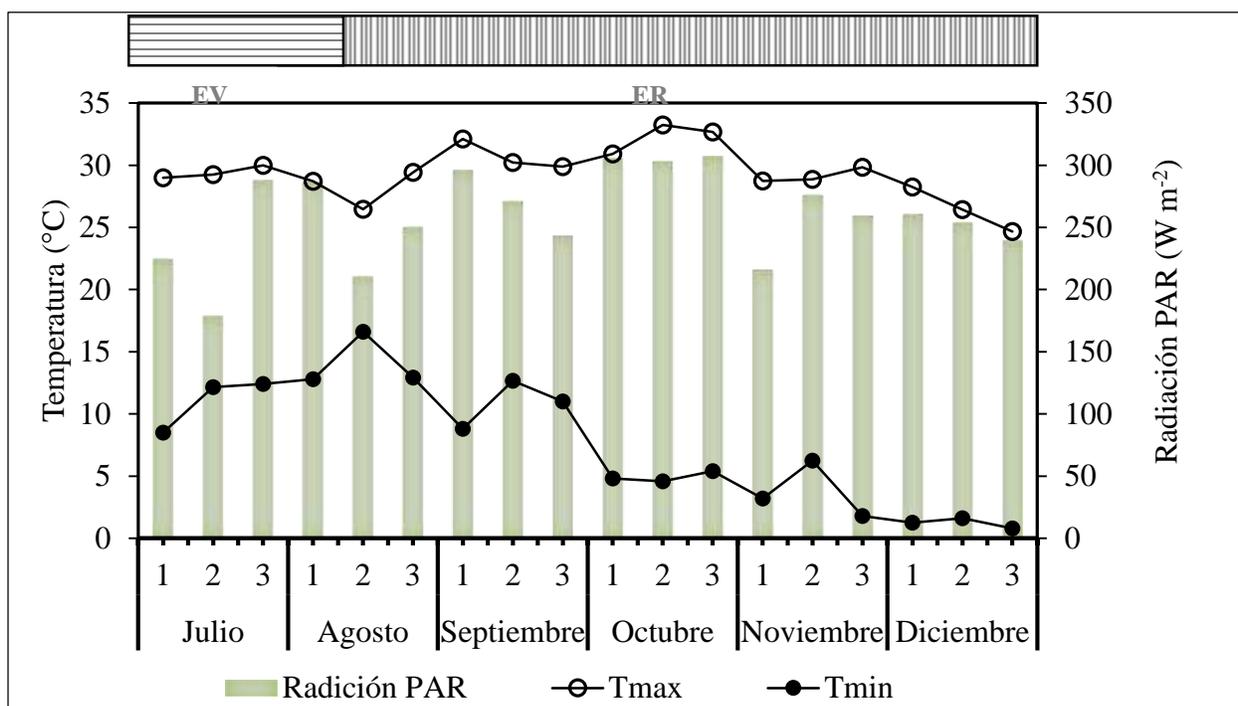


Figura 1. Temperaturas máximas y mínimas y radiación fotosintéticamente activa (PAR), registradas durante las etapas vegetativa (EV) y reproductiva (ER) del cultivo de tomate de julio a diciembre de 2012.

El N ocasionó respuestas estadísticamente significativas y diferenciales entre las variables estudiadas (Cuadro 1). En el AF, IAF y DAF, los efectos del N se observaron hasta los 42 DDT; mientras que, en la BSV, fue a partir de los 28 DDT. Sin embargo, la relación H/T no presentó cambios significativos con N de 10 a 16 mol_c m⁻³ en la solución nutritiva.

En la etapa reproductiva, el N y la interacción N*K no afectaron el AF, la BSV, la relación H/T, el IAF y la DAF; mientras que el K evaluado en esta etapa, presentó efectos sobre las variables determinadas (Cuadros 2A y 2B). A pesar de los efectos que ejerció el K, la interacción N*K, resultó no significativa sobre las variables determinadas en cada uno de los muestreos.

Cuadro 1. Significancias estadísticas de N en el área foliar, biomasa seca vegetativa, relación peso seco de hojas y tallos e índice de área foliar del cultivo de tomate durante la etapa vegetativa.

| Fuente de variación | Área foliar | | | Biomasa seca vegetativa | | |
|---------------------------------------|-------------|----------|---------|-------------------------|-----------|----------|
| | 14 | 28 | 42 | 14 | 28 | 42 |
| -----Días después del trasplante----- | | | | | | |
| N | 0.451 ns | 0.139 ns | 0.001 * | 0.621 ns | 0.00016 * | 0.0006 * |
| CV (%) | 15.4 | 9.5 | 6.5 | 19.3 | 5.3 | 8.8 |

| Fuente de variación | Relación H/T | | | Índice de área foliar | | | DAF | |
|---------------------------------------|--------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 14 | 28 | 42 | 14 | 28 | 42 | 14 | 28 |
| -----Días después del trasplante----- | | | | | | | | |
| N | 0.988 ns | 0.133 ns | 0.354 ns | 0.473 ns | 0.208 ns | 0.0007 * | 0.528 ns | 0.124 ns |
| CV (%) | 5.9 | 12.2 | 8.2 | 15.4 | 8.8 | 6.3 | 6.2 | 3.9 |

ns: no significativo; *Significativo ($p \leq 0.05$); CV: coeficiente de variación.

Cuadro 2A. Significancias estadísticas del N, K, y N*K, en el área foliar, biomasa seca vegetativa, relación peso seco de hojas y tallos e índice de área foliar del cultivo de tomate en etapa reproductiva.

| Fuente de Variación | Área Foliar | | | | Biomasa seca vegetativa | | | |
|---------------------------------------|-------------|----------|----------|----------|-------------------------|----------|----------|-----------|
| | 69 | 126 | 152 | 170 | 69 | 126 | 152 | 170 |
| -----Días después del trasplante----- | | | | | | | | |
| N | 0.199 ns | 0.613 ns | 0.942 ns | 0.979 ns | 0.392 ns | 0.627 ns | 0.949 ns | 0.9239 ns |
| K | <0.0001* | <0.0001* | <0.0001* | <0.0001* | <0.0001* | <0.0001* | <0.0001* | <0.0001* |
| N*K | 0.985 ns | 0.775 ns | 0.964 ns | 0.430 ns | 0.888 ns | 0.990 ns | 0.993 ns | 0.990 ns |
| CV (%) | 6.19 | 3.91 | 4.36 | 4.11 | 4.69 | 4.7 | 5.67 | 4.95 |

| Fuente de variación | Relación H/T | | | | IAF | | | |
|---------------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 69 | 126 | 152 | 170 | 69 | 126 | 152 | 170 |
| -----Días después del trasplante----- | | | | | | | | |
| N | 0.802 ns | 0.977 ns | 0.889 ns | 0.910 ns | 0.172 ns | 0.621 ns | 0.957 ns | 0.986 ns |
| K | 0.939 ns | 0.075 ns | 0.029 * | 0.76 ns | <.0001* | <.0001 * | <.0001* | <.0001* |
| N*K | 0.6579ns | 0.529 ns | 0.885 ns | 0.885 ns | 0.989 ns | 0.841 ns | 0.938 ns | 0.446 ns |
| CV (%) | 9.95 | 9.61 | 8.79 | 12.57 | 6.4 | 4.0 | 4.4 | 4.15 |

ns: no significativo; *Significativo ($p \leq 0.05$); CV: coeficiente de variación.

Cuadro 2B. Significancias estadísticas del N, K y su interacción, en la duración del área foliar del cultivo de tomate en etapa reproductiva a los 69, 126, 152 y 170 días después del trasplante.

| Fuente de variación | DAF | | | |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 69 | 126 | 152 | 170 |
| N | 0.190 ns | 0.355 ns | 0.936 ns | 0.965 ns |
| K | <0.0001* | <0.0001* | <0.0001* | <0.0001* |
| N*K | 0.985 ns | 0.967 ns | 0.792 ns | 0.922 ns |
| CV (%) | 6.19 | 3.21 | 2.54 | 3.36 |

ns: no significativo; *Significativo ($p \leq 0.05$); CV: coeficiente de variación.

1.3.1. Área foliar

En etapa vegetativa, el AF aumentó significativamente hasta los 42 DDT, (Cuadro 3), obteniéndose un incremento de 20 % por aumento de la concentración del N de 10 a 16 mol_c m⁻³. Mientras que en la etapa reproductiva, el área de la lámina de las hojas también se vió favorecida a medida que aumentó la concentración de K, obteniéndose la mejor respuesta a los 13 mol_c m⁻³ (Cuadro 4). Estas diferencias estadísticas representaron un aumento en el área foliar de 14, 15.7, 15.7 y 15.4 % debido a las concentraciones de K desde 5 hasta 13 mol_c m⁻³ y desde el primero hasta el cuarto muestreo respectivamente. Este aumento en el área de las hojas, mejora la cantidad de maquinaria fotosintética incrementando el potencial de producción de biomasa seca.

Cuadro 3. Efecto de la concentración de N aplicado en etapa vegetativa en el área foliar, biomasa seca vegetativa y relación peso seco de hojas y tallos (H/T) del cultivo de tomate en hidroponía.

| N (mol _c m ⁻³) | Área foliar (dm ²) | | | Biomasa seca vegetativa (g) | | | Relación H/T | | |
|---|---------------------------------------|---------|----------|-----------------------------|----------|----------|--------------|--------|--------|
| | 14 | 28 | 42 | 14 | 28 | 42 | 14 | 28 | 42 |
| | -----Días después del trasplante----- | | | | | | | | |
| 10 | 22.32 a | 22.47 a | 55.28 b | 1.76 a | 18.51 c | 55.77 b | 2.10 a | 3.85 a | 2.47 a |
| 12 | 2.48 a | 21.07 a | 60.95 ab | 2.00 a | 19.54 bc | 68.80 ab | 2.10 a | 3.57 a | 3.25 a |
| 14 | 2.54 a | 24.99 a | 68.92 a | 2.03 a | 21.47 ab | 77.07 a | 2.10 a | 3.22 a | 2.22 a |
| 16 | 2.78 a | 23.06 a | 68.95 a | 2.11 a | 22.19 a | 80.32 a | 2.07 a | 3.17 a | 2.30 a |
| DHS [§] | 0.81 | 4.59 | 8.71 | 0.80 | 2.28 | 11.2 | 0.26 | 0.88 | 0.40 |
| CV (%) | 15.43 | 9.55 | 6.53 | 19.33 | 5.33 | 8.88 | 5.97 | 12.19 | 8.23 |

[†]Promedios con mismas letras en cada columna, no presentan diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

[§]DHS: diferencia honesta significativa.

Altos valores de área foliar sugieren una mayor actividad fotosintética laminar (Barraza *et al.*, 2004). Altos niveles de K permiten un uso eficiente del N, que resulta en un mejor crecimiento

vegetativo conforme aumenta el N y K; en trigo se ha reportado una menor actividad de la enzima glutamino sintasa cuando el K se encuentra en forma deficiente; el potasio estimula la síntesis de proteína foliar (IPNI, 1998), condición que puede favorecer la expansión de la lámina foliar de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación en el aumento del área foliar por efecto de la concentración de K en la solución nutritiva (Cuadro 4).

Un estatus deficiente de N en la planta, se relaciona con dos irregularidades: la primera, una reducción de la eficiencia del uso de la radiación; la segunda, la fotosíntesis es reducida como una función de la concentración de nitrógeno foliar específica (Sinclair y Amir, 1992; Van Keulen y Seligman, 1987; Tabourel-Tayot y Gastal, 1998).

1.3.2. Biomasa seca vegetativa

El N aplicado en etapa vegetativa desde 10 a 16 mol_c m⁻³ aumentó la BSV en el orden del 16.6 y 30.6% a los 28 y 42 DDT (Cuadro 3). Asimismo, concentraciones crecientes del K, aumentaron significativamente la BSV. A la concentración de K con 11 y 13 mol_c m⁻³, correspondió la mayor respuesta en BSV (Cuadro 4). Este resultado coincide con el aumento en el AF, de tal forma que ambas variables pueden asociarse al suministro de diferentes concentraciones de N y K.

La producción de materia seca presenta un crecimiento exponencial o sigmoideo en los primeros días de desarrollo del cultivo de acuerdo a lo señalado por Hunt (1981), Radosevich y Holt (1984) y Gardner *et al.* (1985), seguido de un fase de crecimiento lineal o tasa de crecimiento constante (Heuevelink, 1995), lo cual coincide con los resultados obtenidos en biomasa seca vegetativa por aumentos promedio del orden de 38.9, 32.2 y 6.07 g como diferencias entre el muestreo final e inicial, desde el primero, segundo, tercero y cuarto muestreo (Cuadro 4).

Aunque el K juega numerosas funciones en la nutrición de las plantas, no está incorporado en la estructura de los compuestos orgánicos. Este nutrimento actúa como activador de enzimas esenciales en la fotosíntesis y respiración, además de otras necesarias para formar almidón y proteínas. Es el segundo elemento mineral de mayor concentración en el tejido vegetal; Jones (2008) señala que en tomate, el rango de suficiencia foliar de este nutrimento oscila entre 2.5 y 5

% con base en materia seca; pero como ocurre con el N y P, la concentración de K en la planta inicialmente es alto y posteriormente declina con la edad.

1.3.3. Relación peso seco de hojas y tallos (H/T)

Para la relación H/T, el N no presentó efectos en los muestreos realizados durante la etapa vegetativa (Cuadro 3). A excepción del tercer muestreo (152 DDT), no se obtuvieron efectos significativos en la relación H/T (Cuadro 4), debido al K evaluado en etapa reproductiva. A pesar de existir diferencias estadísticas y una tendencia de incremento en esta variable a los 152 DDT, no se encontraron diferencias estadísticas tanto en la menor concentración con 5 mol_c m⁻³, como en la concentración más alta con 13 mol_c m⁻³ de K aplicado en etapa reproductiva. Es importante señalar que un incremento en esta variable puede aumentar el potencial de producción de fotosintatos, debido a una mayor proporción de hojas con respecto a los tallos.

Cuadro 4. Efecto de la concentración de K aplicado en la solución nutritiva en el área foliar, biomasa seca vegetativa y relación peso seco de hojas y tallos (H/T) del cultivo de tomate en hidroponía en etapa reproductiva.

| K mol _c m ⁻³ | Área foliar (dm ²) | | | | Biomasa seca vegetativa (g) | | | | Relación (H/T) | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|---------|---------|-----------------------------|---------|--------|---------|----------------|------|-------|------|
| | 69 | 126 | 152 | 170 | 69 | 126 | 152 | 170 | 69 | 126 | 152 | 170 |
| | -----Días después del trasplante----- | | | | | | | | | | | |
| 5 | 88.1b | 106.8d | 134.2d | 134.5c | 119.5c | 157.8 c | 184.8b | 189.5b | 1.9a | 1.5a | 1.9ab | 1.8a |
| 7 | 89.9b | 108.9d | 137.0cd | 138.51c | 119.6c | 157.7 c | 189.1b | 194.2b | 1.9a | 1.5a | 1.86b | 1.9a |
| 9 | 93.6b | 115.1c | 142.7c | 144.5b | 125.1bc | 163.2bc | 192.9b | 198.7 b | 1.9a | 1.6a | 2.0ab | 1.8a |
| 11 | 100.2a [¶] | 120.6b | 152.8b | 155.2a | 130.8a [¶] | 170.8 a | 207.9a | 214.7 a | 1.9a | 1.6a | 2.0ab | 1.8a |
| 13 | 102.4a | 126.7a | 159.2a | 159.0a | 133.7a | 173.9 a | 209.6a | 217.5 a | 1.9a | 1.6a | 2.05a | 1.9a |
| DHS [§] | 5.8 | 4.5 | 6.3 | 6.0 | 5.9 | 7.8 | 11.2 | 10.0 | 0.19 | 0.15 | 0.17 | 0.24 |
| CV (%) | 6.2 | 4.0 | 4.3 | 4.1 | 4.7 | 4.7 | 5.7 | 5.0 | 10.0 | 10.0 | 8.8 | 12.6 |

[¶]Promedios con mismas letras en cada columna, no presentan diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

[§]DHS: diferencia honesta significativa.

Los valores de esta relación tienden a disminuir al incrementar la edad de las plantas, que de acuerdo a Sarmah *et al.* (1994), en las etapas iniciales del crecimiento las plantas destinan la mayor parte de los fotosasimilados a sus estructuras vegetativas y al desarrollo de su aparato fotosintético. En cambio al establecerse la fase reproductiva con el crecimiento en número y tamaño de órganos fructíferos, los fotosasimilados se destinan a los órganos reproductivos (Escalante-Estrada, 1995).

1.3.4. Índice de área foliar (IAF)

En el IAF los efectos del N se observaron hasta los 42 DDT, con un aumento del 10 % por concentraciones de 10 a 16 mol_c m⁻³ (Figura 2a). En etapa reproductiva (Figura 2b), concentraciones crecientes de K de 5 a 13 mol_c m⁻³, resultaron en un aumento en el IAF. Al alto nivel de K, le correspondió el mayor IAF con incrementos de 14.4, 15.8, 15.7 y 15.2 % desde 5 a 13 mol_c m⁻³ de K. Un manejo óptimo del cultivo de tomate en invernadero, que genere mayor IAF, posibilita un mayor potencial productivo del cultivo.

La morfogénesis desempeña un papel central en la regulación del consumo de N por la planta, debido a que en condiciones limitantes, este elemento se invierte en la formación de estructuras vegetales y cuando el mayor crecimiento se alcanza, este nutrimento se almacena (Jeuffroy *et al.*, 2002). Esto es coherente con la estrecha relación entre el índice de área foliar y la absorción de N (Grindlay, 1997; Elia y Conversa, 2012), lo que coincide con los resultados de esta investigación puesto que el índice de área foliar incrementa notablemente en función de las concentraciones de N en la solución nutritiva (Figura 2a).

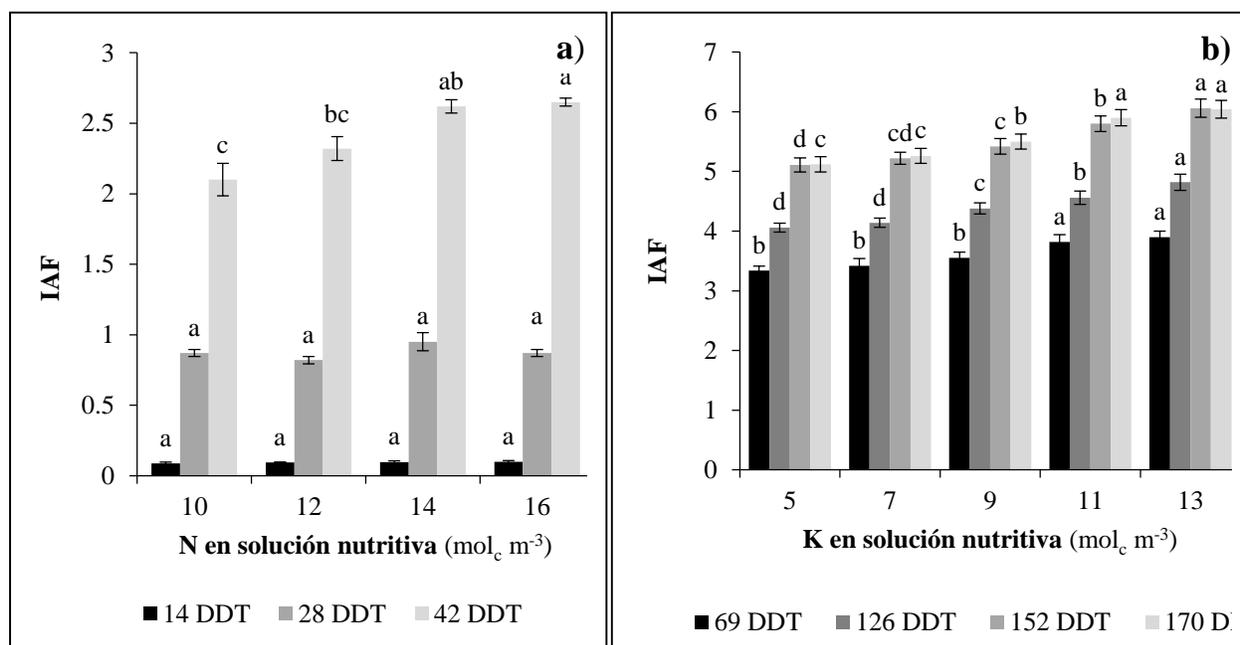


Figura 2. El índice de área foliar (IAF) en etapa vegetativa (a) y en etapa reproductiva (b). Barras en días después del trasplante (DDT) ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

En plantas cultivadas, el nitrógeno generalmente ocasiona incrementos en el área foliar (AF) y en el índice de área foliar (IAF); McCullough *et al.* (1994) señala que puede ser producto de un mayor número y tamaño de hojas; aunque también, se han reportado efectos positivos en el IAF por el incremento en el suministro de N durante el cultivo de tomate (Le Bot *et al.* 1997; Tei *et al.*, 2002; Elia y Conversa, 2012), situación que se observó en esta investigación (Figura 2a). El tamaño y la duración de la maquinaria fotosintética se relacionan con el rendimiento, por tanto las estrategias dirigidas al incremento de éstos, pueden resultar en un rendimiento más alto.

1.3.5. Duración de área foliar

La DAF presentó diferencias estadísticas hasta el tercer muestreo en respuesta al incremento en la concentración de N. La DAF más alta se encontró con 14 y 16 mol_c de N (Figura 3a) evaluado en etapa vegetativa. No obstante, en etapa reproductiva, la DAF presentó diferencias significativas por efecto de los niveles de K. Conforme aumentó la concentración de K, la DAF se incrementó, obteniéndose los valores más altos con 11 y 13 mol_c m⁻³. Un incremento del K en la solución nutritiva de 5 a 13 mol_c m⁻³ ocasionó aumentos de la DAF en el orden de 13.9, 14.9, 15.7 y 15.6 %, para el primero, segundo, tercero y cuarto muestreo, respectivamente (Figura 3b). El aumento en la DAF supone un incremento potencial en la producción de fotoasimilados, traduciéndose al mismo tiempo en un mayor rendimiento de biomasa seca.

La duración del área foliar incrementó inicialmente hasta el segundo muestreo a partir del cual tendió a disminuir, debido a que la capacidad para realizar fotosíntesis por parte de las hojas aumenta hasta la madurez, disminuyendo luego con la edad ya que la senescencia reduce la capacidad fotosintética de la hoja, proceso que va acompañado de una aceleración en la degradación de las clorofilas (Cayón, 1992); asimismo, también se observó que al incrementar las concentraciones de N se incrementó la duración del área foliar (DAF) (Figura 3a). Algunos estudios han demostrado que el N retrasa la pérdida de clorofila (Debata y Murty, 1983), aumenta su contenido por incrementos del N en la fertilización (Kichey *et al.*, 2006) y así se tiene una mayor duración de la actividad fotosintética. De esta manera, con la fertilización nitrogenada puede lograrse un retraso en la senescencia y en consecuencia una mayor duración del área foliar y producción de biomasa (Escalante, 1999). Como resultado en el aumento de la DAF, se promueve

un aumento en la absorción de la radiación fotosintéticamente activa (Novoa y Loomis, 1981; Muchow y Davis, 1988; Tei *et al.*, 2002).

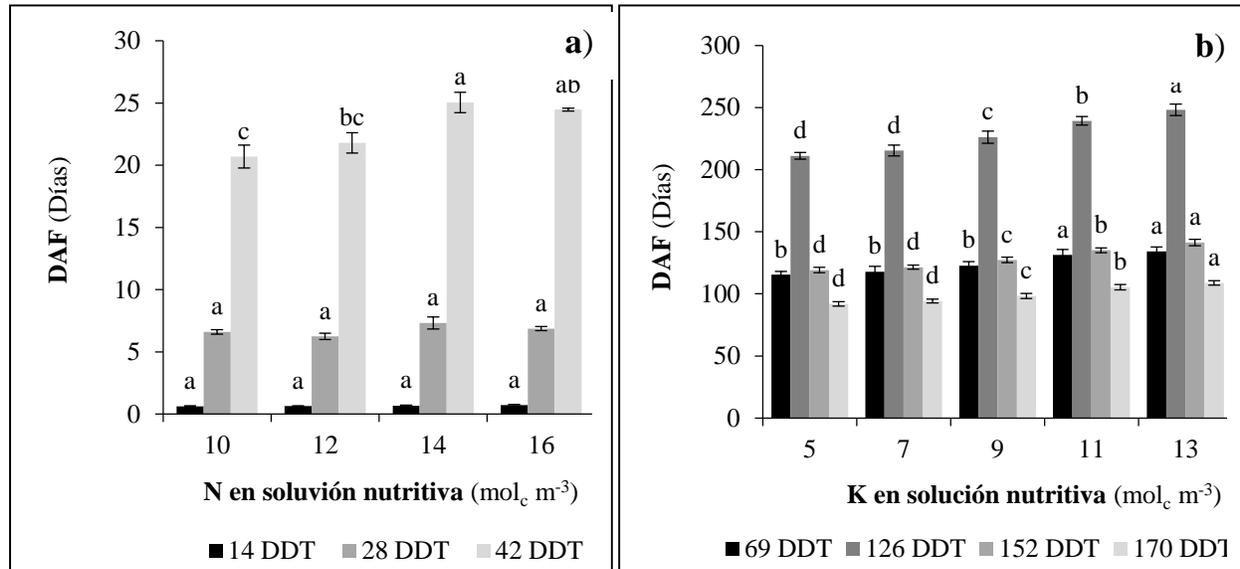


Figura 3. Efecto de la concentración de N y K en la solución nutritiva del cultivo de tomate sobre la duración del área foliar (DAF) en etapa vegetativa (a) y en etapa reproductiva (b). Barras en días después del trasplante (DDT) ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

1.3.6. Análisis de tasas de crecimiento

1.3.6.1. Tasa de asimilación neta (TAN)

La eficiencia fotosintética en etapa vegetativa aumentó inicialmente, pero disminuyó conforme avanzó el ciclo de cultivo. El comportamiento de la TAN se ajustó a un modelo de tipo lineal positivo y cuadrático negativo con efectos por N y días después del trasplante (DDT) (Cuadro 5). En este sentido, la más alta eficiencia de los folíolos en la fotosíntesis se presentó a los 22 DDT con 144, 147, 151 y 154 mg dm⁻² d⁻¹; con el avance del ciclo de cultivo hasta los 42 DDT, la TAN disminuyó hasta valores mínimos de 86, 90, 93 y 97 mg dm⁻² d⁻¹, con respecto a los niveles de N en la solución nutritiva de 10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³ (Figura 4a). Asimismo, el N de 10 a 16 mol_c m⁻³ elevó la TAN, con incrementos del 8, 7.9 y 12.6 % a los 14, 28 y 42 DDT, respectivamente (Figura 4b).

Posteriormente, en etapa reproductiva esta expresión del crecimiento disminuyó gradualmente hasta hacerse asintótico al final del ciclo, ajustándose a un modelo con tasas de cambio lineal y

con exponente en DDT del tipo 3/4 (Cuadro 5). El N y K evaluados en ambas etapas no afectaron la TAN, siendo el tiempo (DDT) el único factor que modificó la tendencia del crecimiento en esta etapa. De esta forma, la máxima eficiencia fotosintética foliar se presentó a los 69 DDT con 87 mg dm⁻² d⁻¹, la cual disminuyó hasta obtener 4 mg dm⁻² día⁻¹ a partir de los 152 DDT (Figura 6a).

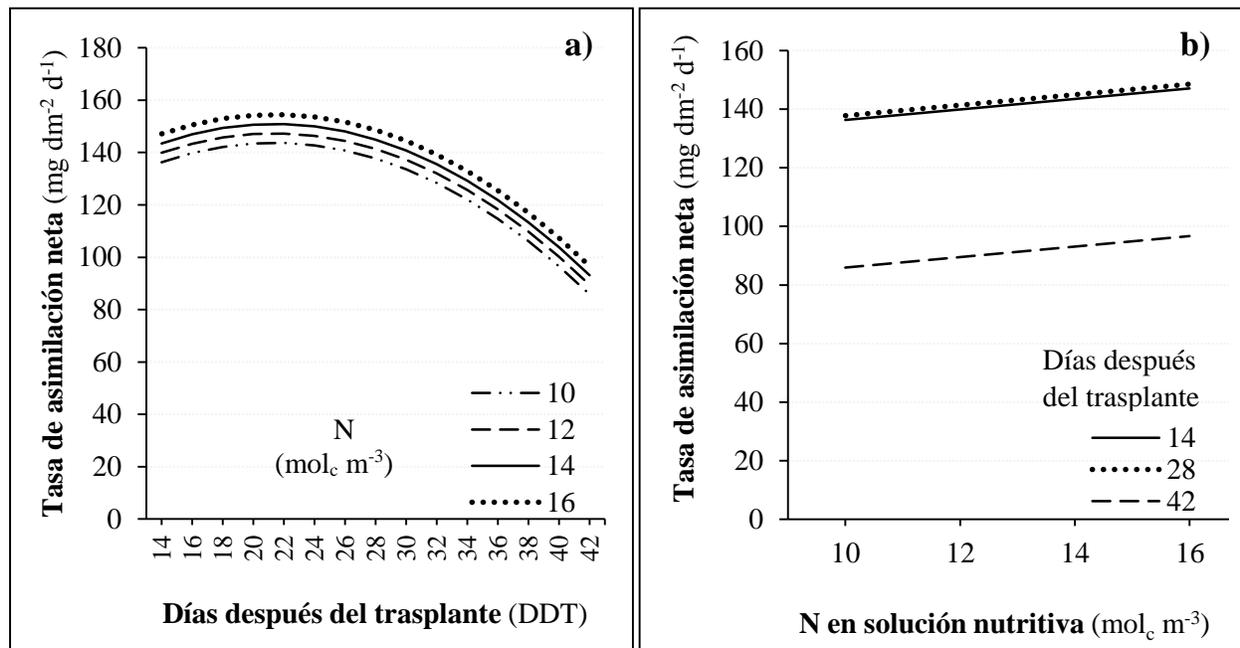


Figura 4. Tasa de asimilación neta en función del tiempo (a) y de la concentración de N en la solución nutritiva (b), durante la etapa vegetativa del cultivo de tomate. Estimados por el modelo (Cuadro 5).

La TAN, mostró el comportamiento señalado por Cayon (1992), es decir que aumenta inicialmente y decrece con la edad de la planta (Figuras 4a y 6a), en virtud de que el área foliar en las primeras etapas fenológicas, se va incrementando constantemente por el desarrollo de las hojas nuevas del cultivo (Segura *et al.*, 2006), las cuales están más expuestas a la radiación y son más eficientes en la captación de CO₂ (Carranza *et al.*, 2009), y con ello la tasa de producción de asimilados producto de la fotosíntesis aumenta. Posteriormente, al transcurrir el tiempo, el follaje se incrementa y con ello, las hojas más externas producen sombreado a las hojas internas de tal manera que disminuye su actividad fotosintética (Barraza *et al.*, 2004); debido por un lado a su baja concentración de clorofila y niveles de proteínas solubles (Azofeifa y Moreira, 2004); y por otro, empiezan a senescer. Aunado a lo anterior los fotoasimilados son exportados principalmente a los frutos los cuales en tomate llegan a representar hasta el 72 % de la materia seca total (Peil y Galvez, 2005), por tanto, la TAN en etapa reproductiva se reduce. Aunado a esto, la radiación solar también tiende

a decrecer el final del cultivo (Figura 1) puesto que es invierno y los días son más cortos, lo que puede incidir en la TAN, según lo señalado por Shibles (1987).

Al incrementar la concentración del N en la solución nutritiva en esta investigación se observó que la TAN aumenta (Figura 4b), lo cual puede deberse al incremento de la cantidad de nitrógeno en la hoja y por tanto se eleva la fotosíntesis, según lo señalado por Chechin y De Fatima (2004). La capacidad fotosintética de las hojas se relaciona con el contenido de nitrógeno, porque las proteínas del ciclo de Calvin y los tilacoides representan la mayor parte del nitrógeno en la hoja. Se han reportado relaciones positivas en el contenido del N y el contenido de RuBP carboxilasa y clorofila, de tal manera que esta condición posibilita mayor captación de CO₂ (Evans, 1989).

Cuadro 5. Modelos de mejor ajuste de las tasas de crecimiento en etapa vegetativa y reproductiva del cultivo de tomate hidropónico.

| Tasa de crecimiento | Modelo | <i>P-value</i> |
|---------------------------------------|---|----------------|
| ----- <i>Etapa vegetativa</i> ----- | | |
| TAN | Y= 63.464+1.806*N +5.816*DDT- 0.136*DDT ² CME 172.108 CV 9.1 % R ² 0.789 | <.0001 |
| TCR | Y= 58.18659-2.24954*N+8.20921*DDT- 0.19527*DDT ² CME 123.00231 CV 8.0 % R ² 0.924 | <.0001 |
| TCC | Y= 0.51063+0.16565*DDT+ 0.00795*DDT ² + 0.00135*NDDT ² - 0.00001139* N ³ DDT ² CME 0.39116 CV 9.81 % R ² 0.989 | <.0001 |
| ----- <i>Etapa Reproductiva</i> ----- | | |
| TAN | Y= 87.42622+2.83946*DDT- 11.58653*DDT ^{0.75} CME 17.09178 CV 15.6 % R ² 0.987 | <.0001 |
| TCR | Y= 69.93256+2.32058*DDT- 9.43408*DDT ^{0.75} CME 8.15264 CV 13.7 % R ² 0.990 | <.0001 |
| TCC | Y= 6.63994-0.07918*DDT+ 0.00029733*DDT ² + 0.04714*K CME 1.00055 CV 27 % R ² 0.795 | <.0001 |

N= nitrógeno; DDT= días después del trasplante; K= potasio; CME= cuadrado medio del error; CV=coeficiente de variación.

1.3.6.2. Tasa de crecimiento relativo (TCR)

En etapa vegetativa, la TCR presentó un aumento inicial y disminución posterior, determinados éstos por la influencia del tiempo DDT, mientras que el N mostró un efecto mínimo. Esta tendencia

definió un modelo de mejor ajuste con tasas de incremento lineal en N y con DDT lineal y cuadrático negativo, los cuales describen mejor su itinerario de crecimiento durante los primeros 42 DDT (Cuadro 5). En esta etapa, la mayor TCR se registró a los 22 DDT con variaciones de 167, 171, 176 y 180 mg dm⁻² día⁻¹ debido a concentraciones de N de 10 a 16 mol_e m⁻³, generando incrementos del 2, 5 y 8 % (Figura 5a). Aunado a lo anterior, la TCR mostró relación directamente proporcional con incrementos de la concentración del N en la solución nutritiva, los cuales fueron del orden del 9 % a los 14 y 28 DDT y del 17 % a los 42 DDT, evidenciando este resultado un mayor efecto de este nutrimento con el transcurso de esta etapa fenológica (Figura 5b). Finalmente, los valores de ganancia de biomasa por cada gramo presente se redujeron al culminar este periodo de evaluación a los 42 DDT con valores mínimos de 81, 86 90 y 95 mg dm⁻² día⁻¹, para los tratamientos de N con 10, 12, 14 y 16 mol_e m⁻³, respectivamente.

En etapa reproductiva, la TCR mostró una reducción abrupta hasta ser casi constante al final del ciclo a los 170 DDT. Esta proyección de la TCR, ajustó a un modelo con tasas de cambio lineal y con exponente fraccionario (3/4) en DDT, siendo este último término del modelo el responsable del descenso drástico de esta variable determinada (Cuadro 5). El N y K evaluados en las etapas vegetativa y reproductiva no presentaron efectos sobre la eficiencia de producción de biomasa, siendo el tiempo (DDT) el único determinante en su variación. De esta manera, la mayor eficiencia de producción de materia seca se obtuvo a los 69 DDT con 70 mg dm⁻² d⁻¹, seguido de una disminución drástica hasta llegar a ser constante e insignificante a partir de los 142 DDT con 3.7 mg dm⁻² d⁻¹ a los 170 DDT (Figura 6b), dado que el cultivo se encontraba en senescencia.

La TCR mostró el mismo comportamiento que la TAN (Figuras 4a y 5a), puesto que ambas son dependientes de la fotosíntesis, de la respiración, del tamaño de las hojas y de la arquitectura de la planta (Gardner *et al.*, 1985). En esta investigación, la TCR mostró un incremento en la etapa vegetativa, debido al constante desarrollo del tejido foliar donde la mayoría puede fotosintetizar y los asimilados pueden reinvertirse (Azofeifa y Moreira, 2004) en el desarrollo de nuevo tejido foliar. Además, el creciente tejido foliar también fué influenciado por los tratamientos con N (Figura 5b), lo cual coincide con Schenk (1996) quien reportó efectos positivos en la TCR y la absorción de N. Este nutrimento promueve una mayor área foliar (Poorter y Evans, 1998; Lovelock *et al.*, 2004) con lo que se incrementa la fotosíntesis (Dai y Wiegert, 1997). De esta manera se

mejora tanto la tasa de asimilación del CO_2 por las hojas, como el uso de la radiación solar por las mismas, de acuerdo a lo reportado por Sinclair y Horie, (1989) en maíz, soya y arroz. El incremento de la fotosíntesis promueve una mayor eficiencia de la planta en la producción de materia seca, con lo cual se fomenta un mejor balance entre la fotosíntesis y la respiración (Carranza *et al.*, 2009; Sivakumar y Shaw, 1978).

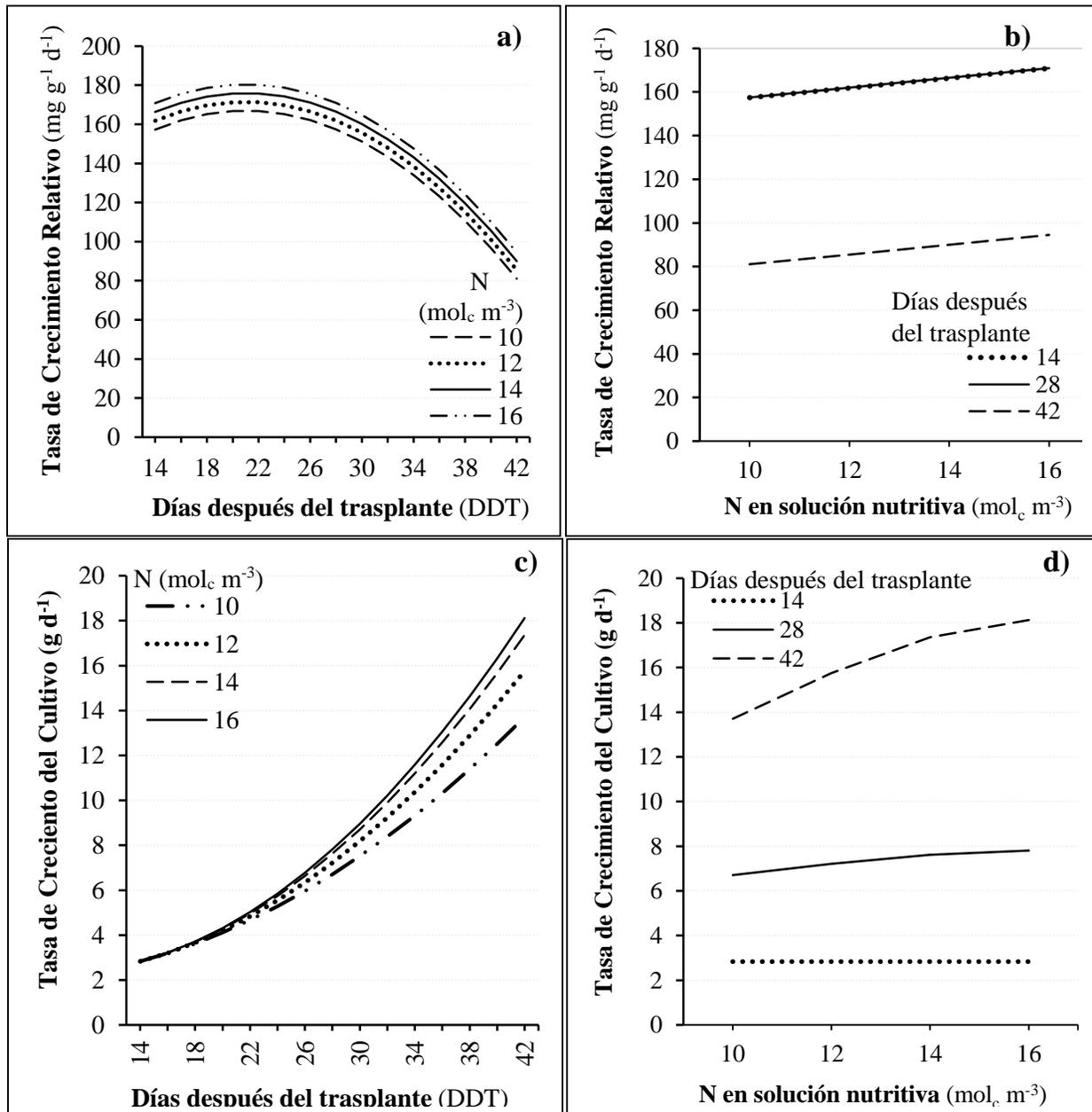


Figura 5. Tasa de crecimiento relativo (a) y Tasa de crecimiento del cultivo (c), en función del tiempo y Tasa de crecimiento relativo (b) y tasa de crecimiento del cultivo (d) en función de la concentración de N en la solución nutritiva, durante la etapa vegetativa del cultivo de tomate. Est. por el modelo (Cuadro 5).

En papa, la TCR presenta valores altos al inicio del ciclo de cultivo y posteriormente disminuye progresivamente al concluir el ciclo, coincidiendo con el inicio de la senescencia del tejido foliar (Santos *et al.*, 2010). Este reporte concuerda con los resultados de esta investigación debido a que la TCR presentó los valores más altos al inicio de la etapa reproductiva, y disminuyó drásticamente al término del ciclo de evaluación del experimento (Figura 6b). Este comportamiento puede deberse a que el cultivo se encontraba en etapa de producción de frutos los cuales demandan del 52 hasta el 72 % de materia seca total de la planta, según lo indicado por Peil y Galvez (2005) y aunado a lo anterior, las hojas empiezan a senescer.

1.3.6.3. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)

La TCC presentó un aumento gradual hasta un máximo al final del ciclo del ciclo vegetativo del tomate. El comportamiento de la TCC fue producto del efecto lineal y cuadrático de DDT, además de su interacción con N lineal y N cúbico (Cuadro 5 y Figuras 5c y 5d). La menor TCC se tuvo a inicios del ciclo vegetativo (14 DDT) con 3 g d^{-1} . Posteriormente aumentó de manera gradual hasta el final de esta etapa fenológica, con valores máximos a los 42 DDT de 13.7, 15.7, 17.4, y 18.1 g d^{-1} , los cuales variaron por la concentración de N (10 a $16 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$) y su interacción con el tiempo (Figura 5c). A pesar de que el N evaluado en esta etapa influyó el comportamiento de la TCC, sus efectos empezaron a notarse a los 28 DDT y fueron a los 42 DDT cuando se obtuvo una respuesta significativa y positiva, cuyos valores representaron incrementos del 15, 27 y 32 % debido a las concentraciones crecientes de N de 10 a $16 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ (Figura 5d).

En etapa reproductiva, la TCC exhibió una reducción lenta desde el inicio hasta la conclusión del periodo de evaluación del cultivo. Esta proyección del crecimiento fue consecuencia del tiempo DDT en la forma lineal negativa, cuadrática (como resultado de la senescencia de maquinaria fotosintética y por competencia de las estructuras reproductivas) y del K con efectos mínimos (Cuadro 5). Mientras que el N no produjo efectos sobre esta variable debido a que durante este periodo, la planta contaba solo con efectos residuales de este nutriente impuesto en el periodo vegetativo del cultivo. En este contexto, los máximos valores de TCC con 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 y 7 g d^{-1} , se observaron al inicio (69 DDT) de este periodo con variaciones mínimas (1, 3, 4 y 6 %) debido al aumento de K con 5 a $13 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$; y en seguida disminuyó gradualmente hasta obtener valores de 1.67, 1.77, 1.86, 1.96 y 2.05 g d^{-1} a los 170 DDT (Figura 6c). Aun cuando el K influyó

mínimamente la TCC, a los 170 DDT se observaron sus efectos más notorios con aumentos del 6, 11, 17 y 23 % por concentraciones crecientes de este nutrimento de 5 a 13 mol_c m⁻³ (Figura 6d).

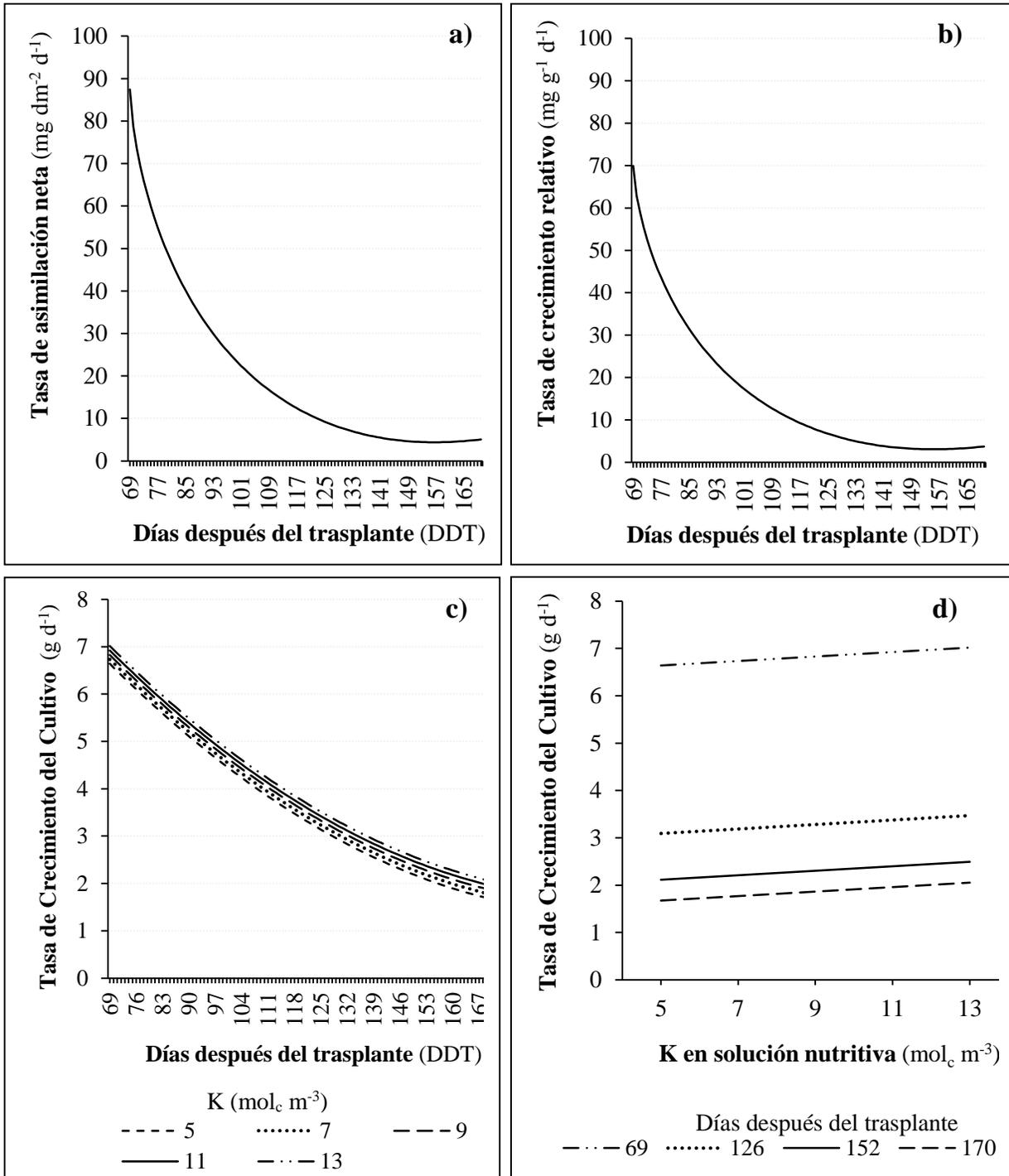


Figura 6. Tasa de asimilación neta (a), tasa de crecimiento relativo (b) y tasa de crecimiento del cultivo (c) en función del tiempo y de la concentración de K en la solución nutritiva (d) durante la etapa reproductiva del cultivo de tomate. Valores estimados por el modelo (Cuadro 5).

La tasa de crecimiento del cultivo mostró valores más bajos al inicio de la etapa vegetativa, pero posteriormente exhibió un aumento paulatino hasta un máximo (Figura 5c); mientras que en etapa reproductiva resultó en una disminución gradual con los menores valores obtenidos al final del ciclo de este periodo (Figura 6c). Azofeifa y Moreira (2004) señalan que al inicio del crecimiento de las plantas, el área foliar y su tasa fotosintética es reducida, y los fotoasimilados producidos, son reinvertidos continuamente en la formación de nuevas estructuras vegetativas, lo cual favorece el aumento del área foliar; y como consecuencia de esta dinámica, la tasa de producción de fotoasimilados incrementa rápidamente. Posteriormente con la formación y desarrollo de estructuras reproductivas, éstas se convierten en los principales órganos de demanda de la planta, por lo que el crecimiento vegetativo disminuye. Al final del ciclo de cultivo, el peso acumulado de todos los frutos representa entre el 52 y 72 % del peso seco total acumulado por la planta de tomate (Peil y Galvez, 2005).

De todos los elementos esenciales, el N ejerce una gran influencia en el crecimiento de las plantas; su rango de suficiencia varía con la etapa de crecimiento, siendo alto en las etapas iniciales y disminuyen con la edad; en tomate, el contenido de N foliar para la suficiencia oscila de 2.7 a 5 % de materia seca (Jones, 2008). En este estudio el N evaluado en etapa vegetativa presentó efectos significativos, encontrándose relaciones directas positivas en la TCC con concentraciones crecientes de este nutrimento de 10 a 16 mol_c m⁻³ (Figura 5d); mientras que en etapa reproductiva este nutrimento no ejerció efectos sobre la TCC.

El K es un nutrimento que afecta los procesos fisiológicos y bioquímicos que influyen el crecimiento y metabolismo vegetal (Wang *et al.*, 2013). En el cultivo de tomate, se han reportado tasas de crecimiento reducidas por disminuciones en la absorción de K (Colpan, 2013). Contrario a lo anterior, en nuestros resultados se observó que a medida que incrementó la concentración de K en la solución nutritiva, incrementó la TCC, siendo más notable al final de la etapa reproductiva por aumentos hasta del 23 % por efecto de la mayor concentración de K en la solución nutritiva (13 mol_c m⁻³) (Figura 6d).

Los resultados obtenidos y analizados en etapa reproductiva del cultivo de tomate hidropónico en esta investigación fueron limitados por el despunte del ápice de las plantas como se indicó en

materiales y métodos (108 DDT). Aún cuando el cultivar de tomate “Charleston” es de hábito indeterminado, el despunte apical impuso ciertas limitaciones en el comportamiento de las variables respuesta. En este sentido, el AF, el IAF y la BSV presentaron incrementos hasta valores constantes o insignificantes a partir de los 152 DDT; y disminución en la DAF con los menores valores al final del ciclo. En el caso de la TAN, la TCR y la TCC, presentaron comportamientos característicos a cultivares con hábito de crecimiento determinado en virtud de que manifestaron reducciones hasta valores insignificantes y originados por la senescencia del cultivo al concluir el periodo de evaluación.

1.4. CONCLUSIONES

En etapa vegetativa, al aumentar la concentración de N de 10 a 16 mol_c m⁻³, se incrementa el área foliar, la biomasa seca vegetativa, el índice de área foliar y la duración de área foliar. Los valores más altos de estas variables, se obtienen con 14 a 16 mol_c m⁻³ de N aplicado en la solución nutritiva. El crecimiento del cultivo en este periodo se caracteriza por presentar tasas de asimilación neta, de crecimiento relativo y de crecimiento del cultivo, con ajuste de modelos del tipo cuadrático, las cuales varían por los efectos positivos impuestos por el N.

En etapa reproductiva conforme aumenta el K en la solución nutritiva, se obtienen efectos positivos sobre el área foliar, la biomasa seca vegetativa, el índice de área foliar y la duración de área foliar; estos efectos se traducen en incrementos significativos cuando la concentración de este nutrimento cambia de 5 a 11 mol_c m⁻³. Las tasas de asimilación neta y de crecimiento relativo se ajustan a modelos del tipo asintótico negativo, mientras que la tasa de crecimiento del cultivo se ajusta a un modelo lineal negativo y cuadrático, siendo este último, el único índice de crecimiento que muestra relaciones directas con el K evaluado durante esta etapa final del cultivo de tomate hidropónico.

1.5. LITERATURA CITADA

Alcántar, G. G. y M. V. Sandoval 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Chapingo, México. 156 p.

- Astegiano, E. D., J. C. Favaro y C. A. Bouzo. 2001. Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg. 16(2): 249-256.
- Azofeifa, A. y M. A. Moreira. 2004. Análisis de crecimiento del chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. Hot), en Alajuela, Costa Rica. Agronomía Costarricense 28(1): 57-67.
- Barraza, F. V., G. Fischer y C. E. Cardona. 2004. Estudio del proceso de crecimiento del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, Colombia. Agronomía Colombiana, 22(1): 81-90.
- Blackburn, W.J and J.T.A.Proctor, 1983. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. Solar Energy, 31(2): 233-234.
- Carranza, C., O. Lancho, D. Miranda y B. Chaves. 2009. Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) ‘Batavia’ cultivada en un suelo salino de la sabana de Bogotá. Agronomía Colombiana 27(1): 41-48.
- Casierra, P., F. y M. P. Cardozo. 2009. Análisis básico del crecimiento en frutos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. ‘Quindo’) cultivados a campo abierto. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, Col. 62(1): 4815-4822.
- Cayón, G. 1992. Fotosíntesis y productividad de cultivos. Revista COMALFI 19(2), 23-31.
- Chechin, I., and F.T. De Fátima 2004. Effect of nitrogen supply on growth and photosynthesis of sunflower plants grown in the greenhouse. Plant Science 166: 1379–1385.
- Colpan, E., M. Zengin, and A. Ozbahce. 2013. The effects of postassium on the yield and the fruit quality componentes of stick tomato. Hort. Environ. Biotechnol. 54(1):20-28.
- Dai, T. and R.G. Wiegert, 1997. A field study of photosynthetic capacity and its response to nitrogen fertilization in *Spartina alterniflora*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 45: 273–283.
- Debata, A. y K.S. Murty. 1983. Effect of foliar application of nitrogen, phosphorus and potassium salts on flag leaf senescence in rice. Agric. Sci. Dig. 1: 23-26.
- Dumas, Y. 1990. Tomatoes for processing in 90’s: nutrition and crop fertilization. Acta Hort. 227: 155-166.
- Elia, A., and G. Conversa. 2012. Agronomic of physiological responses of a tomato crop to nitrogen input. European Journal of Agronomy 40:64-74.

- Escalante, E. J. A. 1999. Area foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra*. 17(2):149-157.
- Escalante-Estrada, J. A. 1995. Aprovechamiento del recurso agua en cultivos de secano. En: Dosis de nitrógeno y su efecto en la producción y distribución de biomasa de algodón transgénico *Terra Latinoamericana* pp. 28-32.
- Escalante-Estrada, J. A., J. Kohashi-Shibata. 1993. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. México.
- Evans R. J. 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia* 78: 9-19.
- Gardner, F.P., R. B. Pearce and R. L. Mitchell. 1985. *Physiology of crop plants*. Iowa State University Press, USA. 325 p.
- Grindlay, D.J.C. 1997. Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf nitrogen per unit leaf area. *Journal of Agricultural Science* 128, 377–396.
- Hernández-Díaz, M. I., M. Chailloux-Laffita, Moreno-Placeres V., Ojeda-Veloz A., Salgado-Pulido J. M. y Bruzón-Guerrero O. 2009. Relaciones nitrógeno-potasio en fertirriego para el cultivo protegido del tomate en suelo ferralítico rojo. *Pesq. Agropec. Bras.* 44(5) p.429-436
- Heuvelink, E. 1995. Growth, development and yield of a tomato crop: periodic destructive measurements in a greenhouse. *Scientia Horticulturae* 61: 77-99.
- Hunt, R. 1978. Chap. Plant growth analysis. Edward Arnold Publishers, London. 67 p.
- Hunt, R. 1981. *Plant Growth Analysis*. The Institute of Biology's Studies in Biology No. 96. Edward Arnold Publishers LTD. London.
- IPNI. 1998. Potassium interactions with other nutrients. *Better Crops*, 82(3): 12-13.
- Jeuffroy, M. H., B. Ney and A. Ourry. 2002. Integrated physiological and agronomic modeling of N capture and use within the plant. *Journal of Experimental Botany* 53(370): 809-823.
- Jones J., B. J. 2008. *Tomato Plant Culture in the field, greenhouse and Homegarden*. 2a Ed. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, Fl. 282 p.
- Kichey, T., E. Heumez, D. Pocholle, K. Pageau, H. Vanacker, F. Dubois, J. L. Gouis, and B. Hirel. 2006. Combined agronomic and physiological aspects of nitrogen management in wheat highlight a central role for glutamine synthase. *New Phytologist*, 169: 265-278.
- Lara, H. A. 1999. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra* 17(3): 221-229.

- Le Bot, J., J.L. Andriolo, C., Gary, S., Adamowicz, and P. Robin, 1997. Dynamics of N accumulation and growth of tomato plants in hydroponics: an analysis of vegetative and fruit compartments. In: Lemaire, G., Burns, I. (Eds.), *Diagnostic Procedures for Crop N Management*, Colloques de l'INRA, vol. 82. INRA Editions, Paris, pp. 37-51.
- Lovelock, C. E., I. C. Feller, K. L. Mckee, B. M. J., Engelbrecht, and M. C Ball,. 2004. The effect of nutrient enrichment on growth, photosynthesis and hydraulic conductance of dwarf mangroves in Panamá. *Functional Ecology*. 18 (1): 25-33.
- McCullough, D.E., Ph. Girardin, M. Mihajlovic, A. Aguilera y M. Tollenaar. 1994. Influence of N supply on development and dry matter accumulation of an old and new maize hybrid. *Can. J. Plant Sci.* 74: 471-477.
- Melton, R. R. and R. J. Dufault. 1991. Nitrogen, phosphorus, and potassium fertility regimes affect tomato transplant growth. *HortScience* 26(2): 141-142.
- Muchow, R.C. y R. Davis 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semiarid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops. Res.* 18: 17-30.
- Novoa, R. and R. S. Loomis, 1981. Nitrogen and plant production. *Plant Soil*. 58:177-204.
- Peil, R. M. y J. L. Galvez. 2005. Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de fruto cultivadas en invernadero. *R. bras. Agrociencia*, 11(1):3-11.
- Poorter, H. and J.R. Evans, (1998) Photosynthetic nitrogen-use efficiency of species that differ inherently in specific leaf area. *Oecologia* 116, 26–37.
- Radosevich, S.R. y J. Holt 1984. *Wood ecology. Implications for vegetative manegement*. Jhon Wiley and Sons New York. 25-32 pp.
- Santos C. M., M. A. Segura y C. E. L. Núñez 2010. Analisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquerá (Cundinamarca, Colombia). *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 63 (1):5253-5266.
- Sarmah, P. C., S. K. Katyal, and A. S. Faroda. 1994. Response of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars to fertility level and plant population. *Indian J. Agron.* 39: 76-78.
- SAS, 2002. SAS, Software version 9. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Schenk, M. K. 1996. Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level. *Plant and Soil* 181, 131–137.

- Segura, M., M. Santos y C.E. Núñez. 2006. Desarrollo fenológico de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca). *Fitotecnia Colombiana* 6(2): 33-43.
- Shibles R. 1987. *Crop physiology*. Iowa State University, Iowa, USA. 214 p.
- Sinclair T. R., and T. Horie, 1989. Leaf Nitrogen, Photosynthesis, and Crop Radiation Use Efficiency: A Review. *Crop Sci.* 29:90–98.
- Sinclair, TR, J. Amir. 1992. A model to assess nitrogen limitations on the growth and yield of spring wheat. *Field Crops Research* 30, 63–78.
- Sivakumar, M.V.R. and R.H. Shaw. 1978. Methods of growth analysis in field growth soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). *Ann. Bot.* 42: 213-322.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In: *Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC*. Lunteren, Wageningen, The Netherlands. pp. 633-650.
- Tabourel-Tayot, F., Gastal F. 1998. MecaNiCAL. a supplydemand model of carbon and nitrogen partitioning applied to defoliated grass. 2. Parameter estimation and model evaluation. *European Journal of Agronomy* 9, 243–258.
- Taiz and Zeiger, 2002. *Plant growth*. In: Taiz L. and Zeiger E. *Plant Physiology*. Third edition. Pub. by Sinauer Associates. Pp. 339-374.
- Tei F., Benincasa, P., and Guiducci, M. 2002. Critical nitrogen concentration processing tomato. *Eur.J.Agron.* 18:45–55.
- Tekalign, T. and P.S. Hammes. 2005. Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and reproductive growth II. Growth analysis, tuber yield and quality. *Scientia Horticulturae* 105 (1): 29–44.
- Van Keulen, H., N.G. Seligman. 1987. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. PUDOC Wageningen.
- Volke, H., V., A. Turrent F. y A. M. Castillo 2005. Diseño de tratamientos y estimación de funciones de respuesta en la investigación agrícola. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México. 68 p.
- Wang, M., Q. Zheng, Q. Shen and G. Shiwei 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *Review. Int. J. Mol. Sci.* 14:7370-7390.

CAPÍTULO 2. CONCENTRACIÓN DE N Y K EN ÓRGANOS DE PLANTAS DE TOMATE HIDROPÓNICO Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO

RESUMEN

En este experimento se investigó la nutrición con N en etapa vegetativa (10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³ de solución nutritiva) y con K en etapa reproductiva (5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³) en el rendimiento y la concentración de ambos nutrimentos en hojas, tallos y frutos de tomate hidropónico. Se utilizó un diseño experimental en parcelas divididas, con N como parcela grande y K como parcela chica; resultaron 20 tratamientos con cuatro réplicas para las variables nutrimentales y seis para el rendimiento. La unidad experimental fue una planta por maceta con 13 L de tezontle rojo. Las variables evaluadas fueron: en etapa vegetativa, concentración de N en hojas y tallos; en etapa reproductiva, concentración de N y K en hojas tallos y frutos de seis racimos; y el rendimiento del primero, tercero y quinto racimo. En etapa vegetativa el N foliar y de tallos fueron afectados por la variación del N; mientras que en etapa reproductiva, la concentración de N y K de hojas, tallos y frutos fue afectado por las dosis crecientes de N y K durante el cultivo; aunque su interacción N*K afectó solamente el porcentaje de N en frutos. En etapa vegetativa, al elevar el N de 10 a 16 mol_c m⁻³, el N foliar y del tallo aumentó; mientras que en periodo reproductivo, además del N en la solución de cultivo, el nivel de K también incrementó el N en estos órganos y en frutos. Durante el periodo reproductivo del cultivo, aplicaciones de tasas crecientes de N (10 a 16 mol_c m⁻³) y K (5 a 13 mol_c m⁻³) incrementaron la concentración de K en hojas, tallos y frutos. Incrementos de K de 5 a 13 mol_c m⁻³, aumentaron el rendimiento. La nutrición por fases fenológicas mediante dosis de N y K en la solución nutritiva influyen en la concentración nutrimental de hojas, tallos y frutos, siendo este último afectado por la interacción N*K; y el rendimiento se relaciona positivamente solo con la concentración de K aplicado en el cultivo de tomate.

Palabras clave: racimos, frutos, *Solanum lycopersicum*, nutrición, tejido vegetal

2.1. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos más importantes del mundo. El fruto de esta hortaliza es parte constituyente de los principales componentes de la alimentación diaria

de la población de muchos países, ya que es una fuente importante de minerales, vitaminas y compuestos antioxidantes (Dorais *et al.*, 2001).

El cultivo bajo agricultura protegida permite controlar el suministro de agua y nutrimentos. Sin embargo, para proporcionar las condiciones óptimas de producción, es importante emplear soluciones nutritivas balanceadas y que cumplan los requerimientos nutrimentales de los cultivos (Zekki *et al.*, 1996). El N, es uno de los principales elementos estructurales en la mayoría de los compuestos vitales para el metabolismo vegetal (Togun *et al.*, 2003); asimismo, se ha demostrado que este nutrimento promueve la producción, partición y acumulación de materia seca en los cultivos (Akanbi *et al.*, 2007). En forma similar, el K es absorbido por las plantas superiores en mayores cantidades que otros nutrimentos, excepto por el N; por su gran requerimiento, este catión desempeña funciones esenciales en la síntesis de proteínas, metabolismo de carbohidratos, balance iónico, importante para el movimiento de metales pesados como el hierro, ayuda a superar y evitar las enfermedades y es importante en la formación del fruto (Melendez, 2011) además del metabolismo fotosintético. Sin embargo, existen estudios limitados donde ambos nutrimentos sean abastecidos de manera diferencial por etapas fenológicas, que reporten la dinámica de su absorción y distribución en los diferentes órganos vegetales. Por tanto, en este trabajo se propuso evaluar el efecto de concentraciones crecientes de N en etapa vegetativa y de K en etapa reproductiva en el rendimiento y la dinámica de su concentración en hojas, tallos y frutos de tomate producido en condiciones protegidas.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este experimento se realizó en invernadero y condiciones hidropónicas, empleando plántulas de tomate bola cv. Charleston (Rogers Seeds®) de 37 días de edad. El cultivo se estableció el 30 de junio y culminó el ciclo de evaluación hasta el 12 de diciembre del mismo año. Durante la etapa productiva, se hicieron raleos de frutos para conducir la producción a cuatro frutos por racimo.

2.2.1. Diseño de tratamientos y diseño experimental

En la solución nutritiva de cultivo, se evaluaron cuatro concentraciones de N (10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³) en etapa vegetativa y cinco concentraciones de K (5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³) en etapa reproductiva. La combinación de los niveles de N y K originó un total de 20 tratamientos, los

cuales se establecieron usando un arreglo factorial en parcelas divididas; donde el N fue designado como parcela grande; y el K como parcela chica. Cada tratamiento se replicó cuatro veces para las variables nutrimentales y seis veces para el análisis de rendimiento. La unidad experimental fue una planta en una maceta con 13 L de tezontle rojo (≤ 12 mm de diámetro de partícula).

2.2.2. Riego

El riego se hizo empleando la solución Steiner (1984) modificada en N y K de acuerdo a la etapa fenológica y a la concentración antes indicada. Durante los primeros 30 días después del trasplante (ddt) diariamente se aplicaron 8 riegos (5 min riego^{-1}) y 16 después hasta concluir el ciclo de cultivo (170 ddt) usando goteros de 4 L h^{-1} .

2.2.3. Variables evaluadas

Durante el transcurso del ciclo experimental, se efectuaron muestreos destructivos para evaluar las variables en las etapas de crecimiento vegetativo (primeros 45 ddt) y reproductivo (46 a 170 ddt). Las muestras vegetales se analizaron a los 14, 28 y 42 ddt en la etapa vegetativa y a los 69, 126, 152 y 170 ddt en la etapa reproductiva.

Para determinar la concentración nutrimental en cada muestreo, las plantas se separaron en hojas, tallos y frutos. Estas muestras se secaron en una estufa (Riosa HCF-125D, México) con circulación de aire a $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 72 h y hasta obtener peso seco constante (g) según Alcántar y Sandoval (1999). Posteriormente estos órganos vegetales se molieron en un molino de acero inoxidable.

2.2.3.1. N en hojas tallos y frutos

En etapa vegetativa se determinó la concentración de N en % con base en peso seco (PS) de tejido vegetal de hojas y tallos; mientras que en etapa reproductiva, además de estos órganos se analizó este nutriente en frutos de seis racimos cosechados completamente rojos. El análisis de N total se efectuó utilizando el método semimicro-Kjeldahl de acuerdo con Bremner (1965).

2.2.3.2. K en hojas, tallos y frutos

La concentración de K (% PS) en hoja, tallo y fruto durante la etapa reproductiva del cultivo, se determinó mediante digestión húmeda del tejido seco con una mezcla de ácidos perclórico y

nítrico, descrito por Alcantar y Sandoval (1999). Las muestras fueron analizadas en un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma (Agilent 725 Series ICP-OES).

2.2.3.3. Rendimiento

El rendimiento obtenido en gramos por planta, se cuantificó durante el ciclo de evaluación. Los frutos se cosecharon completamente maduros del primero, tercero y quinto racimo, correspondiendo a los 110, 131 y 167 ddt.

Con los datos experimentales obtenidos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y las medias se compararon con la prueba de Tukey DHS ($P \leq 0.05$). La verificación de los supuestos se realizó mediante las pruebas de homogeneidad de varianzas de Bartlett, Normalidad de Shapiro-Wilk y de Independencia de Durbin-Watson, los cuales resultaron razonablemente normales, con homogeneidad de varianzas e independientes con el programa SAS Ver. 9 (SAS, 2002).

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Concentración de N en hojas, tallos y frutos

Las diferentes concentraciones de N evaluadas ejercieron efectos en la concentración de N en hojas y tallos durante los primeros 28 ddt (Cuadro 1) de la etapa vegetativa. El aumento del N en la solución nutritiva (10 a 16 mol_c m⁻³) se tradujo en incrementos del 12.5 y 17.4 % en la concentración de este elemento en hojas a los 14 y 28 ddt, respectivamente. Esta misma tendencia se observó en tallos a los 14 y 28 ddt al incrementarse la concentración de N en 14.4 y 7 %, respectivamente. A pesar de que a los 42 ddt no se tuvieron efectos, si se observó una tendencia de incremento en el porcentaje de N de hojas y tallos a medida que aumentó la concentración de N en la solución nutritiva. El contenido de N en estos órganos ha sido asociado al aumento de la concentración del N durante el cultivo de tomate en campo (Grünzweig *et al.*, 1999).

En etapa reproductiva del cultivo, los efectos principales tanto de N como de K fueron significativos en la concentración de nitrógeno de hojas, tallos y frutos. Por el contrario, las interacciones N*K no afectaron significativamente esta variable, excepto en frutos del primero y segundo racimo (Cuadros 2, 3 y 4). Hobson and Grierson (1993) señalan que el fruto es el órgano

que tiende a demandar N en mayor medida con respecto a los otros órganos de la planta (Marouelli, 2014).

Cuadro 1. Efectos de la dosis de aplicación de N en la solución nutritiva en etapa vegetativa en la concentración de N (%) de hojas y tallos en tres fechas en tomate hidropónico.

| N (mol _c m ⁻³) | N en hojas (%) | | | N en tallos (%) | | |
|---------------------------------------|----------------------|----------|----------|-----------------|----------|-----------|
| | 14 ddt | 28 ddt | 42 ddt | 14 ddt | 28 ddt | 42 ddt |
| 10 | 5.463 b [¶] | 4.638 b | 4.179 a | 3.130 ab | 3.616b | 2.908 a |
| 12 | 5.836 ab | 5.136 ab | 4.690 a | 3.092 b | 3.815 ab | 2.870 a |
| 14 | 5.635 ab | 5.558 a | 4.550 a | 3.333 ab | 3.995 a | 2.948 a |
| 16 | 6.148 a | 5.443 ab | 4.179 a | 3.581 a | 3.868 ab | 3.312 a |
| DHS [†] | 0.6598 | 0.8518 | 0.6458 | 0.4892 | 0.3469 | 0.621 |
| Significancia | 0.0495* | 0.0321* | 0.489 ns | 0.0424* | 0.0450* | 0.1819 ns |

[¶] Promedios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); [†]diferencia honesta significativa; *significativo; ns: no significativo.

En hojas, en las tres primeras evaluaciones en la etapa reproductiva (69, 126 y 152 dd) se observó una relación positiva entre el nivel de aplicación de N en fase vegetativa y K en fase reproductiva y la concentración de nitrógeno de este órgano (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de N (%) en hojas de cuatro fechas de muestreo (ddt) en tomate hidropónico.

| Fuente de variación | N en hoja (%) en etapa reproductiva | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| N (mol _c m ⁻³) | 69 ddt | 126 ddt | 152 ddt | 170 ddt |
| 10 | 3.734 b [¶] | 3.084 b | 3.128 b | 2.5358 a |
| 12 | 3.917 ab | 3.1701ab | 3.058 b | 2.5470 a |
| 14 | 4.019 ab | 3.330 ab | 3.055 b | 2.5985 a |
| 16 | 4.149 a | 3.422 a | 3.885 a | 2.4973 a |
| DHS [†] | 0.393 | 0.2977 | 0.6188 | 0.1603 |
| Significancia | 0.0500 * | 0.0225* | 0.0043* | 0.3526 ns |
| K (mol _c m ⁻³) | | | | |
| 5 | 3.686 b | 2.867 b | 2.783 b | 2.4869 a |
| 7 | 3.901 ab | 3.169 ab | 3.117 ab | 2.5113 a |
| 9 | 3.984 ab | 3.331 a | 3.314 ab | 2.5441 a |
| 11 | 4.064 ab | 3.386 a | 3.453 a | 2.5966 a |
| 13 | 4.139 a | 3.505 a | 3.739 a | 2.5844 a |
| DHS | 0.4059 | 0.3686 a | 0.6544 | 0.2068 |
| Significancia | 0.0282 * | 0.0001* | 0.0023* | 0.5191 ns |
| N*K | | | | |
| Significancia | 0.8170 ns | 0.0630 ns | 0.0739 ns | 0.2509 ns |

[¶] Promedios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); [†]diferencia honesta significativa; *significativo; ns: no significativo.

Por un lado, al incrementar en la solución nutritiva la concentración de N de 10 a 16 mol_c m⁻³, la concentración foliar de N aumentó en 11, 11 y 24 % a los 69, 126 y 152 ddt, respectivamente; mientras que por otro lado, el cambio de K de 5 a 13 mol_c m⁻³, mostró un efecto similar, incrementando en 12, 22 y 34 % la concentración foliar de N a los 69, 126 y 152 ddt, respectivamente (Cuadro 2).

Asimismo, cuando el N se incrementó en la solución nutritiva de 10 a 14 mol_c m⁻³, la concentración de N en tallo aumentó en 35 y 34 % a los 69 y 126 ddt, respectivamente. Del mismo modo, el incremento en la concentración de K en la solución nutritiva en la fase reproductiva desde 5 a 13 mol_c m⁻³, aumentó en 22, 32 y 28 % la concentración de N en tallos a los 69, 126 y 152 ddt (Cuadro 3).

Cuadro 3. Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de N (%) en tallos de cuatro fechas de muestreo (ddt) en tomate hidropónico.

| Fuente de variación | N en tallo (%) en etapa reproductiva | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | 69 ddt | 126 ddt | 152 ddt | 170 ddt |
| N (mol _c m ⁻³) | | | | |
| 10 | 2.121 b [¶] | 2.069 b | 2.383 a | 2.137 a |
| 12 | 2.395 ab | 2.457 ab | 2.445 a | 1.970 a |
| 14 | 2.868 a | 2.766 a | 2.466 a | 2.216 a |
| 16 | 2.850 a | 2.258 ab | 2.771 a | 2.112 a |
| DHS [†] | 0.6661 | 0.667 | 0.7881 | 0.3545 |
| Significancia | 0.0150 * | 0.0492 * | 0.4895 ns | 0.2718 ns |
| K (mol _c m ⁻³) | | | | |
| 5 | 2.149 b | 1.893 b | 2.217 ab | 2.023 |
| 7 | 2.632 ab | 2.244 ab | 2.171 b | 2.180 |
| 9 | 2.584 ab | 2.509 a | 2.416 ab | 2.053 |
| 11 | 2.797 a | 2.791 a | 2.939 a | 2.089 |
| 13 | 2.631 ab | 2.499 ab | 2.838 ab | 2.199 |
| DHS | 0.5937 | 0.6167 | 0.7596 | 0.4393 |
| Significancia | 0.0425 * | 0.0024 * | 0.0141 * | 0.7327 ns |
| N*K | | | | |
| Significancia | 0.3620 ns | 0.6360 ns | 0.0523 ns | 0.5522 ns |

[¶] Promedios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$);

[†] diferencia honesta significativa; *significativo; ns: no significativo.

Por otra parte, la concentración de N en frutos del primero al quinto racimo se incrementó de manera significativa con el aumento de N en la solución nutritiva de 10 a 14 mol_c m⁻³; siendo los incrementos de mayor magnitud (26 %) en el primero y tercer racimo. Es importante notar que

las concentraciones de N en la solución nutritiva de 14 y 16 mol_c m⁻³ no ocasionaron diferencias estadísticas en la concentración de N en frutos de todos los racimos evaluados (Cuadro 4).

Cuadro 4. Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de N de frutos completamente rojos en seis racimos (R) de tomate hidropónico.

| Fuente de variación | N en frutos (%) | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| N (mol _c m ⁻³) | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
| 10 | 1.940 b [†] | 1.658 b | 2.443 b | 2.305 b | 1.778 b | 1.696 a |
| 12 | 1.783 b | 1.575 ab | 2.518 b | 2.440 b | 1.765 b | 1.812 a |
| 14 | 2.457 a | 1.928 a | 3.088 a | 2.738 a | 1.992 a | 1.817 a |
| 16 | 2.340 a | 1.811 a | 2.943 a | 2.780 a | 1.894 a | 1.835 a |
| DHS [†] | 0.238 | 0.253 | 0.3583 | 0.2136 | 0.1566 | 0.2815 |
| Significancia | <0.001* | 0.0062 * | 0.0003 * | <0.001 * | 0.0031 * | 0.4723 ns |
| K | | | | | | |
| 5 | 1.815 b | 1.610 c | 2.497 a | 2.322 b | 1.782 ab | 1.551 b |
| 7 | 1.879 b | 1.632 c | 2.778 a | 2.656 ab | 1.701 b | 1.837 ab |
| 9 | 2.377 a | 1.891 ab | 2.999 a | 2.482 ab | 1.787 ab | 1.722 ab |
| 11 | 2.388 a | 1.912 a | 2.497 a | 2.594 ab | 1.952 ab | 1.961 a |
| 13 | 2.190 a | 1.671bc | 2.825 a | 2.775 a | 2.063 a | 1.876 a |
| DHS | 0.3008 | 0.2395 | 0.4954 | 0.4127 | 0.3236 | 0.3292 |
| Significancia | <0.001* | 0.0005* | 0.0644 ns | 0.0354* | 0.0179* | 0.0101* |
| N*K | | | | | | |
| Significancia | <0.001* | <0.001* | 0.1505 ns | 0.1834 ns | 0.3942ns | 0.2282ns |

[†] Promedios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$);

[†]diferencia honesta significativa; *significativo; ns: no significativo.

El incremento en el nivel de K en la solución nutritiva de 5 a 9 mol_c m⁻³, incrementó significativamente la concentración de N en frutos del primero, segundo, cuarto, quinto y sexto racimo; en particular los incrementos en el primero y segundo racimo fueron de 20 y 6 %, respectivamente.

En virtud de los efectos positivos y proporcionales por la concentración de N y K en la solución nutritiva, su interacción resultó significativa solamente en los primeros dos racimos (Cuadro 4). De esta forma, para lograr los valores más altos de N del fruto, las mejores combinaciones (N:K) fueron 14:9 y 14:11 mol_c m⁻³ en ambos racimos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Efecto de la combinación de N aplicado en la solución nutritiva durante la etapa vegetativa y del K en etapa reproductiva del cultivo del tomate en la concentración de N de frutos completamente rojos de dos racimos.

| Combinación N:K (mol _c m ⁻³) | Nitrógeno en frutos (%) | |
|--|--------------------------|----------|
| | R1 | R2 |
| 10:5 | 1.978 cdefg [¶] | 1.708 bc |
| 10:7 | 1.986 cdefg | 1.776 bc |
| 10:9 | 2.007 cdefg | 1.884 bc |
| 10:11 | 1.873 defg | 1.392 c |
| 10:13 | 1.855 defg | 1.531 c |
| 12:5 | 1.663 fg | 1.803 bc |
| 12:7 | 1.601 g | 1.540 c |
| 12:9 | 1.881 defg | 1.361 c |
| 12:11 | 1.917 defg | 1.641 c |
| 12:13 | 1.855 defg | 1.531 c |
| 14:5 | 1.698 fg | 1.453 c |
| 14:7 | 1.785 efg | 1.496 c |
| 14:9 | 2.883 ab | 2.358 ab |
| 14:11 | 3.350 a | 2.663 a |
| 14:13 | 2.569 bcd | 1.671 c |
| 16:5 | 1.921 defg | 1.477 c |
| 16:7 | 2.144 bcdefg | 1.715 bc |
| 16:9 | 2.739 abc | 1.960 bc |
| 16:11 | 2.411 bcdef | 1.951 bc |
| 16:13 | 2.483 bcde | 1.951 bc |
| DHS [†] | 0.781 | 0.658 |

[¶]Promedios en cada columna con misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$);

[†]diferencia honesta significativa.

2.3.2. Concentración de K en hojas, tallos y frutos

La concentración de K en hojas, tallos y frutos presentó diferencias estadísticas debido al suministro de diferentes tasas de N en etapa vegetativa y de K en etapa reproductiva; en tanto que la interacción N*K no mostró efectos en esta variable en los tres órganos vegetales (Cuadros 6, 7 y 8). Por una parte, la influencia significativa del N en la concentración de K en hojas y tallos estuvo limitada de los 69 a 152 ddt, aunque en frutos los efectos fueron diferenciales entre racimos; mientras que por otra parte, los efectos de la aplicación de K en la etapa reproductiva del cultivo fueron evidentes en la concentración de este elemento tanto en hojas, como en tallos y en frutos (cuadros 6, 7 y 8). Se ha reportado que la concentración de K foliar y del fruto presenta incrementos sostenidos conforme aumenta la fertilización potásica durante el cultivo de tomate (Taber *et al.*, 2008; Santos, 2012).

Las tasas crecientes de N en etapa vegetativa y las de K en etapa reproductiva incrementaron la concentración de K en hojas en los periodos comprendidos entre los 69 y los 152 ddt y los de 69 a 170 ddt, respectivamente (Cuadro 6).

En este sentido, cuando la concentración de N en la solución nutritiva se incrementó de 10 a 16 mol_c m⁻³ se incrementó la concentración de K en hojas en 34, 28 y 51 %, a los 69, 126 y 152 ddt, respectivamente. De manera similar, la dosis creciente de K de 5 a 13 mol_c m⁻³, incrementó también la concentración de K en tejido foliar, con aumentos del orden de 38, 42, 13, y 37 %) a los 69, 126, 152 y 170 ddt, respectivamente (Cuadro 6). Respecto a este comportamiento Trudel y Ozburn (1971) encontraron que la concentración de K, tanto en la fruta, como en el peciolo foliar, aumenta por las concentraciones crecientes de este elemento durante el cultivo.

Cuadro 6. Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de K en hojas de cuatro fechas de muestreos (ddt) en tomate hidropónico.

| Fuente de variación | | K en hoja (% PS) en etapa reproductiva | | | |
|---------------------------------------|------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | | 69 ddt | 126 ddt | 152 ddt | 170 ddt |
| N (mol _c m ⁻³) | 10 | 1.644 b [¶] | 1.630 b | 1.616 b | 1.616 a |
| | 12 | 2.098 ab | 1.762 ab | 1.605 b | 1.302 a |
| | 14 | 2.284 a | 1.984 ab | 2.145 ab | 1.705 a |
| | 16 | 2.196 a | 2.084 a | 2.453 a | 1.755 a |
| | DHS [†] | 0.4550 | 0.43895 | 0.7358 | 0.5543 |
| | Significancia | 0.0059 * | 0.0370 * | 0.0119 * | 0.1213 ns |
| K | 5 | 1.611 d | 1.451 b | 1.527 b | 1.364 c |
| | 7 | 1.829 cd | 1.504 b | 2.080 ab | 1.395 bc |
| | 9 | 2.101 bc | 2.093 a | 2.168 ab | 1.621 abc |
| | 11 | 2.502 a | 2.214 a | 2.269 a | 1.724 ab |
| | 13 | 2.232 ab | 2.0634 a | 1.728 ab | 1.868 a |
| | DHS | 0.3572 | 0.4239 a | 0.7392 | 0.3599 |
| Significancia | <0.001* | <0.001* | 0.0316* | 0.0007* | |
| N*K | Significancia | 0.1230 ns | 0.7062 ns | 0.3794 ns | 0.2365 ns |

[¶] Promedios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$);

[†]diferencia honesta significativa; *significativo; ns: no significativo.

En el presente experimento, a medida que la concentración de N en la solución nutritiva aumentó de 10 a 16 mol_c m⁻³, la concentración de K en el tallo aumentó en 17, 24 y 35 % a los 69, 126 y 152 ddt, respectivamente. De la misma manera, al elevar la concentración de K en la solución nutritiva de 5 a 13 mol_c m⁻³, la concentración de K en el tallo aumentó de manera importante en 31, 26, 38

y 24 % a los 69, 126, 152 y 170 ddt, respectivamente. Es evidente que con las concentraciones de K en la solución nutritiva de 11 y 13 mol_c m⁻³, se registraron las concentraciones más altas de este elemento en tallos, en las cuatro fechas evaluadas (Cuadro 7).

Cuadro 7. Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de K en tallos de tomate hidropónico en cuatro fechas de muestreos (ddt).

| Fuente de variación | K en tallo (% PS) en etapa reproductiva | | | |
|---------------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|
| | 69 ddt | 126 ddt | 152 ddt | 170 ddt |
| N (mol _c m ⁻³) | | | | |
| 10 | 2.025 b | 1.852 b | 2.504 c | 2.237 a |
| 12 | 2.360 a | 2.066 ab | 2.557 cb | 2.276 a |
| 14 | 2.322 ab | 2.102 ab | 3.087 ab | 2.320 a |
| 16 | 2.368 a | 2.306 a | 3.374 a | 2.323 a |
| DHS | 0.3035 | 0.4200 | 0.5345 | 0.4438 |
| Significancia | 0.0164 * | 0.050 * | 0.0009 * | 0.9287 ns |
| K | | | | |
| 5 | 1.910 b | 1.767 c | 2.363 b | 2.008 b |
| 7 | 2.169 ab | 1.935 c | 2.722 ab | 2.142 ab |
| 9 | 2.307 a | 2.152 ab | 2.872 ab | 2.303 ab |
| 11 | 2.460 a | 2.332 a | 3.192 a | 2.498 a |
| 13 | 2.498 a | 2.222 ab | 3.253 a | 2.495 a |
| DHS | 0.3896 | 0.3527 | 0.5989 | 0.4368 |
| Significancia | 0.0005 * | 0.0002 * | 0.0006 * | 0.0077 * |
| N*K | | | | |
| Significancia | 0.4445 ns | 0.1202 ns | 0.5427 ns | 0.9355 ns |

¶ Promedios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); †diferencia honesta significativa; *significativo; ns: no significativo.

El incremento en la concentración de N en la solución nutritiva en etapa vegetativa mostró una influencia positiva en la concentración de K en frutos del primero, tercero y quinto racimo. Las concentraciones de N en la solución nutritiva entre 12 y 16 mol_c m⁻³ promovieron las mayores concentraciones de K en fruto. También, como en el caso del N, se observó una relación positiva entre la concentración de K en la solución nutritiva y la concentración de K del fruto; de manera particular cuando el K se incrementó de 5 a 13 mol_c m⁻³, la concentración de K del fruto aumentó en 32, 23, 5, 26, 4 y 3 % en los racimos del primero al sexto, respectivamente (Cuadro 8). Durante del desarrollo del fruto de tomate, se incrementa la absorción de K (Gertsson, 1995), esto en virtud de que el desarrollo del fruto de tomate demanda incrementos de K (Zekki *et al.*, 1996). Existen relaciones lineales y positivas entre la tasa de fertilización potásica y la concentración de este elemento en el fruto (Taber *et al.*, 2008).

Cuadro 8. Efectos de la aplicación de N en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva en la concentración de K en frutos completamente rojos de seis racimos (R) de tomate hidropónico.

| Fuente de variación | K en frutos (% PS) | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| N (mol _c m ⁻³) | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
| 10 | 1.122 b [¶] | 1.104 a | 1.795 b | 1.775 a | 0.967 ab | 0.966 a |
| 12 | 1.237 ab | 1.169 a | 1.895 ab | 1.803 a | 0.960 ab | 0.928 a |
| 14 | 1.386 a | 1.185 a | 1.928 ab | 1.792 a | 1.056 a | 1.053 a |
| 16 | 1.349 ab | 1.189 a | 2.069 a | 1.962 a | 0.947 b | 0.999 a |
| DHS [†] | 0.2580 | 0.2894 | 0.2337 | 0.2656 | 0.1016 | 0.1810 |
| Significancia | 0.0409* | 0.8045ns | 0.0309 * | 0.1870 ns | 0.0303* | 0.2626 ns |
| K | | | | | | |
| 5 | 1.070 b | 0.981 b | 1.639 c | 1.543 b | 0.920 b | 0.904 c |
| 7 | 1.213 ab | 1.110 ab | 1.995 abc | 1.793 ab | 0.931 ab | 0.929 abc |
| 9 | 1.325 ab | 1.225 ab | 2.093 ab | 1.794 ab | 1.013 ab | 1.075 ab |
| 11 | 1.355 ab | 1.281 a | 2.164 a | 2.089 a | 1.092 a | 1.097 a |
| 13 | 1.407 a | 1.211 ab | 1.717 bc | 1.944 a | 0.956 ab | 0.927 bc |
| DHS | 0.3030 | 0.2725 | 0.3952 | 0.3526 | 0.0920 | 0.0169 |
| Significancia | 0.0217 * | 0.0264 * | 0.0010 * | 0.0012 * | 0.0278 * | 0.0027 * |
| N*K | | | | | | |
| Significancia | 0.9738 ns | 0.9277ns | 0.1544 ns | 0.6393 ns | 0.5562ns | 0.3000 ns |

[¶] Promedios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$);
[†]diferencia honesta significativa;*significativo; ns: no significativo.

2.3.3. Rendimiento

El rendimiento de fruto fue influenciado positivamente por el suministro de concentraciones crecientes de K en la solución nutritiva; mientras que los niveles de N aplicado en etapa vegetativa y su interacción N*K no fueron significativos para esta variable (Cuadro 9). Existen relaciones positivas entre la concentración de K durante el cultivo de tomate y el rendimiento del fruto (Taber *et al.*, 2008).

Cuadro 9. Significancias estadísticas de los factores de estudio, en el rendimiento de tomate 110, 131 y 167 días después del trasplante (ddt), correspondientes a los racimos primero, tercero y quinto.

| Fuente de variación | Rendimiento | | |
|---------------------|-------------|-----------|-----------|
| | 110 ddt | 131 ddt | 167 ddt |
| N | 0.7297 ns | 0.9042 ns | 0.6775 ns |
| K | 0.0006 * | <.0001 * | <.0001 * |
| N*K | 0.9835 ns | 1.0000 ns | 0.7558 ns |

ns: no significativo; *Significativo ($p \leq 0.05$)

El incremento en la concentración de K en la solución nutritiva de 5 a 13 mol_c m⁻³, aumentó en 4, 8.5 y 15.4 % el rendimiento de los racimos primero, tercero y quinto, respectivamente, como se observa en la Figura 1. Lachover (1972) reportó incrementos en el rendimiento de tomate por fertilizaciones con K durante el ciclo de cultivo; de la misma manera, Mikkelsen (2005) sugiere aumentos en las aplicaciones de K para obtener el máximo rendimiento del fruto de tomate.

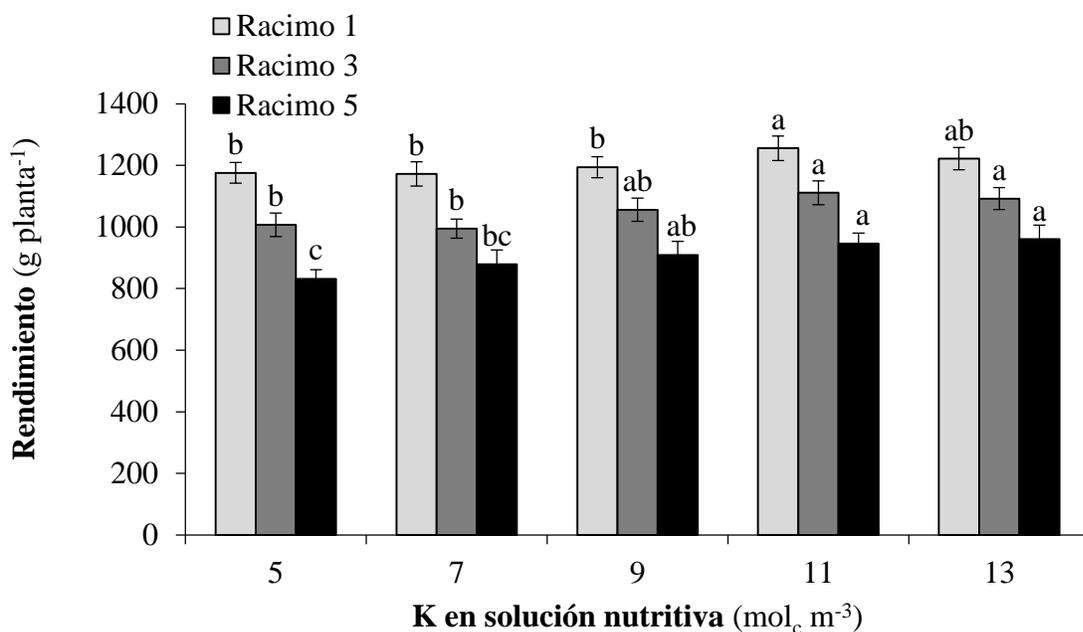


Figura 1. Rendimiento de fruto de tres racimos de tomate por efecto de la concentración de K en la solución nutritiva en etapa reproductiva. Barras en frutos del mismo racimo ± DE con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

No obstante, el comportamiento del rendimiento fue diferente en cada racimo, el cual se redujo gradualmente de 1200 a 1000 y finalmente 900 g planta⁻¹, en los racimos primero, tercero y quinto, respectivamente (Figura 1).

2.4. CONCLUSIONES

Durante el cultivo de tomate, el suministro de niveles de N en fase vegetativa, modifica la concentración de este elemento en tallos y hojas; en tanto que debido a la variación de la dosis de K en etapa reproductiva, la concentración de N y K cambia significativamente tanto en el tejido foliar, como en el tejido de tallos y frutos; aunque la interacción N*K afecta solo la cantidad de N

en frutos. Mientras que el rendimiento solo varía estadísticamente por efectos de la concentración de K en la solución de cultivo.

Al aumentar la dosis de N de 10 a 16 mol_c m⁻³ en etapa vegetativa, el porcentaje de N de hojas y tallos incrementa. Respuestas similares pueden obtenerse en la etapa reproductiva, donde además del N en la solución de cultivo, el nivel de aplicación de K también incrementa la concentración de N tanto en estos órganos, como en los frutos.

Durante el periodo reproductivo del cultivo, la aplicación de tasas crecientes de N de 10 a 16 mol_c m⁻³ en etapa vegetativa y de K de 5 a 13 mol_c m⁻³ en etapa reproductiva, incrementan la concentración de K en el tejido de hojas, tallos y frutos.

El rendimiento de fruto se relaciona positivamente con el suministro de un gradiente de K en la solución nutritiva en etapa reproductiva; mientras que los niveles de N aplicado en etapa vegetativa y su interacción N*K no ejercen efectos en esta variable. Entonces al elevar la concentración de K de 5 a 13 mol_c m⁻³, el rendimiento de tomate aumenta.

Independientemente del suministro de K durante el cultivo, existe una tendencia de reducción del 25 % en el rendimiento del primero al quinto racimo.

2.5. LITERATURA CITADA

- Akanbi, W. B., A. O. Togun, O. A. Olaniran, J. O. Akinfasoye, and F. M. Tairu. 2007. Physico-chemical properties of Eggplant (*Solanum meloengena* L.) fruit in response to nitrogen fertilizer and fruit size. *Agriculture Journal* 2: 140–148.
- Alcántar, G. G. y M. V. Sandoval 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Chapingo, México. 156 p.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. In: *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy* 9. Black C. A. (ed.). American Society of Agronomy. Madison, WI, USA. pp. 1149-1178.
- Dorai, M., P. Papadopoulos and A. Gosselin. 2001. Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie* 21(4): 367-383.

- Gertsson, U. E. 1995. Nutrient uptake by tomatoes grown in hydroponics. *Acta Horticulturae* 401: 351-356.
- Grünzweig, M.J., J. Katan, Y. Ben-Tal, D. H. Rabinowitch, 2008. Enhancement of Tomato Fruit Lycopene by Potassium Is Cultivar Dependent. *Hortscience* 43(1):159–165. *Plant and Soil* 206: 21–27.
- Hobson, G. and D. Grierson. 1993. Tomato, pp. 405-442. In: G. Seymour, J. Taylor, and G. Tucker (eds.), *Biochemistry of Fruit Ripening*. Chapman and Hill, London, England.
- Lachover, D. 1972. The effect of potassium on a “Roma” variety of processing tomato with special reference to potassium uptake, yield and quality. *Qual. Plant Mater. Veg.* 21(3): 165-177.
- Marouelli, W.A., B. V. Souza, B. M., LC. S. W. Braga, 2014. Marcos Evaluation of sources, doses and application schedules of nitrogen on drip-irrigated tomato. *Hortic. bras.*, v. 32: 327-335.
- Melendez, M. 2011. Potassium deficiency in tomato crops. *Vegetable Crops Edition* 17(4): 1-2.
- Mikkelsen, R. L. 2005. Tomato flavor and plant nutrition a brief review. *Better Crops with Plant Food* 89(2): 14-15.
- Santos B. 2012. Comparison of Preplant Potassium Sources and Rates for Tomato Production in Florida. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 125:155–157.
- SAS. 2002. *High-Performance Forecasting 2.2: User’s Guide*. (Vol. 1 & 2), Cary, NC: SAS Institute Inc. Ver. 9. 652 p.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In: *Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC*. Lunteren, Wageningen, The Netherlands, pp. 633-650.
- Taber H, P. Perkins-Veazie, S. Li, W. White, S. Rodermel, and Y. Xu. 2008. Enhancement of tomato fruit lycopene by potassium is cultivar dependent. *Hortscience* 43(1): 159-165.
- Togun, A. O., W. B. Akanbi, and R. Dris. 2003. Influence of compost and nitrogen fertilizer on growth, nutrient uptake and fruit yield of tomato (*Lycopersicum esculentum*). *Journal of Crop Research* 98: 40–56.
- Trudel, M.J. and J.L. Ozbun. 1971. Influence of potassium on carotenoid content of tomato fruit. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 96:763-765.
- Zekki, H., L. Gauthier, and A. Gosselin. 1996. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121(6): 1082-1088.

CAPÍTULO 3. CALIDAD DEL FRUTO ENTRE RACIMOS EN TOMATE EN FUNCIÓN DEL N EN ETAPA VEGETATIVA Y K EN ETAPA REPRODUCTIVA

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el efecto de la nutrición con N y K por etapas fenológicas en parámetros de calidad del fruto de tres racimos de tomate cultivado en hidroponía. El N a 10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³ fue evaluado en etapa vegetativa; mientras que el K a 5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³ se evaluó en etapa reproductiva. Se utilizó un arreglo factorial en parcelas divididas, designando al N como parcela grande y K como parcela chica; se obtuvieron 20 tratamientos con 6 repeticiones. La unidad experimental fue una planta y la maceta estuvo representada por un recipiente plástico conteniendo 13 L de escoria volcánica roja de 3 a 5 mm de diámetro. Las variables evaluadas fueron: sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (% ácido cítrico), relación SST/AT (SST/acidez titulable), porcentaje de jugo (% jugo), azúcares reductores (Az reductores), atributos de color (Luminosidad y Hue), y concentración de Licopeno en frutos cosechados completamente rojos de los racimos primero, tercero y quinto. Se realizó un análisis de varianza y las medias se compararon con la prueba de Tukey DHS ($p \leq 0.05$). Las concentraciones de N y K evaluadas mostraron efectos principales y significativos en los atributos de calidad SST, % ácido cítrico, SST/Acidez titulable, % Jugo, Az reductores, color (Hue y Luminosidad) y concentración de Licopeno en los frutos; mientras que la interacción N*K fue no significativa en estas variables. Concentraciones crecientes de N de 10 a 16 mol_c m⁻³, aumentaron la luminosidad, Az reductores, el % de jugo y de ácido cítrico, pero disminuyeron los SST, Hue y licopeno. Conforme aumentó el K de 5 a 13 mol_c m⁻³ en la solución nutritiva, los SST, % ácido cítrico, Az reductores, licopeno, % jugo y la Luminosidad del fruto aumentaron pero Hue se redujo.

Variabes como SST, relación SST/AT, Az reductores y Licopeno incrementaron gradualmente desde el racimo primero al quinto; mientras que los atributos del color Hue y Luminosidad tendieron a disminuir al avanzar el ciclo de cultivo; en tanto que el % jugo y % de acidez del fruto no presentaron tendencias definidas. Se concluye que N y K afectan diferencialmente la calidad del tomate entre racimos.

Palabras clave: Azúcares reductores, nutrición nitrogenada, nutrición potásica, parcelas divididas

3.1. INTRODUCCIÓN

El tomate es uno de los cultivos más importantes en la economía mundial, al estar dentro de las hortalizas de mayor consumo, con una producción anual superior a las 161 millones de toneladas (FAO, 2013).

El fruto de tomate está constituido principalmente por agua, sólidos solubles e insolubles (principalmente azúcares) (Beckles, 2012), ácidos orgánicos (cítrico y málico), biomoléculas como carotenoides (que conceden el color característico) y vitaminas A y C, entre otras (Yilmaz, 2001; Dumas *et al.*, 2003; Sainju *et al.*, 2003; Inbaraj y Chen, 2008).

Si bien se ha demostrado que la calidad del fruto depende del cultivar, de las condiciones agronómicas (Crisosto y Mitchell, 2002) del grado de madurez y de las condiciones de almacenamiento del tomate (Cantwell y Kasmire, 2002), existen estudios que demuestran el efecto significativo que el estado nutricional de la planta tiene en el rendimiento y la calidad de los frutos de esta especie (Vicente *et al.*, 2009). Por ello, resulta determinante cubrir las necesidades nutricionales de la planta según su etapa fisiológica (Hartz *et al.*, 2000). Por otra parte, Bénard *et al.* (2009), concluyeron que los metabolitos primarios y secundarios en tomate pueden ser afectados por la baja disponibilidad de nitrógeno. Así mismo, aplicaciones de fertilizantes nitrogenados y potásicos en periodos de mayor demanda durante el crecimiento del fruto, favorecen el crecimiento y calidad del fruto de tomate cultivado en condiciones de campo (Sainju *et al.*, 2000). Sin embargo fertilizaciones excesivas de N reducen la calidad en particular el pH, SST, contenido de azúcares como glucosa, fructosa y el color (Parisi *et al.*, 2006). Un nivel excesivo de K en el suelo puede reducir la disponibilidad de Mg, mientras que en condiciones de baja disponibilidad de Ca, el K favorece la pudrición de la base del fruto de tomate (Sainju *et al.*, 2003).

Los cultivos de ambientes protegidos como invernaderos, abren la posibilidad de controlar el suministro de agua y nutrientes. Sin embargo, para proporcionar las condiciones óptimas de producción, es importante emplear soluciones nutritivas balanceadas que cumplan los requerimientos nutricionales de los cultivos (Morard, 2003), sobre todo ante un desconocimiento del comportamiento de la calidad en frutos procedentes de diferentes racimos. Al conocer estos

datos, es posible informar al productor y consumidor sobre las características nutritivas del tomate obtenidas durante un ciclo de cultivo.

Debido a la importancia del estado nutrimental de la planta en la calidad de la producción, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la nutrición nitrogenada en etapa vegetativa y potásica en etapa reproductiva sobre variables de calidad del fruto de diferentes racimos de tomate bola cv. Charleston, producido en hidroponía.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Material vegetal

Esta investigación se realizó con plántulas de tomate bola cv. Charleston de 37 días de edad, las cuales se establecieron en condiciones de invernadero e hidroponía.

3.2.2. Diseño de tratamientos y diseño experimental

Los factores de estudio N y K con 4 y 5 niveles respectivamente, generaron 20 tratamientos. La asignación de tratamientos a las unidades experimentales se hizo bajo un diseño de parcelas divididas completamente aleatorizado con seis repeticiones. En parcela grande se estableció el factor N y en parcela chica el K.

Las variaciones en la solución nutritiva con N (10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³) en etapa vegetativa y K (5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³) en etapa reproductiva del cultivo de tomate se hizo en condiciones hidropónicas, tomando como unidad experimental una planta por maceta con 13 L de escoria volcánica roja “tezontle” (≤ 12 mm de diámetro de partícula).

El riego se hizo empleando la solución Steiner (1984) modificada en N y K como se indicó anteriormente y según la etapa fenológica. Con un sistema de riego por goteo se suministraron 8 riegos con un volumen total 1072 mL d⁻¹ durante los primeros 30 días después del trasplante (ddt). Posteriormente, hasta terminar el ciclo de cultivo (170 ddt), se suministraron 16 riegos diarios de 140 mL cada uno.

3.2.3. Variables evaluadas

En frutos maduros completamente rojos de tres racimos (primero, tercero y quinto) obtenidos a los 110, 131 y 167 días después del trasplante, se realizaron las siguientes determinaciones.

3.2.3.1. Porcentaje de jugo (% jugo)

El jugo se obtuvo con un extractor (Tur Mix[®], México) considerando el peso inicial del fruto y el peso final del jugo extraído (sin semillas ni epidermis) y el valor se expresó en porcentaje (San-Martín *et al.*, 2012).

3.2.3.2. Sólidos solubles totales (SST)

Esta variable se determinó con un refractómetro digital ATAGO PR-100 con escala de 0-32 % (Honcho, Itabashi-Ku Tokio Japón), expresando el valor de SST en %; para ello, tres gotas del jugo de frutos cortados longitudinalmente se colocaron sobre la celda de medición, registrando las lecturas a 20 °C.

3.2.3.3. Acidez titulable (% ácido cítrico)

Esta determinación se realizó de acuerdo a la AOAC (1990) usando el valor del ácido cítrico en la fórmula como factor de corrección puesto que es el ácido orgánico en mayor proporción en el fruto de tomate (Yilmaz, 2001) y por tanto esta variable se reporta como porcentaje de ácido cítrico. Para esto, se tomaron 5 mL de jugo del fruto (obtenido con extractor de jugos), se le adicionaron tres gotas de fenolftaleína y se tituló con NaOH 0.1 N. La acidez se obtuvo con la expresión:
Ácido cítrico (%) = $[V_{\text{NaOH}} \text{ (mL)} \times N_{\text{NaOH}} \text{ (meq/mL)} \times \text{miliequivalentes de ácido cítrico (0.064 g/meq)} / V \text{ jugo (mL)}] \times 100$.

3.2.3.4. Relación SST/Acidez titulable

La relación SST/Acidez titulable se obtuvo dividiendo el valor de SST entre el valor de la acidez titulable la cual es referida como % ácido cítrico.

3.2.3.5. Azúcares reductores (Az reductores)

La concentración de azúcares reductores fue determinada de acuerdo al método de Nelson (1944) y Somogy (1952). Con base en la extracción de azúcares en 1 g de jugo de tomate obtenido con el

extractor Tur Mix y mediante el desarrollo de color con el reactivo de Nelson y con arsenomolibdato de amonio; las muestras fueron leídas a 540 nm en un espectrofotómetro (Spectronic 20, Bausch and Lomb, USA). La cantidad de azúcares en g 100 g⁻¹ de peso fresco (PF) se calculó por referencia a la curva de calibración con soluciones de D-glucosa (Sigma-Aldrich®, USA) de concentración conocida.

3.2.3.6. Color

Con el uso de un colorímetro (Hunter Lab D25-PC2, Reston, Virginia, USA) se obtuvieron los valores L, a y b en dos puntos opuestos de la zona ecuatorial de cada fruto. Posteriormente, con estos valores se calculó el ángulo de tono (**Hue**) con la fórmula: Hue (°)= tan⁻¹ (b/a) (Little, 1975); y la **Luminosidad** (L) se obtuvo directamente con el colorímetro, los cuales corresponden al espacio de color L*c*h* según McGuire (1992) y Minolta (2007).

3.2.3.7. Licopeno

Mediante la ecuación “Licopeno (mg 100 g⁻¹ peso fresco “PF”)= 11.848 x (a/b)+1.5471” propuesta por Arias *et al.*, (2000), se calculó de manera indirecta la concentración de licopeno usando los valores “a” y “b” obtenidos con el colorímetro descrito anteriormente.

3.2.4. Análisis estadístico

Para investigar la relación entre los factores de estudio (N y K) con las variables respuesta indicadas, se utilizó el modelo 1 de efectos (E 1) (Kuehl, 2000; Jones y Nachtsheim, 2009) adaptado a un diseño en parcelas divididas completamente aleatorizado.

$$Y_{ijk} = \mu + N_i + \varepsilon_a + K_j + N * K_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad E 1$$

Donde: Y_{ijk} = variable respuesta; μ = media general; N_i = efecto del i-ésimo nivel de N; ε_a = error experimental de parcela grande; K_j = efecto del j-ésimo nivel de K; $N*K_{ij}$ = efecto de la interacción N*K; ε_{ijk} = error experimental aleatorio; y $\varepsilon_a \sim NI(0, \sigma_a^2)$ y $\varepsilon_{ijk} \sim NI(0, \sigma^2)$ son los supuestos del modelo que se suponen normales, independientes, con media cero y varianza común σ^2 .

Con los datos experimentales obtenidos y usando la E 1 se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y las medias se compararon con la prueba de Tukey DHS ($p \leq 0.05$). La verificación de los supuestos de la E 1 se realizó utilizando las pruebas Homoneidad de varianzas de Bartlett,

Normalidad de Shapiro-Wilk y de Independencia de Durbin-Watson, los cuales resultaron razonablemente normales, con homogeneidad de varianzas e independientes con el programa SAS Ver. 9 (SAS, 2002).

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los tratamientos de N y K, mostraron efectos principales y significativos ($p \leq 0.5$) en los atributos de calidad: % jugo, SST (Cuadro 1), % AT, Az reductores (Cuadro 2), relación SST/AT, color (Hue ° y Luminosidad) (Cuadro 3) y licopeno (Cuadro 4) del fruto de tomate cosechado completamente rojo; mientras que la interacción N*K fue no significativa en estas variables.

3.3.1. Porcentaje de jugo (% jugo)

Esta variable mostró significancias estadísticas por efecto de las concentraciones tanto del N (racimo primero) como del K evaluadas en el cultivo de tomate (racimos tercero y quinto), como se observa en el Cuadro 1. En el primer racimo se observaron incrementos significativos del 5 % en el porcentaje de jugo (82.2 % de jugo obtenido con N a $10 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$) debido al el incremento de 10 a $16 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ en la concentración de N (Figura 1a). Por otra parte, cuando el K en la solución nutritiva pasó de 5 a $13 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$, el jugo aumentó en 6 y 7 %; y los valores mayores de esta variable que fueron de 90 y 88 %, se obtuvieron con $13 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ en el tercer y quinto racimo, respectivamente (Figura 1b). Estos resultados concuerdan con los valores de jugo reportados para tomate tipo bola cv Caiman producido en hidroponía con promedios de 90 % de jugo (San Martín-Hernández *et al.*, 2012). En general se observa una relación positiva entre las concentraciones nutrimentales en la solución nutritiva y el porcentaje de jugo del fruto, siendo N con 12 y K con 9 a $13 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ las dosis más recomendables para incrementar este atributo. En cítricos, se ha reportado que aplicaciones de K durante el cultivo, promueven altos contenidos de jugo, de manera similar a lo aquí obtenido en tomate. Así también en uva, altas concentraciones de K, resultan en incrementos en el jugo y el vino (Gawel *et al.*, 2000). Dentro de los factores que influyen en la calidad del fruto, la nutrición potásica está entre los más importantes, siendo el contenido de jugo un atributo beneficiado por este elemento; sin embargo, se ha demostrado que sus efectos significativos se presentan solo cuando al mismo tiempo se aplica suficiente N (Ganeshamurthy *et al.*, 2011). Un estatus adecuado de K puede facilitar un ajuste osmótico que mantenga una alta presión de turgencia (Wang *et al.*, 2013), la cual se relaciona de manera positiva con el contenido

de agua en el tejido celular y por tanto el rendimiento de jugo puede ser incrementado como se observó en esta investigación.

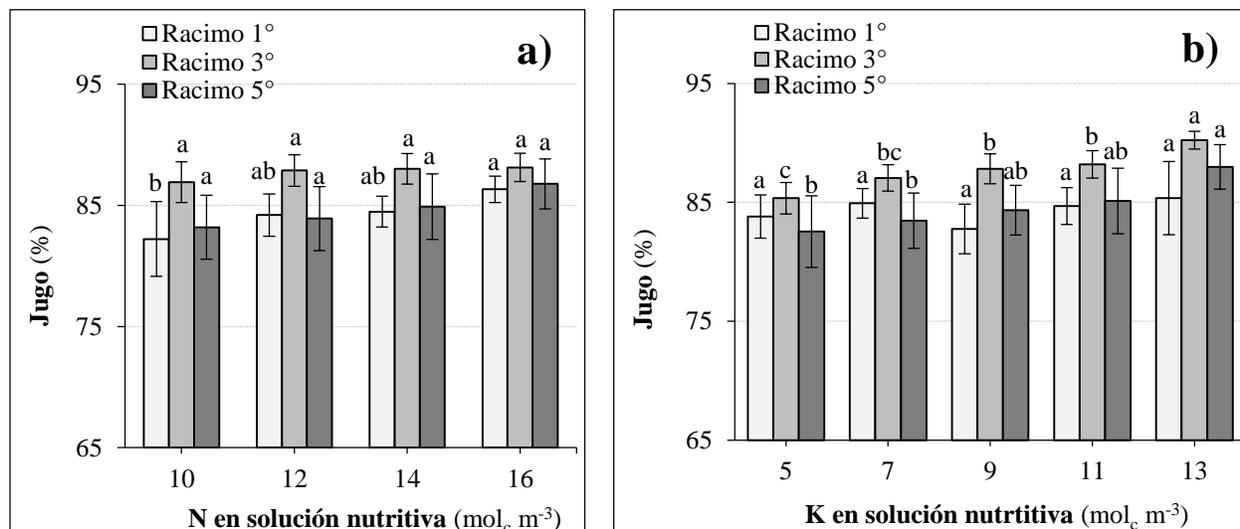


Figura 1. Porcentaje de jugo en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm desviación estándar (DE) en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

3.3.2. Sólidos solubles totales (SST)

Las diferentes concentraciones de N afectaron el porcentaje de SST solo en frutos del primer racimo; mientras que los efectos del K se observaron en los tres racimos evaluados (Cuadro 1). Se observó una relación negativa entre la concentración de N en la solución nutritiva y los SST en el primer racimo; la concentración de N al pasar de 10 a 16 mol_c m⁻³, redujo 9.56 % los SST (con 5.23 % en el valor de esta variable registrado en la menor tasa de N) hasta 4.73 % (Figura 2a). Estos resultados coinciden con lo reportado por Elamin y Al-Wehaibi (2005) y Parisi *et al.* (2006), quienes también obtuvieron una reducción en SST del fruto por incremento en la dosis de N en el cultivo de tomate en suelo o en hidroponía y diferentes cultivares (Kobryn y Hallmann, 2005), lo que fomenta el mayor crecimiento vegetativo en lugar del reproductivo en esta especie de acuerdo a lo señalado por Sainju *et al.* (2003). Sin embargo, esta respuesta contrasta en tomate cherry donde se han obtenido relaciones positivas entre los SST del fruto (aumento de 7 a 9.7%) y la concentración de N (2.25 a 36 mol_c m⁻³) (Wang *et al.*, 2007). Altos porcentajes de SST en el fruto de tomate, son deseables tanto para el procesamiento como para su consumo en fresco (Kumari *et al.*, 1998). En este sentido, se observó de manera general un efecto positivo del K en SST, donde

los azúcares son los principales constituyentes (65 %) (Beckles, 2012). Estos hallazgos se asemejan a los reportados por Benard *et al.* (2009) y Wang *et al.* (2009) para el cultivo de tomate en suelo con aplicaciones crecientes de K. Sin embargo, el efecto de este elemento en nuestro estudio fue diferencial entre racimos; es decir, los mayores porcentajes de SST se registraron en frutos de los racimos primero y quinto a concentraciones de K en la solución nutritiva iguales o superiores a 11 mol_c m⁻³; mientras que, en frutos del racimo tres esta respuesta se obtuvo con valores iguales o superiores de K a 7 mol_c m⁻³. Entre racimos, los mayores SST se presentaron en el quinto racimo en todas las concentraciones de K evaluadas (Figura 2b).

Cuadro 1. Efectos de las concentraciones de N aplicado en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva y su interacción, sobre el porcentaje de jugo (% jugo) y los SST en frutos de tres racimos de tomate (R) cultivado en hidroponía.

| Fuente de variación | % jugo | | | SST | | |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | R 1 | R 3 | R 5 | R 1 | R 3 | R 5 |
| N | 0.0012 * | 0.3198 ns | 0.0956 ns | 0.0043 * | 0.1934 ns | 0.1127 ns |
| K | 0.1667 ns | <.0001 * | 0.0031 * | <.0001 * | 0.050 * | 0.0008 * |
| N*K | 0.2401 ns | 0.9973 ns | 0.9999 ns | 0.9798 ns | 0.9992 ns | 0.9986 ns |
| CV (%) | 4.7 | 2.6 | 5.8 | 8.4 | 10.0 | 7.9 |

*Significativo ($p \leq 0.05$); CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo

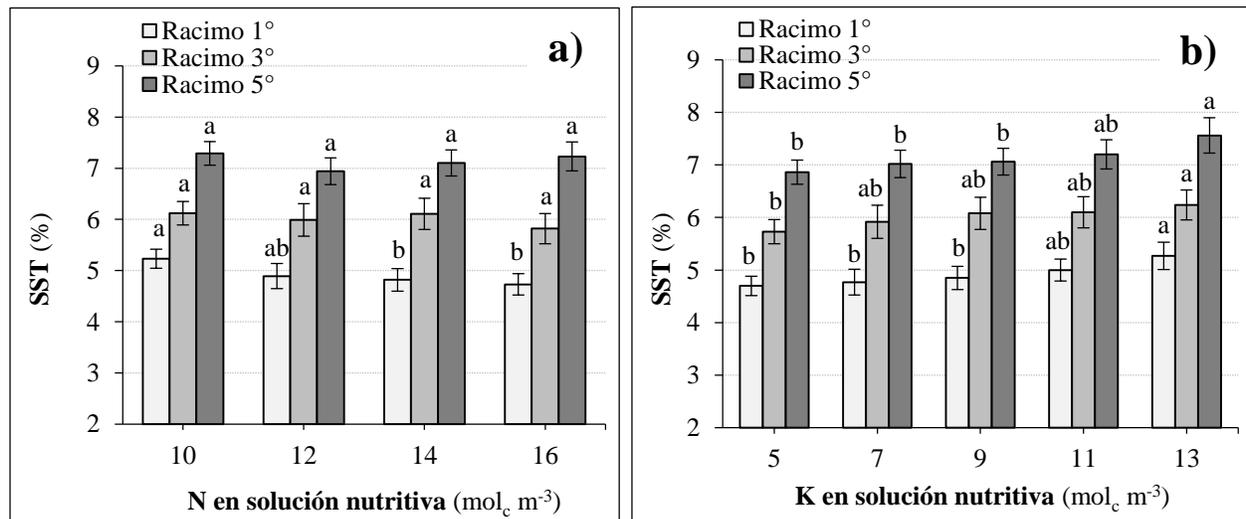


Figura 2. Porcentaje de sólidos solubles totales (SST) en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

3.3.3. % ácido cítrico

Los efectos del N sobre la acidez del fruto se evidenciaron hasta el quinto racimo, en tanto que el K presentó diferencias estadísticas en los tres racimos analizados (Cuadro 2).

El mayor porcentaje de acidez se obtuvo en frutos del primer racimo independientemente de la concentración de N en la solución nutritiva; mientras que el menor fue en frutos del tercer racimo. La aplicación de N de 10 a 12 mol_c m⁻³, provocó un aumento del 5 % en el porcentaje de ácido cítrico de frutos del quinto racimo en relación con el 0.57 % de este índice obtenido en el nivel más bajo de N (Figura 3a). Asimismo, con el aumento en la concentración de K de 5 a 13 mol_c m⁻³, se observaron los incrementos más altos de la acidez de fruto con 29 % en el primer racimo, 21 % en el tercero y 18 % en el quinto racimo (considerando la menor acidez registrada a la menor concentración de este catión.) (Figura 3b).

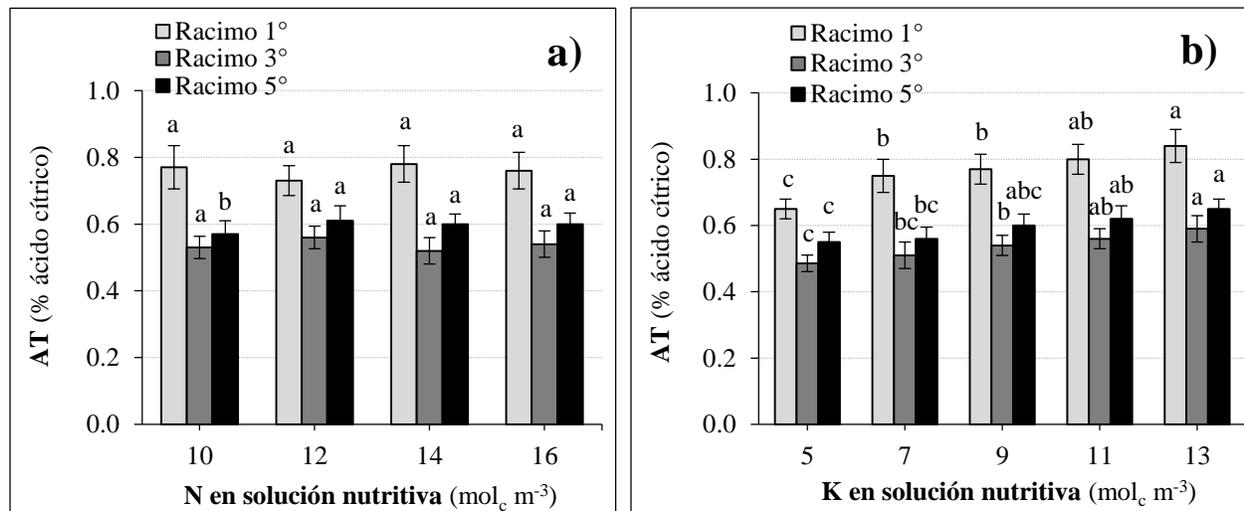


Figura 3. Acidez titulable (AT) en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras ± DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

Estos valores en % de ácido cítrico del fruto son superiores a la ganancia del 14 % en concentraciones de K similares (3.8 a 11.5 mol_c m⁻³) reportados por Caretto *et al.* (2008) en el cultivo de tomate.

Cuadro 2. Efectos de las concentraciones de N aplicado en etapa vegetativa y de K en etapa reproductiva y su interacción, en el porcentaje de acidez titulable (% ácido cítrico) y azúcares reductores (Az reductores) en frutos de tres racimos de tomate (R) cultivado en hidroponía.

| Fuente de variación | % ácido cítrico | | | Az reductores | | |
|---------------------|-----------------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|
| | R1 | R3 | R 5 | R 1 | R 3 | R 5 |
| N | 0.4071 ns | 0.1917 ns | 0.0083 * | 0.0103 * | 0.1009 ns | 0.3803 ns |
| K | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | 0.0051 * | 0.0007 * | <.0001 * |
| N*K | 0.7686 ns | 0.3583 ns | 0.7905 ns | 0.9687 ns | 0.9913 ns | 0.9990 ns |
| CV (%) | 11.2 | 11.4 | 12.2 | 14.0 | 18.1 | 12.9 |

*Significativo ($p \leq 0.05$); CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo.

Esto, sugiere un relación positiva entre la concentración de K en la solución de cultivo y el porcentaje de acidez del fruto. Hebbar *et al.* (2004) indican que al elevar la dosis de K en la fertilización del cultivo de tomate, se incrementa la acidez del fruto, lo cual también coincide con un aumento en la concentración de los ácidos cítrico y málico según lo señalado por Sainju *et al.* (2003). En este sentido, Rezende-Fontes *et al.* (2000) han reportado una correlación negativa ($r = -0.9$) entre el pH y el contenido de ácidos orgánicos en el fruto, cuya característica es importante para el tomate industrializable, ya que un pH <4.3 reduce el riesgo de crecimiento bacteriano (Carvalho, 1980)

3.3.4. Az reductores

Conforme avanzó el ciclo de cultivo y bajo las presentes condiciones experimentales, este tipo de azúcares mostró un incremento paulatino del primero al quinto racimo; aunque los efectos significativos del N en esta variable solo se observaron en frutos del primer racimo. Por su parte, los efectos del K se obtuvieron en los tres racimos (Cuadro 2). El K es requerido en altas concentraciones dado que su deficiencia reduce la fotosíntesis neta, el contenido de RuBisCO y la tasa de transpiración (Xiao-Wang *et al.*, 2014). Al aumentar la concentración de N en la solución nutritiva, se incrementaron también los azúcares reductores, pero estadísticamente solo se obtuvieron diferencias entre $10 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ y el resto de concentraciones de N (Figura 4a). Asimismo, cuando la concentración del K en la solución nutritiva aumentó de 5 a $13 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$, las concentraciones de estos azúcares incrementaron 16, 23 y 20 % (respecto a concentraciones de 2.76, 3.54 y $4.49 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PF}$ obtenidos con K a $5 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ en los racimos del primero al quinto), en el primer, tercer y quinto racimo, respectivamente; y los valores promedio máximos en esta variable de 3.20, 4.36 y $5.40 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PF}$ en los racimos del primero al quinto, se obtuvieron con

la mayor concentración de K (Figura 4b). Además de la fotosíntesis, el aumento en el suministro de K en el cultivo de tomate, este incrementa el contenido de azúcares del fruto (Wuzhong, 2002), promueve la translocación de fotoasimilados principalmente en forma de sacarosa a órganos de demanda (Mengel y Kirkby, 2001) como el fruto. En etapas iniciales del desarrollo de este órgano, se acumula almidón a expensas de la sacarosa donde el K favorece la síntesis y degradación de esta sustancia de reserva (almidón) en el proceso de maduración (Mengel, 2007; Luengwilai y Beckles, 2009; Beckles *et al.*, 2012), dando origen a los principales azúcares reductores fructosa y glucosa presentes en el tomate (Beckles, 2012). Estos antecedentes concuerdan con los resultados obtenidos en esta investigación al encontrar respuestas proporcionales y positivas en esta variable por incremento de este elemento en la solución nutritiva del cultivo de esta especie.

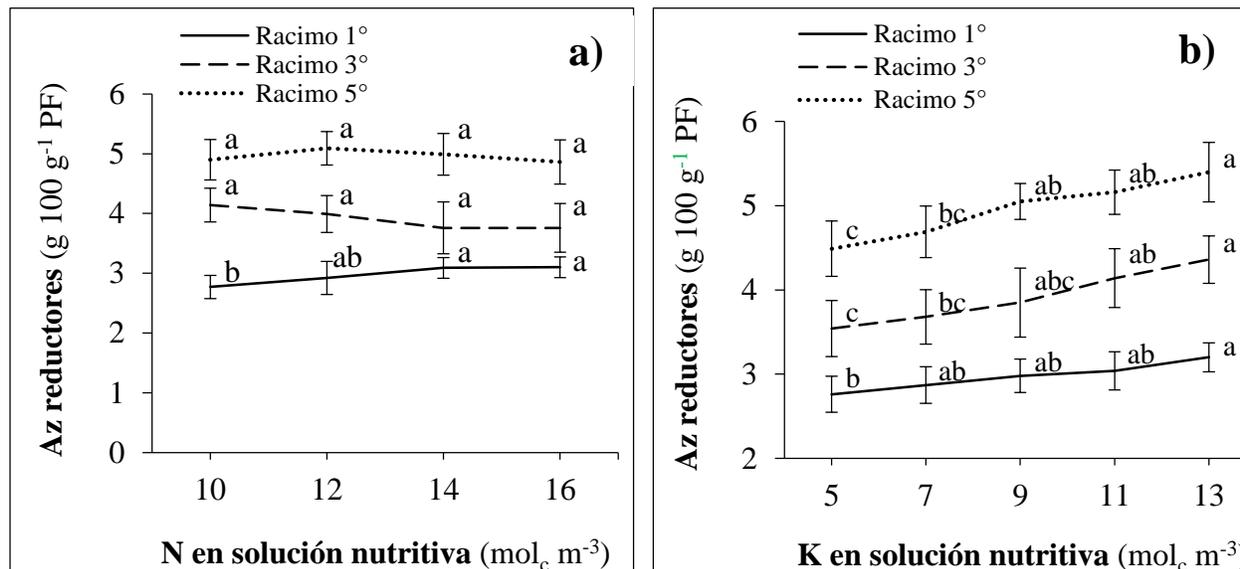


Figura 4. Az reductores en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

3.3.5. Relación SST/Acidez titulable

Es importante señalar que esta variable proporciona un valor indirecto del sabor del fruto, el cual se define mejor mediante un análisis sensorial; al respecto, Beckles (2012) reporta que una relación SST/Acidez titulable de 12.5 es deseable para producir un buen sabor en frutos de tomate, sin embargo, este depende del tipo de consumidor. En virtud de que valores altos en SST y bajos en Acidez titulable resultan en una relación SST/Acidez Titulable alta, y viceversa. Por tanto no es posible ver efectos directos de las concentraciones de N y K evaluadas en la solución nutritiva del

cultivo de tomate; en este sentido, se observó que valores cercanos a 12.5 se obtuvieron en frutos de los racimos tercero y quinto (≥ 11.3) (Figura 5). Esta variable ha resultado útil en evaluaciones de sabor del tomate (referidos como °Brix/Acidez titulable) en diferentes cultivares, obteniendo la mejor aceptación aquellas con los valores mayores de SST/Acidez titulable (Rivera-Martínez *et al.*, 2007) y por tanto se logra un mejor sabor del fruto de acuerdo con Mikkelsen (2005).

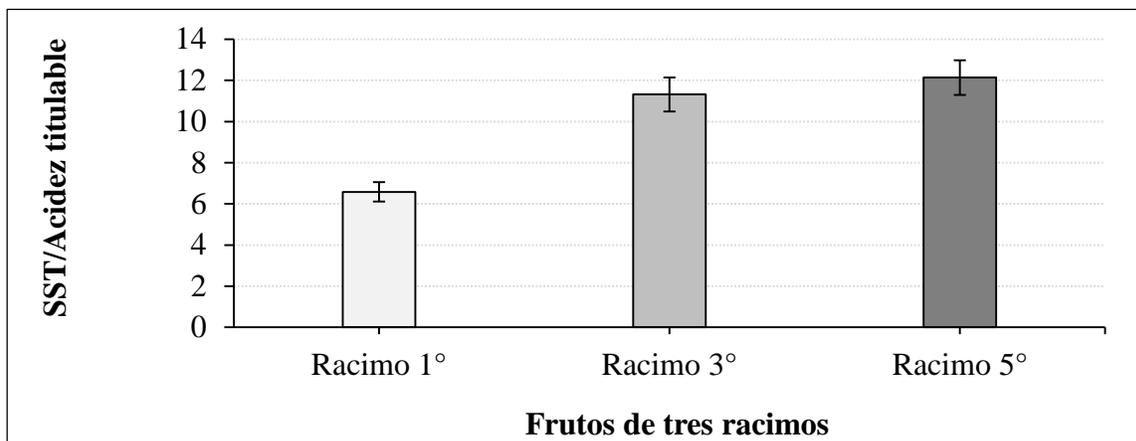


Figura 5. Relación SST/Acidez titulable en frutos de tres racimos del cultivo de tomate en hidroponía. Barras \pm DE, son promedios de 120 frutos por cada racimo.

3.3.6. Color

3.3.6.1. Hue

El N y el K afectan el desarrollo de color del fruto (Vicente *et al.*, 2009), lo cual resultó evidente en esta investigación, donde el color (Hue) del fruto fue afectado tanto por N (racimos primero y tercero) como por el K (Cuadro 3). Aplicaciones excesivas de N inducen deficiente desarrollo del color rojo de superficie en duraznos y nectarinas (Crisosto *et al.*, 1995; Crisosto *et al.*, 1997); en frutos de tomate madurados y cultivados en campo, también se ha reportado una reducción en la concentración de madurez por el incremento en la fertilización nitrogenada de 0 a 250 kg ha⁻¹ (Parisi *et al.*, 2006) el cual predispone a los efectos negativos en el desarrollo de color del fruto. Este comportamiento concuerda con los resultados de la presente investigación, dado que el valor de Hue en frutos del primer (42.79 °) y tercer racimo (35.77 °) fueron los más bajos en el menor nivel de N, e incrementaron en 5.6 % y 5.9 %, al cambiar la tasa de N de 10 a 14 y de 10 a 16 mol_c m⁻³ respectivamente (Figura 6a). Estos incrementos en el valor de Hue ocasionados por las dosis crecientes de nitrógeno se manifestaron en frutos menos rojos de acuerdo al espacio de color

L*c*h* (Minolta, 2007). Por el contrario, el incremento de la concentración de K de 5 a 13 mol_c m⁻³ indujo una reducción en 7, 9 y 10 % en el ángulo hue respecto a sus valores mayores en los frutos de los racimos primero (45.3 °), tercero (38.8 °) y quinto (37 °), encontrados con el menor nivel de K (Figura 6b). Estas respuestas originaron tonalidades más rojizas en el color del fruto, lo cual concuerda con los hallazgos de Hartz *et al.* (2005) quienes reportaron efectos positivos por el menor valor del ángulo de hue obtenido por incremento en la fertilización con K en el cultivo de tomate en campo.

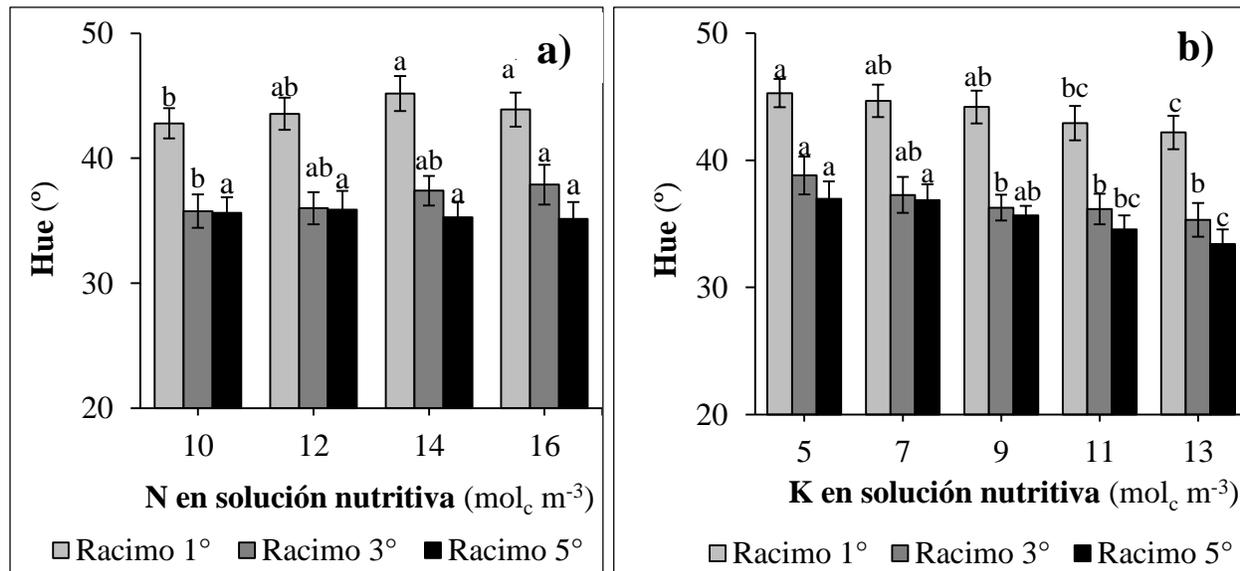


Figura 6. Valores de Hue en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras ± DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

Cuadro 3. Efectos de las concentraciones de N aplicado en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva y su interacción, sobre el valor de Hue y Luminosidad en frutos de tres racimos de tomate (R) cultivado en hidroponía.

| Fuente de variación | Hue | | | Luminosidad | | |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| | R 1 | R 3 | R 5 | R 1 | R 3 | R 5 |
| N | 0.0123 * | 0.0125 * | 0.7303 ns | 0.0016 * | 0.0856 ns | 0.3303 ns |
| K | 0.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | 0.0181 * | 0.0023 * | 0.8399 ns |
| N*K | 0.5910 ns | 0.9267 ns | 0.9974 ns | 0.9084 ns | 0.9693 ns | 0.8616 ns |
| CV (%) | 5.5 | 6.9 | 6.5 | 4.6 | 6.0 | 5.0 |

*Significativo ($p \leq 0.05$); CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo.

3.3.6.2. Luminosidad

Los efectos del N en la luminosidad solo se observaron en frutos del primer racimo y los del K en los racimos primero y tercero (Cuadro 3). Wang y Cheng (2011) detectaron efectos positivos sobre esta variable al suministrar fertilizaciones crecientes con N (9 a 105 g planta⁻¹) durante el crecimiento de frutos de manzana, lo cual coincide con los resultados de este trabajo ya que aun cuando solo se obtuvieron significancias estadísticas entre las concentraciones de N en la solución nutritiva de 10 y las de 14 y 16 mol_c m⁻³, la mayor luminosidad (34) se obtuvo con la más alta concentración de este nutrimento a 16 mol_c m⁻³ (Figura 7a). Independientemente del K adicionado a la solución nutritiva, la luminosidad experimentó una disminución gradual en frutos del racimo primero al racimo quinto. Sin embargo, cuando el K incrementó de 5 a 13 mol_c m⁻³, la luminosidad aumentó proporcionalmente 5 % respecto a los valores mínimos registrados en los racimos primero (32.13) y tercero (30.86), obteniéndose a concentraciones iguales o superiores a 11 mol_c de K m⁻³, como las más recomendables para incrementar significativamente la brillantez del fruto (Figura 7b). Esto contrasta con lo reportado por Hartz *et al.* (2005) quienes al aumentar la fertilización potásica de 0 a 800 kg ha⁻¹ en el cultivo de tomate en campo, lograron reducir (7 %) la brillantez del fruto hasta 41 y encontraron su mayor valor (44) con la menor tasa de K.

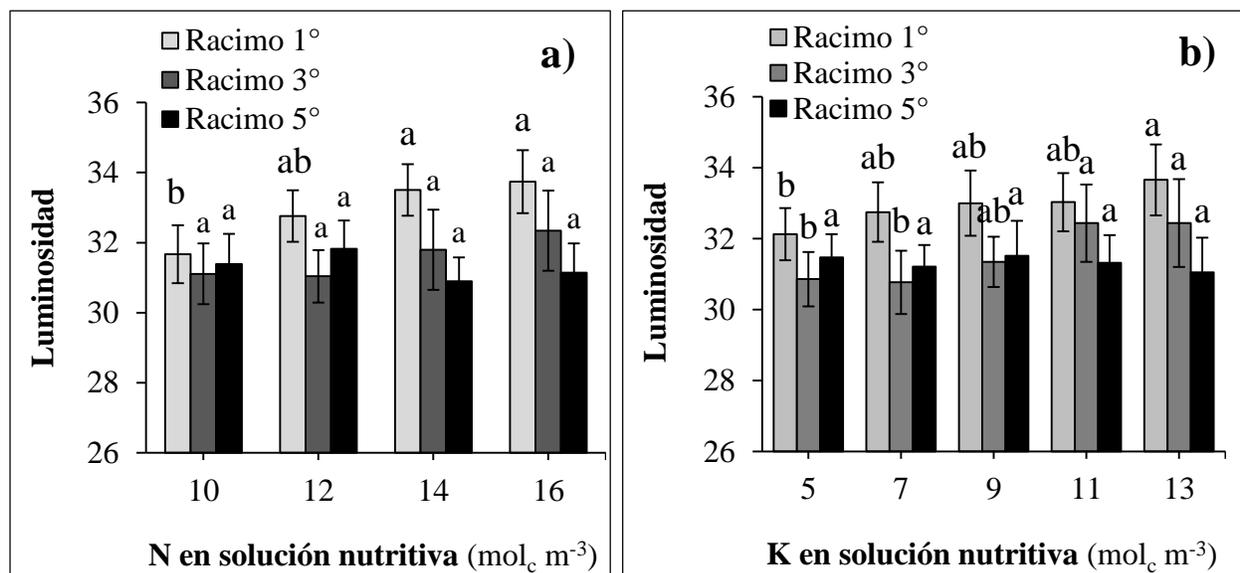


Figura 7. Luminosidad en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras ± DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

3.3.7. Licopeno

De acuerdo con Inbaraj y Chen (2008), N y K afectan la síntesis del licopeno en el tomate, lo que concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación en los racimos primero y tercero (Cuadro 4). A medida que el N en la solución de cultivo aumentó de 10 a 14 mol_c m⁻³, este carotenoide se redujo 3 y 7 % según los valores máximos detectados en los racimos primero (14.41 mg 100 g⁻¹ PF) y tercero (18.14 mg 100 g⁻¹ PF) respectivamente, ambos con N a 10 mol_c m⁻³ (Figura 8a). De la misma manera, Dumas *et al.* (2003) encontraron disminuciones del licopeno de 6.8 a 3.8 mg 100 g⁻¹ PF por aumentos del N desde 1, 12.9, hasta 15.8 mol_c m⁻³. Por otro lado, cuando el tomate se nutre con dosis crecientes de K, el nivel de este compuesto aumenta significativamente (Fanasca *et al.*, 2006). En el presente experimento, al elevar la concentración de K en la solución nutritiva de 5 a 13 mol_c m⁻³, la concentración de licopeno aumentó de manera importante en 10, 12 y 13 % en los racimos primero (13.32 mg 100 g⁻¹ PF), tercero (16.41 mg 100 g⁻¹ PF) y quinto (17.43 mg 100 g⁻¹ PF), respectivamente, los cuales registraron sus menores valores a la menor tasa de K; mientras que las mayores concentraciones de este pigmento se obtuvieron con K a 13 mol_c m⁻³, en los tres racimos evaluados (Figura 8b).

Cuadro 4. Efectos de las concentraciones de N aplicado en etapa vegetativa y K en etapa reproductiva y su interacción, sobre el licopeno en frutos de tres racimos de tomate (R) cultivado en hidroponía.

| Fuente de variación | Licopeno | | |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| | R 1 | R 3 | R 5 |
| N | 0.0138 * | 0.0130 * | 0.7531 ns |
| K | <.0001 * | 0.0002 * | <.0001 * |
| N*K | 0.6458 ns | 0.9050 ns | 0.9989 ns |
| CV (%) | 7.5 | 8.5 | 7.8 |

*Significativo ($p \leq 0.05$); CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo.

Los niveles de sólidos solubles totales, acidez, color, contenido de pigmentos, azúcares y la relación SST/AT son resultado del efecto de la interacción de un conjunto de factores previo a la cosecha. Estos factores incluyen aspectos genéticos (Turhan y Seniz, 2009), ambientales como la radiación solar (Castilla, 2011), temperatura (Gautier *et al.*, 2005) condiciones de humedad, así como el manejo del cultivo en poda de hojas y flores (Gautier, 2001) y los niveles de fertilización, como se observó en esta investigación. En el aspecto nutrimental, el N desempeña un papel fundamental como constituyente de la mayoría de las moléculas orgánicas esenciales como son

ácidos nucleicos, purinas, aminoácidos, vitaminas, proteínas y enzimas, las cuales realizan funciones específicas desde la germinación de las semillas, la fotosíntesis y síntesis de compuestos que impactan en la vida de la planta (Barker y Bryson, 2007). Si bien la deficiencia de N puede reducir el rendimiento, pero su exceso favorece el crecimiento vegetativo (Sainju *et al.*, 2003). Asimismo, se conoce que un alto suministro del N durante el cultivo empeora los atributos de calidad química del fruto de tomate como son pH, contenido de sólidos solubles, glucosa, fructosa y la relación azúcares/sólidos totales (Parisi *et al.*, 2006).

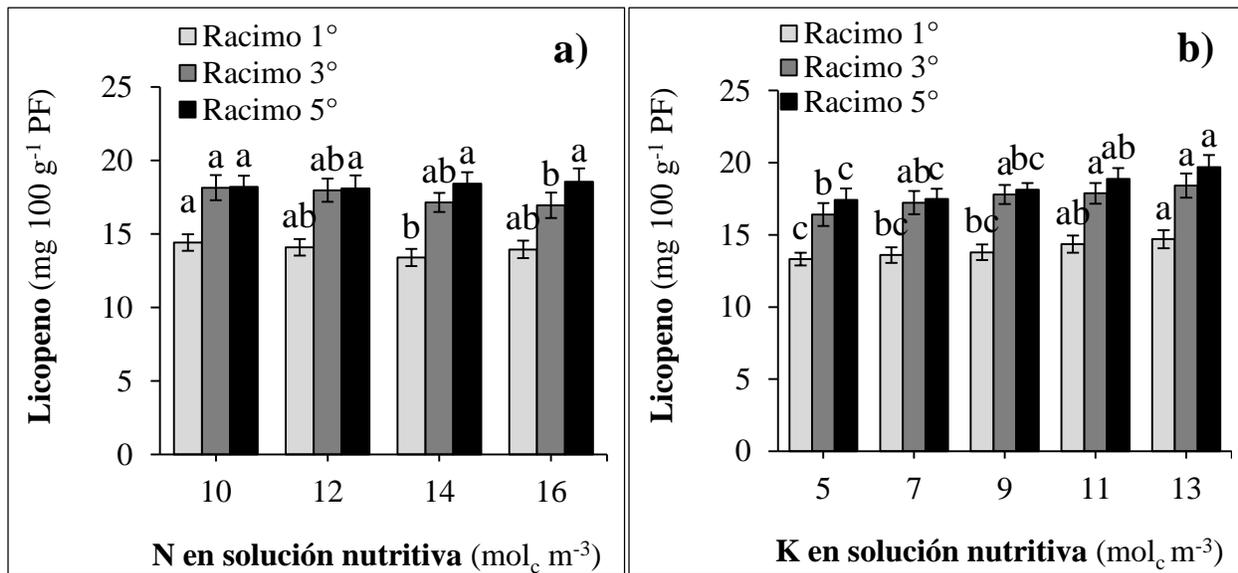


Figura 8. Concentración de licopeno en frutos de tres racimos de tomate por efecto del N en la solución nutritiva en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) del cultivo. Barras \pm DE en cada racimo y subfigura con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

Por otra parte, el K es un elemento esencial que actúa en procesos fisiológicos y bioquímicos (Mpelasoka *et al.*, 2003; Cakmak, 2005) tales como activación de enzimas, fotosíntesis, transporte de fotosintatos a los órganos de demanda, mantenimiento de la turgencia (Mengel y Kirkby, 2001), efecto osmótico y síntesis de proteínas. Aunque el K no es un componente estructural, es absorbido por las plantas de tomate en grandes cantidades, impactando de forma significativa en la calidad y rendimiento del fruto (Mengel, 2007; Colpan *et al.*, 2013). Características como acidez titulable, sólidos totales, concentración de ácidos cítrico y málico, azúcares y carotenoides, son variables que responden positivamente al aumento de la dosis de potasio en el cultivo, pero su deficiencia origina frutos con madurez heterogénea por bajos contenidos de licopeno y los excesos de este elemento en el suelo pueden reducir la disponibilidad de Mg y favorecer la pudrición apical del

fruto cuando el calcio es deficiente (Sainju *et al.*, 2003). Respuestas similares fueron encontradas por efecto del N y K evaluados en la solución de cultivo como se describió en este estudio. Sin embargo, adicionalmente a los efectos nutrimentales, en esta investigación se observaron diferentes tendencias entre cada racimo en las variables analizadas. Por consiguiente, mientras que por un lado los SST, azúcares reductores, la relación SST/AT y la concentración de licopeno incrementan, por otro, los atributos de color como Hue ° y Luminosidad se reducen; y la acidez titulable mostró un comportamiento irregular, presentado su máximo valor en el primer racimo.

3.4. CONCLUSIONES

El comportamiento de los atributos de calidad del fruto de tomate está en función tanto del racimo de procedencia como de las concentraciones de N y K suministradas durante su cultivo en condiciones protegidas e hidropónicas.

VARIABLES COMO SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES, RELACIÓN SST/ACIDEZ TITULABLE, AZÚCARES REDUCTORES Y LICOPENO INCREMENTAN GRADUALMENTE DESDE EL RACIMO PRIMERO AL QUINTO; MIENTRAS QUE ATRIBUTOS DEL COLOR COMO HUE Y LUMINOSIDAD TIENDEN A DISMINUIR AL AVANZAR EL CICLO DE CULTIVO; Y LOS PORCENTAJES DE JUGO Y ÁCIDO CÍTRICO DEL FRUTO NO PRESENTAN TENDENCIAS DEFINIDAS.

Por otra parte, el racimo, N y K influyen diferencialmente el comportamiento de los atributos de calidad aquí evaluados. Concentraciones crecientes de N de 10 a 16 mol_c m⁻³, aumentan los azúcares reductores, luminosidad, porcentajes de jugo y del ácido cítrico, pero disminuyen los SST, ángulo hue y licopeno. Mientras que a medida que aumenta el K de 5 a 13 mol_c m⁻³ en la solución nutritiva, los sólidos solubles totales, azúcares reductores, síntesis de licopeno, luminosidad, porcentaje de jugo y la acidez del fruto aumentan pero el valor de Hue se reduce.

3.5. LITERATURA CITADA

- Adsule, P. G. Dan, A., Tikko, S. K., Pal., A. B., 1980. Studies on the evaluation of tomato cultivars for making juice. *Indian Food Packer* 34: 18-20.
- Arias, R., Lee, T. C., Logendra, L., Janes, H., 2000. Correlation of lycopene measured by HPLC with the L*, a*, b* color readings of a hydroponic tomato and the relationship of maturity with color and lycopene content. *J Agric. Food Chem.* 48: 1697-1702.

- Barker, A. V., and G. M. Bryon. 2007. Nitrogen. In: A. V. Barker, and D. J. Pilbeam. Handbook of plant nutrition. CRC Press Tylor & Francis Group. USA. P. 21-50.
- Beckles, D. M., 2012. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. Review. Postharvest Biology and Technology 63: 129-140.
- Beckles, D. M., N. Hong, L. Stamova and K Luengwilai. 2012. Biochemical factors contributing to tomato fruit sugar content: a review. Fruits 67:49-64.
- Bénard, C., H. Gautier, F. Bourgaud, D. Grasselly, B. Navez, C. Caris-Veyrat, M. Weiss, and M. Génard. 2009. Effects of low nitrogen supply on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit yield and quality with special emphasis on sugars, acids, ascorbate, carotenoids, and phenolic compounds. J. Agric. Food Chem. 57(10): 4112-4123.
- Boland, F. E. 1990. Fruits and fruit products. In: Official Methods of Analysis of the Association of Analytical Methods (AOAC). Pp. 910-911. Helrich, K. (ed.). 15th edition. VA, USA.
- Cakmak, I., 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168: 521-530.
- Cantwell, M. I., R. F. Kasmire. 2002. Postharvest handling systems: fruit vegetables. In pp. 407-421. In: Kader, A. A. (ed.), Postharvest echnology of horticultural crops (3rd. Edition). Agriculture and Natural Resources, Pub. 3311, University of California, USA.
- Caretto, S., A. Parente, F. Serio, and P. Santamaria. 2008. Influence of potassium and genotype on vitamin E content and reducing sugar of tomato fruits. HortScience 43(7): 2048-2051.
- Carvalho, V. D., 1980. Características químicas e industriais do tomate. Informe Agropecuário 6, 63-68.
- Castilla, N. 2011. La radiación solar en invernadero en la costa mediterránea española. In: J. C. López, P. Lorenzo, N. Castilla, J. Pérez-Parra, J. I. Montero, E. Baeza, A. Antón, M. D. Fernández, A. Baille, M. González-Real. Incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo. Edit. CAJAMAR. Almería, Esp. P. 35-47.
- Colpan, E., M. Zengin, and A. Özbahce. 2013. The effects of potassium on the yield and fruit quality componentes of stick tomato. Hort. Environ. Biotechnol. 54(1): 20-28.
- Conti, T. R., and D. R. Geiger. 1982. Potassium nutrition and translocation in sugar beet. Plant Physiology 70:168-172
- Crisosto, C. H., F. G. Mitchell and S. Johnson. 1995. Factors in fresh market Stone fruit quality. Review article. Postharvest News and Information 6(2): 17N-21N.

- Crisosto, C. H., R. S. Johnson T. DeJong and K. R. Day. 1997. Orchard factors affecting postharvest Stone fruit quality. *HortScience*, 32(5): 820-823.
- Crisosto, C. H., Mitchell, J. P., 2002. Preharvest factors affecting fruit and vegetable quality. In: Kader, A. A. (ed.), *Postharvest echnology of horticultural crops* (3rd. Edition). Agriculture and Natural Resources, Pub. 3311, University of California, USA. pp. 49-54.
- Davies, J. N., G. E. Hobson, and W. B. McGlasson. 1981. The constituents of tomato fruit-the influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 15(3):205-280.
- Dumas, Y., M. Dadomo, G. D. Lucca and P. Grolier. 2003. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidante contente of tomatões. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83: 369-382.
- Elamin, E.A., Al-Wehaibi, N.S., 2005. Alternate use of good and saline irrigation wáter (1:1) on the performance of tomato cultivar. *Journal of Plant Nutrition*, 28, 1061–1072.
- Fanasca, S., G. Colla, G. Maiani, E. Venneria, Y. Rouphael, E. Azzini and F. Saccardo. 2006. Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(12): 4319-4325.
- FAO. 2013. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT. Disponible en: <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>. Consulta 10/11/2015
- Ganeshamurthy A. N., G. C. Satisha and P. Patil. 2011. Potassium nutrition on yield and quality of crops with special emphasis on banana and grapes. *Karnataka J. Agric. Sci.*, 24(1): 29-38.
- Gautier, H., A. Rocci, M. Buret, D. Grasselly, and M. Causse. 2005. Fruit load or fruit position alters response to temperature and subsequently cherry tomato quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85(6):1009-1016.
- Gautier, H., S. Guichard, and M. Tchamitchian. 2001. Modulation of competition between fruits and leaves by flower pruning and water fogging, and consequences on tomato leaf and fruit growth. *Annals of Botany* 88: 645-652.
- Gawel, R., A. Ewart, and R. Cirami. 2000. Effect of rootstock on must and wine composition and the sensory properties of Cabernet Sauvignon grown at Langhorne Creek, South Australia. *Aust NZ. Wine Ind. J.* 15: 67-73.
- Haeder, H-E, Mengel, K., 1972. Translocation and respiration of assimilates in tomato plants as influenced by K nutrition. *Z. Pflanzenernähr Bodenkd* 131,139-148.

- Haeder, H-E, and K. Mengel. 1972. Translocation and respiration of assimilates in tomato plants as influenced by K nutrition. *Z. Pflanzenernähr Bodenkd* 131:139-148.
- Hartz, T. K., P. R. Johnstone, D. M. Francis and E. M. Miyao. Processing tomato yield and fruit quality improved with potassium fertigation. *HortScience*; 40(6): 1862-1867.
- Hartz, T.K. Johnstone P. R. Francis D. M. y Miyao E. M. 2005. Processing Tomato and fruit quality improved with potassium fertigation. *Hortscience*–40 (6): 1862-1867.
- Hebbar, S. S., B.K. Ramachandrappa Nanjappa H.V., Prabhakar M.2004. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) *Europ. J. Agronomy* 21: 117–127.
- Huber, S. C., and D. E. Moreland. 1981. Co-transporte of potassium and sugars across the plasmalemma of mesophyll protoplasts. *Plant Physiology* 67:163-169.
- Huett, D. O. and E. B. Dettman. 1998. Effect of nitrogen on growth, fruit quality and nutrient uptake of tomatoes grown in sand culture. *Australian J. Exp. Agric.* 28(3): 391-399.
- Inbaraj B. S. and B. H. Chen. 2008. Carotenoids in tomato plants. In: V. R. Preedy and R. R. Watson (eds.). *Tomatoes and tomato products, nutritional, medicinal and therapeutic properties*. Science Publishers, CRC Press. Pp. 133-164.
- Jones, B., Nachtsheim, C. J., 2009. Split-plot designs: what, why, and how. *Journal of Quality Tecnology* 41(4), 340-361.
- Kader A. A., L. L. Morris, M. A. Stevens, and M. Alabriht-Holton. 1978. Composition and flavor quality of fresh Market tomatoes as influenced by some postharvest handling procedures. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 103(1):6-13.
- Kader A. A. 2008. Flavor quality of fruits and vegetables. *J. Sci. Food Agric.* 88:1863-1868.
- Kliwer, W. M. 1977. Influence of temperatura, solar radiation, and nitrogen on coloration and composition of “Emperor” grapes. *Am. J. Enol.Vit.*, 28: 96-103.
- Kobryn J. and E. Hallmann. 2005. The effect of nitrogen fertilization on the quality of three tomato types cultivated on rockwool. *Acta Horticulturae* 691:341-348.
- Kuehl, O. R., 2000. *Design of experiments: statistical principles of research design and analysis*. 2nd Edition. Duxury Press, Pacific Grove, CA, USA 666 p.
- Kumari, A., B. B.Grewal, M. K. Banerjee, and A. Kumari. 1998. Assessment of physico-chemical characteristics of different tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) genotypes. *Vegetable Science* 25: 127-130.

- Little, A. C. 1975. Research note off on a tangent. *J. Food Sci.* 40(2): 410-411.
- Luengwilai K and D. M. Beckles. 2009. Starch granules in tomato fruit show a complex pattern of degradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(18):8480-8487.
- McGuire, R. G., 1992. Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 27(2), 1254-1255.
- Mengel K. and A. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. 5th. Edition. Edit. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht, The Netherlands. 849 pp.
- Mengel K. 2007. Potassium. In: A. V. Barker, and D. J. Pilbeam. Handbook of plant nutrition. CRC Press Tylor & Francis Group. USA. P. 91-120.
- Mikkelsen R. L. 2005. Tomato flavor and plant nutrition: a brief review. *Better Crops* 89(2): 14-15.
- Minolta, K. 2007. Precise color communication. Konica Minolta Sensing, Inc. Japan 59 p.
- Morard P., Caumes E. y Silvestre J. 2003. Influence de la concentration de la solution nutritive sur la croissance et la nutrition minérale de la tomate. *Canadian journal of soil science*. 84: 299-304.
- N'tchobo H., N. Dali, B. Nguyen-Quoc, C. H. Foyer and S. Yelle. Starch synthesis in tomato remains constant throughout fruit development and is dependente on sucrose supply and sucrose synthase activity. *Journal of Experimental Botany* 50(338): 1457-1463.
- Nelson, N. J. 1944. A photometric adaptation of the Somogyi method for the determination of the glucose. *J. Biol. Chem.* 153: 375380.
- Parisi, M., Giordano, I., Pentangelo, A., D'Onofrio, B., Villari, G., 2006. Effects of different levels of nitrogen fertilization on yield and fruit quality in processing tomato. *Acta Hortic.* 700, 129–132.
- Pedro, A. M. K. and M. M. C. Ferreira. 2007. Simultaneously Calibrating Solids, Sugars and Acidity of Tomato Products Using PLS2 and NIR Spectroscopy. *Anal. Chim. Acta*, 595: 221–227.
- Rezende-Fontes P. C., R. Arruda-Sampaio, and F. Luiz-Finger. 2000. Fruit size, mineral composition and quality of trickle-irrigated tomatoes as affected by potassium rates. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, Brasilia 35(1): 21-25.

- Rivera-Martínez A., F. Pomar-Barbeito, A. Taboada-Arias, J. A. Fernández-González, y U. Rodríguez-Beceiro. 2007. Evaluación de parámetros de calidad en cultivares y ecotipos de tomate para consumo en fresco. *Seminario de Especialistas en Horticultura* 15:561-569.
- Sainju, U. M., R. Dris, and B. Singh. 2003. Mineral Nutrition of tomato. *Food, Agriculture & Environment* 1(2): 176–183.
- Sainju, U. M., Singh, B. P., S. Rahman y V. R. Reddy 2000. Tillage, cover crop and nitrogen fertilization influence tomato yield and nitrogen uptake. *HortScience*. 35:217-221.
- San Martín-Hernández C., V. M. Ordaz-Chaparro, P. Sánchez-García, M. T. B. Colinas-León, L. Borges-Gómez. 2012. Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponía con diferentes granulometrías de tezontle. *Agrociencia* 46: 243-254.
- SAS Institute Inc. 2002. SAS/STAT Users Guide. Version 9. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.
- Somogy, M. 1952. Notes on sugar determinations. *J. Biol. Chem.* 195: 19-23.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In: *Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC*. Lunteren, Wageningen, The Netherlands. pp: 633-650.
- Turhan A., and V. Seniz. 2009. Estimation of certain chemical constituents of fruits of selected tomato genotypes grown in Turkey. *African Journal of Agricultural Research* 4(10): 1086-1092.
- Vicente A. R., G. A. Manganaris, G. O. Sozzi and C. H. Crisosto. 2009. Nutritional quality of fruits and vegetables. In: W. J. Florkowski, R. L. Shewfelt, B. Brueckner and S. E. Prussia. *Postharvest handling: A system approach*. Elsevier Inc. Academic Press. Pp. 57-106.
- Wang H., and L. Cheng. 2011. Differential Effects of Nitrogen Supply on Skin Pigmentation and Flesh Starch Breakdown of ‘Gala’ Apple. *Hortscience* 46(8):1116–1120.
- Wang M., Q. Zheng, Q. Shen and S. Guo. 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences* 14: 7370-7390.
- Wang Y-T, SWang, Y.-T., Huang, S.-W., Liu, R.-L. and Jin, J.-Y. (2007), Effects of nitrogen application on flavor compounds of cherry tomato fruits. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 170: 461–468.
- Wang, Y.T., Liu R.L., Huang, S.W., Jin J.Y., 2009. Effects of potassium application on flavor compounds of cherry tomato fruits. *J. Plant Nutr.* 32, 1451–1468.
- Winsor, G.W., 1979. Some factors affecting the quality and composition tomatoes. *Acta Horticulturae*, 93, 335–341.

- Wuzhong N. 2002. Yield and quality of fruits of solanaceous crops as affected by potassium fertilization. *Better Crops International* 16(1):6-8.
- Xiao-guang W., Z. Xin-hua, J. Chun-ji, L. Chun-hong, CONG-Shan, WU-Di, C. Yan-qiu, Y. Hai-qiu and W. Chun-yan. 2014. *Journal of Integrative Agriculture*, Advance Online Publication.
- Yilmaz E. 2001. The chemistry of fresh tomato flavor. *Turk J. Agric. F.* 25: 149-155.
- Zekki, H., L. Gauthier, and A. Gosselin. 1996. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121(6):1082-1088.

CAPÍTULO 4. CAROTENOIDES, VITAMINA C Y AZÚCARES EN FUNCIÓN DE N Y K EN TOMATE HIDROPÓNICO

RESUMEN

Se estudió el efecto de la concentración de N en la solución nutritiva (10, 12, 14 y 16 mol_c m⁻³) durante los primeros 45 días después del trasplante (ddt) y la de potasio (5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³) de 46 a 170 ddt en la concentración de licopeno, β-caroteno, azúcares totales (azúcares) y vitamina C (vit C) en frutos de tomate de los racimos primero, tercero y quinto. Se utilizó un arreglo factorial en parcelas divididas, designando al N como parcela grande y K como parcela chica; se obtuvieron 20 tratamientos con 6 réplicas. Cada unidad experimental fue una planta maceta⁻¹ con 13 L de tezontle. Licopeno, β-caroteno, azúcares y vit C mostraron efectos significativos por N y K, aunque la interacción N*K fue no significativa en las dos últimas variables. En el primer racimo, incrementos del N en la solución nutritiva (10 a 16 mol_c m⁻³), redujeron 18 % la concentración del licopeno y 25 % en β-caroteno. Concentraciones crecientes de K en la solución nutritiva (5 a 13 mol_c m⁻³) aumentaron tanto licopeno como β-caroteno. De manera interesante, las combinaciones N:K (en mol_c m⁻³) de 10:9, 12:11, 14:11 y 10:13, promovieron la mayor síntesis de ambos compuestos. La concentración de azúcares más alta se obtuvo con N de 14 a 16 mol_c m⁻³ y K de 9 a 13 mol_c m⁻³. Los mayores niveles de vit C se observaron con N a 12 y K a 13 mol_c m⁻³. Concentraciones crecientes de N aumentan el contenido de azúcares (primer racimo), pero reducen la concentración de vitamina C, licopeno y β-caroteno en frutos de los racimos primero y tercero; en tanto que el K aumenta los valores de las variables aquí evaluadas; y la interacción N*K muestra respuestas similares pero diferenciales entre racimos en ambos carotenoides aunque sin efectos en azúcares y vit C.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum*, manejo nutrimental, etapas fenológicas, licopeno, β-caroteno.

4.1. INTRODUCCIÓN

El tomate es la hortaliza que más se comercializa en el mundo y su consumo es tanto en fresco como procesado. Este fruto es fuente de diferentes compuestos importantes en la alimentación humana como fibra, proteínas, ácidos orgánicos, minerales, vitaminas, carotenoides y

carbohidratos, entre otros (Yilmaz, 2001; Bhowmik *et al.*, 2012). El tomate puede abastecer hasta el 37 % de la necesidad de vitamina C en la dieta del ser humano (Lee y Kader, 2000; Audestirk *et al.*, 2003; Palmer, 2009; Lisko *et al.*, 2014), misma que resulta indispensable para el buen funcionamiento del organismo. Asimismo, en el grupo de los carotenoides sobresalen el licopeno y β -caroteno. Mientras que el licopeno presenta actividad antioxidante contra especies reactivas de oxígeno y radicales libres, y por tanto, reduce el riesgo de padecer enfermedades crónicas tales como cáncer, osteoporosis y cardiovasculares (Wertz *et al.*, 2004; Kin-Weng *et al.*, 2010; Burton-Freeman y Raimers, 2011); el β -caroteno muestra actividad provitamina A (Stahl y Sies, 2005; Tang, 2010). Otro grupo importante constituyente del fruto, son los azúcares producto de la fotosíntesis, los cuales influyen en gran medida en el sabor y la calidad del fruto (Beckles, 2012).

Los contenidos de licopeno, vitamina C y el K, entre otras moléculas, son importantes para el valor nutricional del tomate (Brunele-Caliman, *et al.*, 2010), pero su composición y proporción varía según el genotipo (Prudent *et al.*, 2009; Sulieman *et al.*, 2011), el ambiente (temperatura, luz, humedad) (Cebolla-Cornejo *et al.*, 2011) y el manejo nutrimental. De ahí que el mantenimiento de la nutrición mineral es un factor pre cosecha clave que determina el rendimiento y calidad del fruto de plantas de tomate (Fanasca *et al.*, 2006), y en este ámbito, el nitrógeno (N) y el potasio (K) tienen funciones determinantes en el rendimiento y calidad de las cosechas. El K es esencial en fotosíntesis y procesos relacionados con translocación de fotosintatos, síntesis de proteínas, activación de enzimas, mantenimiento de la turgencia celular, extensión celular, entre otros procesos internos que afectan el metabolismo (Cakmak, 2005; Armengaud *et al.*, 2009; Balotf *et al.*, 2012; Hawkesford *et al.*, 2012). El N es componente de la mayoría de las moléculas orgánicas y como en casi todas las especies vegetales, en el cultivo de tomate es el principal nutrimento constituyente de la planta (Jones, 2008). Cuando la disponibilidad de este nutrimento aumenta durante el cultivo, se favorece el crecimiento vegetativo a expensas del crecimiento reproductivo (Sainju *et al.*, 2003) afectando severamente la calidad, la cual es positivamente influida por la nutrición potásica (Hartz *et al.*, 2005). A pesar de la baja concentración de compuestos nutraceuticos en frutos de esta especie, sus altos niveles de consumo facilitan que pequeños incrementos en su contenido puedan tener consecuencias de gran alcance en la dieta del consumidor (Mellidou *et al.*, 2012). Puesto que el desbalance nutrimental afecta la calidad del fruto (Azfal *et al.*, 2015) y poco se ha estudiado el efecto de estos nutrimentos en indicadores de

calidad, el objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto de la nutrición con N y K sobre la concentración de carotenoides, vitamina C y azúcares del fruto en tres racimos de tomate cultivado en hidroponía.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en condiciones hidropónicas en invernadero, utilizando plántulas de tomate cv. Charleston (Rogers Seeds®) de 37 días de edad. En etapa vegetativa (primeros 45 días después del trasplante (ddt)) se evaluaron las concentraciones de 10, 12, 14 y 16 mol_c de N m⁻³ de solución nutritiva, suministrando 75 % como NO₃⁻ y 25 % como NH₄⁺; y en etapa reproductiva (46 a 170 ddt) las concentraciones de K con 5, 7, 9, 11 y 13 mol_c m⁻³. Se utilizó un arreglo factorial en parcelas divididas, con N como parcela grande y K como parcela chica, obteniendo un total de 20 tratamientos con seis repeticiones cada uno. La asignación de las unidades experimentales (UE) fue al azar en la etapa vegetativa pero restringida en la etapa reproductiva. Cada UE fue una planta por maceta con 13 L de tezontle rojo (≤12 mm de diámetro de partícula).

De acuerdo a la etapa fenológica, cada unidad experimental fue irrigada usando la solución Steiner (1984) modificada en N y K como se indicó anteriormente. En los primeros 30 días después del trasplante (ddt) se aplicaron ocho riegos por día y cada riego tuvo una duración de 5 min a intervalos de 1 h usando goteros con un gasto de 4 L h⁻¹. Después de los 30 días y hasta la conclusión de la cosecha (167 ddt), se aplicaron 16 riegos diarios.

4.2.1. Variables evaluadas

Las variables se analizaron en frutos completamente rojos, procedentes en orden cronológico de los racimos primero, tercero y quinto, considerando un fruto por UE. Asimismo, con un Data Logger Hobo H8 Onset Computer Corporation^R, diariamente se registraron temperaturas máximas y mínimas y los valores se reportaron como promedios decenales.

4.2.1.1. Azúcares totales

La determinación de azúcares totales se hizo a partir de 1 g de jugo por el método colorimétrico de antrona (Witham *et al.*, 1971) y mediante el uso de estándares de referencia con soluciones de D-glucosa de concentración conocida en la curva de calibración. Las muestras fueron leídas a 600

nm en un espectrofotómetro (Specronic 20 Baush and Lomb®, USA), obteniendo el valor en g 100 g⁻¹ de fruto fresco (FF).

4.2.1.2. Vitamina C

En la evaluación de la concentración de vitamina C en fruto de tomate se empleó la metodología descrita por Boland (1990) por titulación con solución de Tillman (DFI-2,6 diclorofenol indofenol 0.02 %). Un mililitro de jugo obtenido con un extractor (Tur Mix, México) se mezcló con 30 mL de ácido oxálico al 0.5 %, se tomó una alícuota de 5 mL y se tituló con la solución de Tillman hasta cambio de color a rosa pálido. Se utilizó ácido L-ascórbico como estándar para la elaboración de la curva de calibración correspondiente, expresando la vitamina C en mg de ácido L-ascórbico por cada 100 g⁻¹ FF.

4.2.1.3. Licopeno y β-caroteno

Los carotenoides fueron extraídos de acuerdo a la metodología de Lin y Chen (2003) y Galicia *et al.* (2008), con algunas adaptaciones. Se molieron 2 g FF por 1 min en una licuadora con 10 mL de la mezcla etanol:hexano 4:3 v/v (solvente de extracción), 0.05 g de carbonato de magnesio y 1 mL de solución de hidroxitolueno butilado (BHT) al 0.025 %. La muestra se agitó 30 min a 140 rpm en un agitador orbital (Lab-Line, USA, 2001) en condiciones de luz reducida. La fase superior se transfirió a un matraz de 125 mL, mientras que la inferior fue extractada de nuevo con 16 mL de solvente de extracción y se agitó como en el inicio. Nuevamente, la fase superior se transfirió al mismo matraz y la inferior se volvió a extraer con 5 mL de hexano a 280 rpm durante 20 min. La muestra se filtró en papel Whatman No. 1, colocando el extracto en el mismo matraz, donde se añadieron 37.5 mL de agua destilada y 25 mL de NaCl al 10 % para una partición de fases; la fase orgánica (superior) se colectó y evaporó a sequedad a 35 °C. La muestra nuevamente se disolvió con 1.5 mL de cloruro de metileno, se filtró a través de una membrana de 0.45 μm y se colocó en un vial ámbar para su almacenamiento a -20 °C hasta el análisis por HPLC. Los carotenoides (Figura 1) se identificaron por comparación en los tiempos de retención con los estándares de referencia a los cuales se les hizo un barrido espectral: en licopeno se obtuvieron 3 máximos de absorción con 448, 508 y 472 nm (Figura 1a), siendo este último el de mayor absorbancia y elegido para el análisis en este trabajo; y en β-caroteno se obtuvieron dos máximos de absorbancia a 456 y 480 nm (Figura 1b), sin embargo el análisis HPLC *per se* (Figura 1c), se observó favorable para

ambos compuestos a 472 nm. La cuantificación en mg 100 g⁻¹ FF se realizó por referencia a la curva de calibración a concentraciones de 10, 30, 100, 200, 300 y 400 µg mL⁻¹ en licopeno y 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 30.0 y 60 µg mL⁻¹ para β-caroteno. El análisis de cada muestra se hizo por duplicado, reportando los valores promedio en mg 100 g⁻¹ FF. Las ecuaciones de regresión de las curvas de calibración fueron $Y=145.08605x + 1466.63042$, $R^2=0.996$ para licopeno y $Y=62.96916x + 30.38498$, $R^2=0.987$ para β-caroteno.

Las muestras se analizaron con la fase móvil según Lin y Chen (2003), compuesta por butanol, acetonitrilo y diclorometano en la proporción 29.7:69.3:1. La elución se efectuó en modo isocrático, inyectando 20 µL por cada muestra, a una tasa de flujo de 2 mL min⁻¹ y 7 min de duración cada uno.

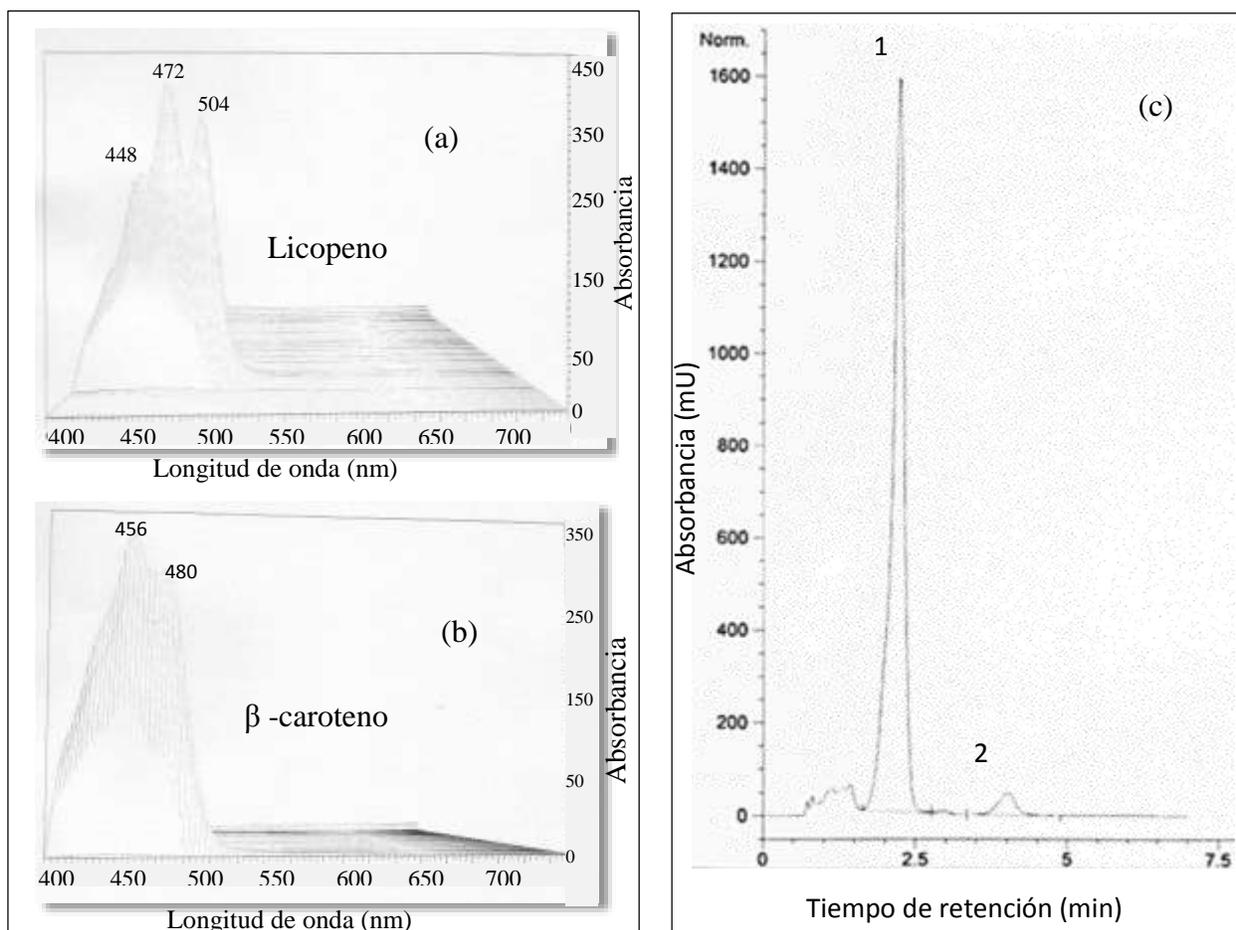


Figura 1. Barrido espectral de carotenoides (a y b); y análisis de licopeno (1) y β-caroteno (2) por HPLC en frutos de tomate completamente rojos (c).

Para el análisis de carotenoides se usó un equipo HPLC Agilent 1200 (Alemania) con un detector en arreglo de diodos (DAD) y una columna Zorbax Eclipse XDB-C18 4.6x150 mm, 5 µm Ø (USKH0637359); los solventes, hexano (J.T.Baker, México), cloruro de metileno, 1-butanol y los estándares licopeno y β-caroteno (Sigma-Aldrich, USA); y el etanol (Fermont, México), fueron todos grado HPLC.

4.2.4. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y las pruebas requeridas (Homogeneidad de varianzas de Bartlett, Normalidad de Shapiro-Wilk y de Independencia de Durbin-Watson) para el ANOVA, las cuales resultaron razonablemente normales, con varianzas homogéneas e independientes; y las medias se compararon con la prueba de Tukey DHS ($p \leq 0.05$) con el programa SAS Ver. 9 (SAS, 2011).

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Azúcares totales

Los azúcares totales en fruto fueron afectados tanto por el N en el racimo primero, como por el K en los tres racimos evaluados, empero la interacción N*K fue no significativa (Cuadro 1). El aumento de N en la solución hidropónica incrementó la concentración de azúcares totales sólo en frutos del primer racimo cuyo valor más alto fue 3.24 g 100 g⁻¹ FF, obtenido con 14 y 16 mol_c m⁻³ (Figura 2a). Contrario a nuestros resultados, Parisi *et al.* (2006) obtuvieron un deterioro en el contenido de azúcares del fruto por efecto del suministro de altas dosis de N en el cultivo de tomate. Por otra parte, en concordancia con nuestros resultados, Caretto *et al.* (2008) reportan que el cambio de K de 3.5 a 11.5 mol_c m⁻³ presenta efectos positivos en los azúcares del fruto de tomate.

Cuadro 1. Efecto del suministro de N en la solución nutritiva en etapa vegetativa y de K en etapa reproductiva y de su interacción N*K sobre la concentración de azúcares totales y vitamina C en frutos de tomate de tres racimos.

| Fuente de variación | Azúcares totales | | | Vitamina C | | |
|---------------------|------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| | Racimo 1° | Racimo 3° | Racimo 5° | Racimo 1° | Racimo 3° | Racimo 5° |
| N | 0.0040 * | 0.1629 ns | 0.4490 ns | <.0001 * | 0.0131 * | <.0001 * |
| K | 0.0190 * | 0.0016 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * |
| N*K | 0.9288 ns | 0.9953 ns | 0.9982 ns | 0.8113 ns | 0.1570 ns | 0.4058 ns |
| CV (%) | 13.2 | 18.9 | 12.4 | 14.3 | 20.4 | 15.7 |

*Significativo ($p \leq 0.05$); CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo.

El K desempeña funciones importantes en el metabolismo de los carbohidratos (Hawkesford *et al.*, 2012), su deficiencia reduce tanto la fotosíntesis y procesos relacionados como la exportación de sacarosa desde las hojas fuente (Cakmak, 2005) a través del floema (Sauer, 2007; Jensen *et al.*, 2013). Este nutriente, participa como ion acompañante en la liberación de azúcares desde células del mesófilo de las hojas (representando 80-90 % de los solutos transportados) hasta los órganos demanda (Engels *et al.*, 2012) con lo que afecta la distribución de biomasa de hojas, tallos y frutos (Kanai *et al.*, 2007). De hecho, Wuzhong (2002) observó que al aumentar el nivel de aplicación de K al cultivo de tomate en campo, el contenido de azúcares en fruto también aumentó. Estos antecedentes confirman los efectos positivos del K aquí encontrados, debido a que su incremento en la solución de cultivo en etapa reproductiva, mostró relaciones positivas en el comportamiento de los azúcares totales del fruto. Cuando la concentración de este catión cambió desde 5 a 13 mol_e m⁻³, la concentración de azúcares aumentó 13, 22 y 20 % en frutos de los racimos primero, tercero y quinto, respectivamente; con la aplicación de K entre 9 y 13 mol_e m⁻³, se presentaron los valores más altos de azúcares del fruto (Figura 2b). Este resultado también concuerda con el hallazgo reportado por Caretto *et al.* (2008) ya que al aplicar K en niveles de 3.5 a 11.5 mol_e m⁻³ en el medio de cultivo obtuvieron efectos positivos y lineales en el contenido de azúcares del fruto de esta especie.

Asimismo, la tendencia de concentración de azúcares en los frutos fue diferencial entre racimos. Estos azúcares aumentaron en el transcurso del ciclo de cultivo; por un lado, la competencia impuesta por raíces, hojas y racimos en formación y desarrollo, pudieron reducir la disponibilidad de carbohidratos para los frutos del primer racimo; mientras que al avanzar el ciclo de cultivo, a las plantas se les eliminaron gradualmente las hojas viejas, reduciendo con esto órganos de demanda. Como parte del ciclo de vital, después que las hojas alcanzan la madurez completa, estas entran en senescencia, la cual es un fenómeno natural que puede ser inducida por la deficiencia de K (Armengaud *et al.*, 2004); en esta condición, las hojas pierden clorofila, se desorganiza el aparato fotosintético con la degradación de la Ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco) y se permite el reciclado de carbono y nutrientes que son transportados a estructuras de demanda (hojas jóvenes y frutos) (Himmelblau y Amasino, 2001; Feller *et al.*, 2008; Falqueto *et al.*, 2009). Por tanto, esto pudo favorecer el llenado del último racimo y consecuentemente, el azúcar de los frutos incrementó de manera considerable en el quinto racimo evaluado (Figura 2b).

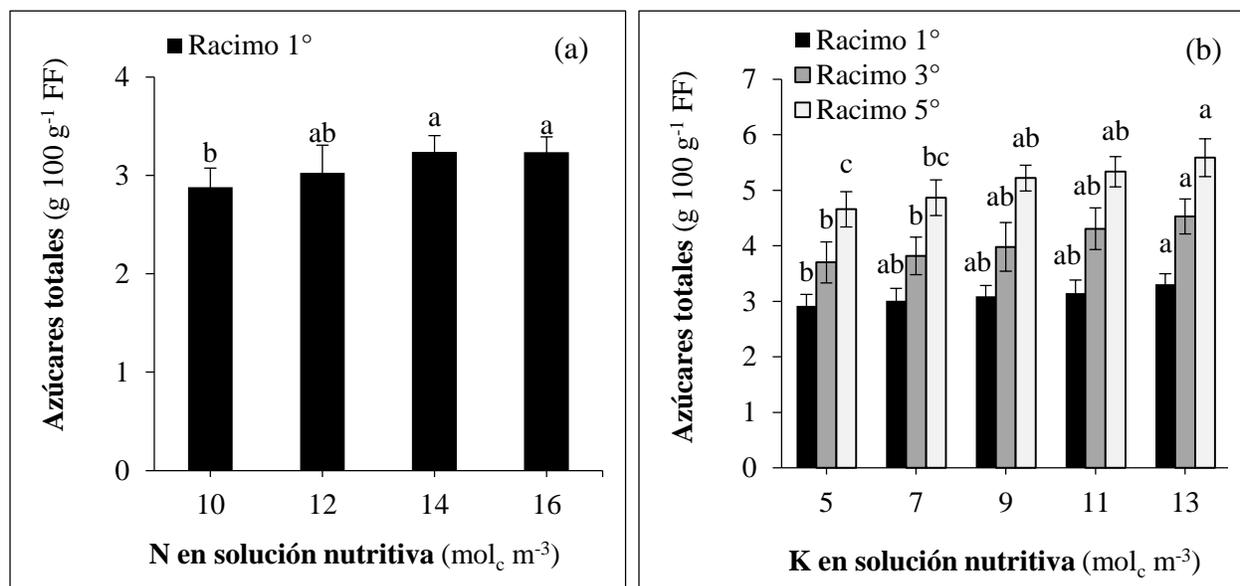


Figura 2. Concentración de azúcares totales en frutos de tomate por efecto de la concentración de N (a) en la solución nutritiva en etapa vegetativa y de K (b) en etapa reproductiva. Barras ± desviación estándar en frutos del mismo racimo con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

4.3.2. Vitamina C

Independientemente de los tratamientos de N y K evaluados, la concentración de vitamina C, fue mayor en el primer racimo, y menor en el tercero (Figuras 3a y 3b).

En esta investigación, las diferentes concentraciones de N y K empleadas en la solución nutritiva, tuvieron efectos significativos en el contenido de vitamina C. Sin embargo, la interacción N*K resultó no significativa (Cuadro 1). Existen estudios que reportan efectos positivos de los fertilizantes nitrogenados en lechuga, pero negativos en repollo, cítricos y coliflor (Lee y Kader, 2000); y en tomate, la aplicación de altos niveles de N durante el cultivo, disminuye el contenido de vitamina C del fruto (Dumas *et al.*, 2003); mientras que el K ejerce una influencia positiva, incrementando su síntesis (Wien, 1997; Azfal *et al.*, 2015).

En general, la aplicación de concentraciones crecientes de N en la etapa vegetativa del tomate, disminuyó la concentración de vitamina C en frutos de los tres racimos, obteniéndose con 12 mol_c de N por m⁻³ de solución nutritiva los máximos valores de esta variable con medias de 7.01 y 2.92 y 4.6 mg 100 g⁻¹ FF, para el primero, tercero y quinto racimo, respectivamente (Figura 3a). De

acuerdo con Dumas *et al.* (2003), estos resultados indican relaciones inversas entre el suministro de N y el contenido de vitamina C del fruto.

Diferentes tendencias a las observadas con el N fueron registradas en el caso del K, donde el incremento en su concentración de 5 a 13 mol_c m⁻³, aumentó la concentración de vitamina C en 33, 38 y 37 % en frutos del primero, tercero y quinto racimo, respectivamente (Figura 3b). Como el ácido ascórbico es un compuesto hidrosoluble derivado de los carbohidratos, cuyos precursores son L-galactosa, L-galactono-1,4-lactone y L-gulose (Locato *et al.*, 2013; Lisko *et al.*, 2014), sus mayores concentraciones en frutos con mayor disponibilidad de K, probablemente se relacionan con el estímulo tanto de la síntesis de carbohidratos, como del transporte de azúcares derivados de la fotosíntesis hacia el fruto (Vicente *et al.*, 2009; Bernardi y Verruma-Bernardi, 2013) como se observó en nuestros resultados, puesto que la acumulación de estos fotosintatos promueve la síntesis de vitamina C (Mengel y Kirkby, 2001).

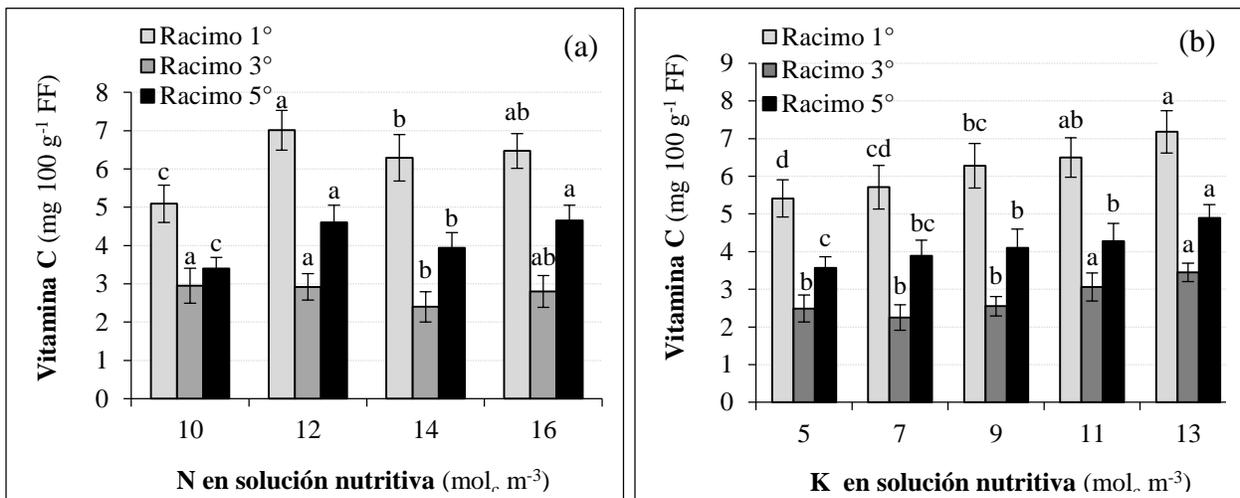


Figura 3. Concentración de vitamina C en frutos de tomate por efecto de la concentración de N (a) en la solución nutritiva en etapa vegetativa y de K (b) en etapa reproductiva. Barras ± desviación estándar en frutos del mismo racimo con letras distintas, indican diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

4.3.3. Licopeno

La variación del suministro de N en la solución nutritiva en etapa vegetativa y de K en etapa reproductiva, además de su interacción N*K, generaron efectos significativos pero diferenciales entre racimos en el contenido de licopeno (Cuadro 2). La concentración de N mostró una relación inversa con el contenido de licopeno, dado que se registraron decrementos del 18 % en la

concentración de este pigmento en frutos del primer racimo de plantas que recibieron concentraciones de N entre 10 y 16 mol_c m⁻³ (Figura 4a). A este respecto, los resultados de las investigaciones son contradictorios. Por ejemplo, Dumas *et al.* (2003) encontraron que los niveles más altos de licopeno se alcanzan con el nivel más bajo de N, registrándose concentraciones de licopeno de 6.8, 4.4 y 3.8 mg 100 g⁻¹ de materia fresca por efecto de dosis crecientes de N de 1, 12.9 y 15.8 mol_c m⁻³ respectivamente. Por otro lado Montagú *et al.*, (1990) reportaron incrementos del 30 % en el contenido de licopeno en frutos de plantas de tomate cultivadas con tasas crecientes de N desde 0 hasta 600 kg ha⁻¹.

Cuadro 2. Efecto del suministro de N en la solución nutritiva en etapa vegetativa, del K en etapa reproductiva y de su interacción (N*K) en la concentración de licopeno y β-caroteno en frutos de tomate de tres racimos analizados por HPLC.

| Fuente de variación | Licopeno | | | β-caroteno | | |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| | Racimo 1° | Racimo 3° | Racimo 5° | Racimo 1° | Racimo 3° | Racimo 5° |
| N | 0.0193 * | 0.5637 ns | 0.7218 ns | 0.0006 * | 0.0269 * | 0.1315 ns |
| K | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | 0.0002 * | <.0001 * | <.0001 * |
| N*K | 0.0005 * | 0.6822 ns | 0.0855 ns | 0.0360 * | <.0001 * | <.0001 * |
| CV (%) | 14.8 | 14.92 | 8.0 | 11.0 | 7.3 | 6.9 |

*Significativo ($p \leq 0.05$); CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo.

Diferentes estudios reportan incrementos en el contenido de licopeno de frutos de tomate cuando aumenta la concentración de K en el medio de cultivo (Serio *et al.*, 2007; Taber *et al.*, 2008). Similarmente, en esta investigación se obtuvieron respuestas positivas en la síntesis de este carotenoide por la concentración de K. El K puede estar involucrado en el contenido de carotenoides dada su acción en la actividad de enzimas que regulan el metabolismo de carbohidratos tales como la piruvato cinasa, la fosfofructocinasa, y en la formación de acetil CoA la cual está implicada en la obtención del isopentenil difosfato (IPP) cuya molécula es el primer precursor de los carotenoides (Trudel y Ozburn, 1971; Fanasca *et al.*, 2006). En nuestro estudio, al aumentar el K de 5 a 13 mol_c m⁻³, la concentración de licopeno incrementó en aproximadamente 39, 49 y 51% en frutos de los racimos primero, tercero y quinto, respectivamente (Figura 4b).

Las mayores concentraciones de licopeno se registraron entre niveles de K de 9 y 13 mol_c m⁻³, (Figura 4b); mientras que concentraciones de N iguales o inferiores a 14 mol_c m⁻³ y dentro de cada nivel de K en la solución nutritiva, fueron suficientes para obtener los mayores valores de licopeno.

En este sentido, las mejores combinaciones de N y K para promover la síntesis de licopeno fueron 10:9, 12:11, 14:11 y 10:13 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Efecto de la combinación de N aplicado en la solución nutritiva durante la etapa vegetativa y del K en etapa reproductiva del cultivo del tomate en la concentración de licopeno y β -caroteno en frutos de diferentes racimos analizados por HPLC.

| Combinación N:K (mol _c m ⁻³) | Licopeno | | β -Caroteno | |
|--|--|-------------|-------------------|-------------|
| | ------(mg 100 g ⁻¹ FF)----- | | | |
| | Racimo 1° | Racimo 1° | Racimo 3° | Racimo 5° |
| 10:5 | 3.88 cde [¶] | 1.214 abcd | 0.845 defgh | 1.116 bc |
| 10:7 | 3.754 cde | 1.171 abcde | 0.772 efgh | 1.077 bcd |
| 10:9 | 7.32 a | 1.354 a | 0.896 cdefg | 0.819 efg |
| 10:11 | 5.138 abcde | 1.268 abc | 1.134 abc | 0.935 cdefg |
| 10:13 | 5.521 abcde | 1.124 abcde | 0.931 bcdef | 1.377 a |
| 12:5 | 3.905 cde | 0.93 bcde | 0.669 gh | 0.819 efg |
| 12:7 | 3.38 de | 0.99 bcde | 0.614 h | 0.762 fg |
| 12:9 | 5.921 abc | 0.936 bcde | 0.97 bcde | 1.036 bcde |
| 12:11 | 7.219 a | 1.289 ab | 0.985 bcde | 0.943 cdefg |
| 12:13 | 5.629 abcd | 1.2 abcde | 0.717 fgh | 1.244 ab |
| 14:5 | 4.144 cde | 1.078 abcde | 0.68 gh | 0.715 g |
| 14:7 | 4.374 cde | 0.843 e | 0.767 efgh | 1.023 bcde |
| 14:9 | 4.231 cde | 0.952 bcde | 0.873 defg | 1.116 bc |
| 14:11 | 6.822 ab | 1.165 abcde | 1.229 a | 1.018 bcde |
| 14:13 | 5.19 abcde | 0.912 cde | 0.888 defg | 1.181 abc |
| 16:5 | 3.273 e | 0.937 bcde | 1.018 abcd | 1.106 bc |
| 16:7 | 3.673 cde | 0.893 de | 0.673 gh | 0.833 defg |
| 16:9 | 4.406 cde | 0.916 cde | 0.838 defgh | 0.949 cdefg |
| 16:11 | 4.77 bcde | 1.168 abcde | 1.16 ab | 1.225 ab |
| 16:13 | 4.824 bcde | 1.04 abcde | 1.023 abcd | 1.009 bcdef |

[¶]Promedios en cada columna con misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$)

Además de la influencia nutrimental en el contenido de licopeno, la síntesis de este carotenoide presentó diferencias entre racimos, con un incremento en frutos del racimo primero al quinto. Esto coincidió con la reducción de las temperaturas máximas al final el ciclo de cultivo (Figura 5), dado que se registraron temperaturas inferiores a 30 °C durante el mes de noviembre y diciembre en cuyos meses se cosecharon frutos del racimo tercero y quinto, respectivamente. Las altas temperaturas inhiben la síntesis de licopeno (Tran *et al.*, 1999), siendo su intervalo óptimo entre 16 y 26 °C; por tanto, durante la maduración, si la temperatura supera 30 °C, el contenido de licopeno disminuye (Robertson *et al.*, 1995; Brandt *et al.*, 2006).

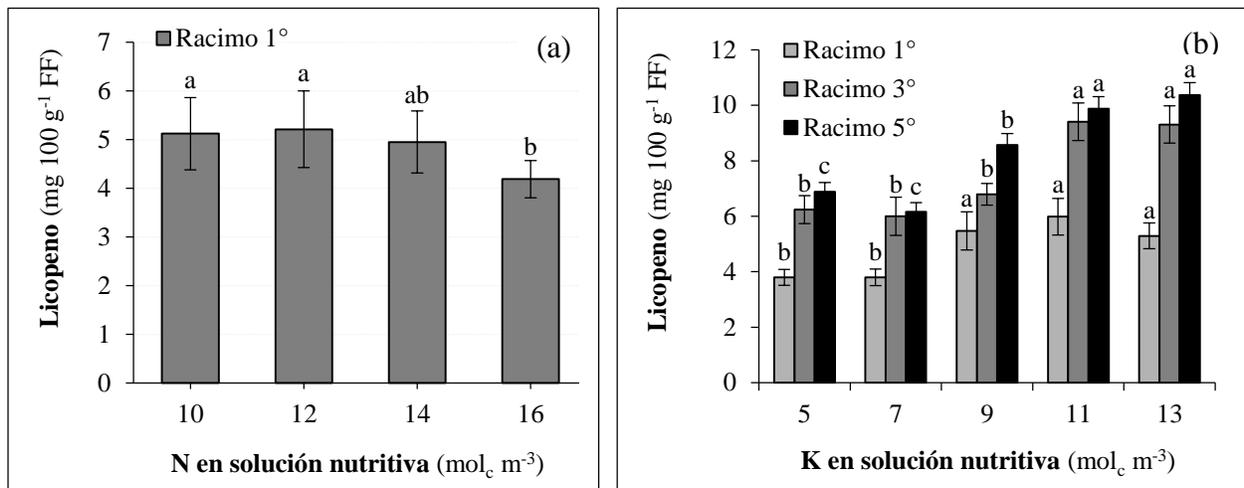


Figura 4. Efecto del suministro de N en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) en el cultivo de tomate sobre la concentración de licopeno de frutos de tres racimos. Barras \pm desviación estándar con diferentes letras en cada racimo, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

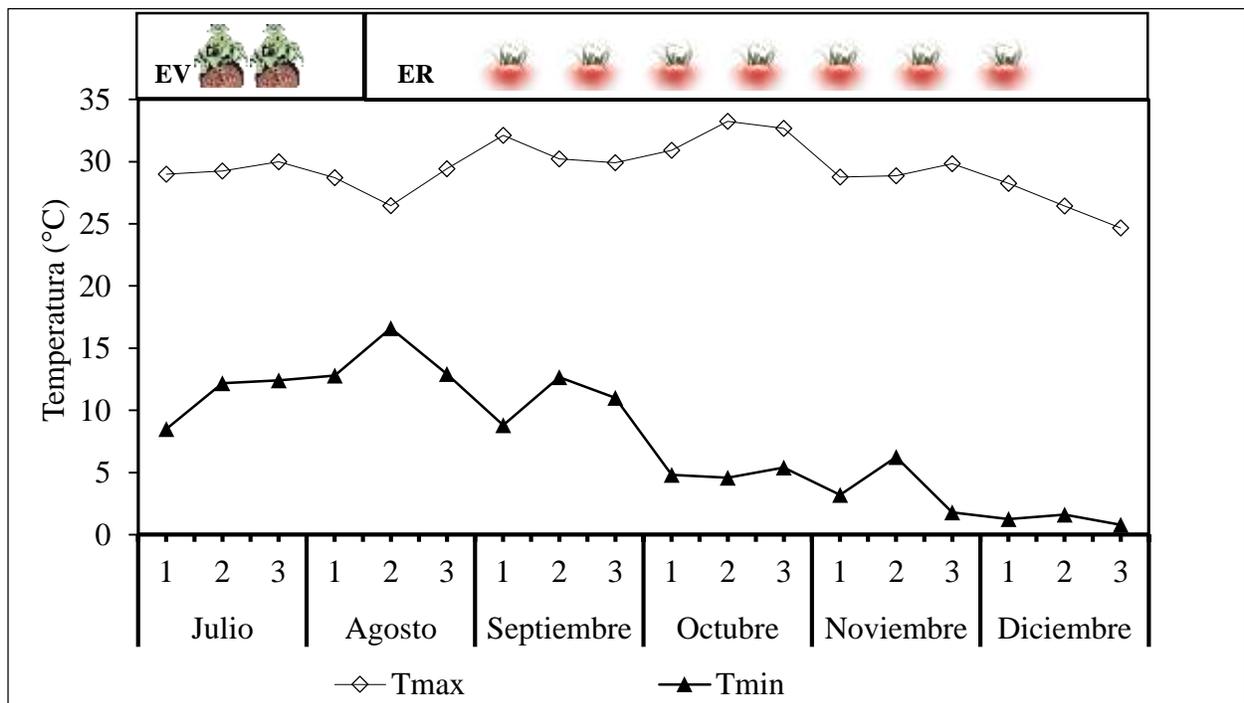


Figura 5. Registro de temperaturas máximas y mínimas durante las etapas vegetativa (EV) y reproductiva (ER) del cultivo de tomate de julio a diciembre de 2012.

4.3.4. β -caroteno

Las concentraciones de N y K en la solución nutritiva, además de su interacción, evaluados por etapas fenológicas en la solución nutritiva del cultivo de tomate, mostraron efectos significativos en la concentración de β -caroteno del fruto (Cuadro 2). En frutos del primer racimo este carotenoide presentó una respuesta negativa a los incrementos en la concentración de N, causando disminuciones del 25 % al elevar el N en la solución nutritiva de 10 a 16 mol_c m⁻³ (Figura 6a). Por el contrario, el K promovió la síntesis de β -caroteno; ejemplo de ello es que por el aumento en la concentración de K en la solución nutritiva de 5 a 13 mol_c m⁻³, la concentración de este pigmento incrementó en frutos de los racimos primero, tercero y quinto en 3, 11 y 28 %, respectivamente (Figura 6b). Estos resultados contrastan con los reportados por Taber *et al.* (2008), quienes reportaron que el K redujo el contenido de β -caroteno. Entre racimos se observaron tendencias similares al licopeno, el cual al ser afectado por el K y ser el licopeno el precursor del β -caroteno, este pigmento presentó respuestas positivas por este nutriente en cada racimo.

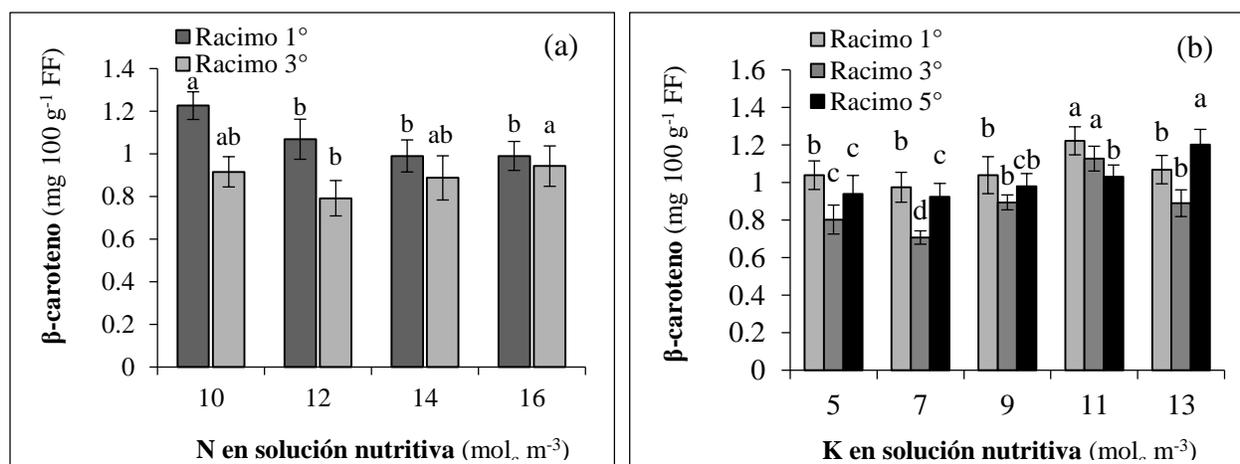


Figura 6. Efecto del suministro de N en etapa vegetativa (a) y del K en etapa reproductiva (b) durante el cultivo de tomate en la concentración de β -caroteno de frutos de diferentes racimos. Barras \pm desviación estándar con diferentes letras indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Aunado a lo anterior, los efectos individuales de los nutrientes evaluados por etapas fenológicas, se mantuvieron en la interacción N*K. Esto significa que la síntesis de β -caroteno es favorecida al elevar la concentración de K en cada nivel de N, logrando los valores máximos de este carotenoide con concentraciones de K entre 9 y 13 mol_c m⁻³. En general, dentro de cada nivel de K, la producción de β -caroteno tendió a incrementar a medida que se redujo el nivel de N en la solución nutritiva, (a excepción de la concentración de K entre 9 y 11 mol_c m⁻³ donde al elevar el N durante

el cultivo, aumentó el contenido de este carotenoide en frutos de los racimos tercero y quinto). Por tanto, las mejores combinaciones para obtener los mayores niveles de este pigmento correspondieron a las proporciones N:K de 10:9, 10:13 y 14:11 (Cuadro 3).

Independientemente de los efectos nutrimentales, la concentración de β -caroteno mostró un comportamiento variable entre racimos; los frutos de los racimos primero y quinto presentaron sus valores más altos. Esta respuesta puede ser producto ya sea por el efecto individual del suministro N y K y su interacción durante el cultivo como se indicó anteriormente, como por el efecto ambiental donde la reducción de la temperatura al final del ciclo de cultivo (Figura 5) puede aumentar la concentración de este carotenoide entre racimos como sucede en licopeno, siendo este último, el sustrato requerido para la síntesis de β -caroteno.

4.4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación nos permiten formular las conclusiones siguientes.

La constitución nutraceutica del fruto de tomate es influida tanto por la composición nutrimental como por la temperatura durante el cultivo hidropónico.

Al suministrar concentraciones crecientes de N de 10 a 16 mol_c m⁻³ en etapa vegetativa, se elevan el contenido de azúcares, pero se reducen la cantidad de vitamina C, licopeno y β -caroteno; en tanto que en la etapa reproductiva del cultivo de tomate, al elevar el K de 5 a 13 mol_c m⁻³, se incrementa estadísticamente los valores de los azúcares, vitamina C y los carotenoides evaluados en esta investigación; mientras que la interacción (N*K) muestra respuestas diferenciales entre racimos en ambos carotenoides pero sin efectos en azúcares y vitamina C.

Las mayores concentraciones de azúcares pueden obtenerse con niveles de N de 14 a 16 mol_c m⁻³ y con concentraciones de K de 9 a 13 mol_c m⁻³. Respecto a vitamina C, los tratamientos con N a 12 y K a 13 mol_c m⁻³ son los que permiten obtener los mayores niveles de esta vitamina.

En frutos del primer racimo, el incremento del N en la solución nutritiva (10 a 16 mol_c m⁻³), reduce 18 % la concentración del licopeno y 25 % en β-caroteno, siendo suficientes 10 mol_c de N m⁻³ para lograr las mayores concentraciones de ambos carotenoides.

Concentraciones crecientes de K en la solución nutritiva (5 a 13 mol_c m⁻³), aumentan la concentración de licopeno y β-caroteno. Pero cuando este catión interactúa con N, las mejores combinaciones de estos factores (N:K, en mol_c m⁻³) con 10:9, 10:13, 12:11 y 14:11 pueden ser requeridas para promover la mayor síntesis de licopeno y β-caroteno.

Al reducir la temperatura menor a 30 °C durante el cultivo de tomate, se favorece la síntesis de licopeno y β-caroteno del fruto en virtud de su sensibilidad a altas temperaturas.

4.5. LITERATURA CITADA

- Armengaud, P., R. Breitling, and A. Amtmann. 2004. The potassium-dependent transcriptome of *Arabidopsis* reveals a prominent role of jasmonic acid in nutrient signaling. *Plant Physiology*, 136: 2556-2576.
- Armengaud, P., R. Sulpice, A. J. Miller, M. Stitt, A. Amtmann, and Y. Gibon. 2009. Multilevel analysis of primary metabolism provides new insights into the role of potassium nutrition for glycolysis and nitrogen assimilation in *Arabidopsis* roots. *Plant Physiology* 150: 772-785.
- Audesirk, T., G. Audesirk y B. Byers 2003. *Biología: la vida en la tierra*. Sexta edición. Pearson Educación. México
- Azfal, I., B. Hussain, S. M. Ahmed-Basra, S. H. Ullah, Q. Shakeel and M. Kamran. 2015. Foliar application of potassium improves fruit quality and yield of tomato plants. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus* 14(1): 3-13.
- Balotf, S., A. Niazi, G. Kavosi, and A. Ramezani. 2012. Differential expression of nitrate reductase in response to potassium and sodium nitrate: realtime PCR analysis. *Australian Journal of Crop Science*, 6(1): 130-134.
- Beckles, D. M. 2012. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. Review. *Postharvest Biology and Technology*, 63: 129-140.
- Bernardi, A. C. C., and M. R. Verruma-Bernardi. 2013. Increases in yield and vitamin C levels of tomato grown on K₂H₂P₄-enriched zeolite in an inert-sand substrate. *e-ife* 33:10-13.

- Bhowmik, D., K. P. Sampath-Kumar, S. Paswan, and S. Srivastava. 2012. Tomato-A natural medicine and its health benefits. *Journal of pharmacognosy and phytochemistry*, 1(1): 33-43.
- Brandt, S., Z. Pek, E. Barna, A. Lugasi and L. Helyes 2006. Lycopene content and color ripening tomatoes as affected by environmental conditions. *J. Sci. Food Agric.* 86(4) :568-572.
- Brunele-Caliman, F. R., D. J. Henriques-da Silva, P. C. Stringheta, P. C. Rezende-Fontes, G. Rodrigues-Moreira, and E. Chartuni-Mantovani. 2010. Quality of tomatoes grown under a protected environment and field conditions. *IDESIA (Chile)* 28(2): 75-82.
- Burton-Freeman, B., and K. Reimers. 2011. Tomato consumption and health: emerging benefits. *American Journal of Lifestyle Medicine* 5(2): 182-191.
- Cakmak, I. 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168(4): 521-530.
- Caretto, S., A. Parente, F. Serio, and P. Santamaria. 2008. Influence of potassium and genotype on vitamin E content and reducing sugar of tomato fruits. *HortScience* 43(7): 2048-2051.
- Cebolla-Cornejo, J., S. Roselló, M. Valcárcel, E. Serrano, J. Beltrán, and F. Nuez. 2011. Evaluation of genotype and environment effects on taste and aroma flavor components of Spanish fresh tomato varieties. *J. Agric. Food Chem.*, 59(6): 2440-2450.
- Davies, J. N., G. E. Hobson, and W. B. McGlasson. 1981. The constituents of tomato fruit-the influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 15(3):205-280.
- Dumas Y., M. Dadomo, G. D. Lucca and P. Grolier. 2003. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83: 369-382.
- Engels, C., E. Kirkby, P. White. 2012 Mineral nutrition, yield and source-sink relationships. In: Marschner P (ed.) *Marschner's Mineral nutrition of higher plants*. Third edition. Academic Press, Elsevier, U.S.A. pp. 85-133.
- Falqueto, A. R., D. Cassol, A. M. Magalhaes-Júnior, A. C. Oliveira, and M. A. Bacarin. 2009. Physiological analysis of leaf senescence of two rice cultivars with different yield potential. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 44(7): 695-700.
- Fanasca, S., G. Colla, G. Maiani, E. Venneria, Y. Rouphael, E. Azzini and F. Saccardo. 2006. Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(12): 4319-4325.

- Feller, U., I. Anders, and T. Mae. 2008. Rubiscoolytics: fate of rubisco after its enzymatic function in cell es terminated. *Journal of Experimental Botany*, 59(7): 1615-1624.
- Galicia, R. M., R. Verde, E. Ponce, R.O. González, C. Saucedo and I. Guerrero. 2008. Stability of lycopene in cv. Saladette tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) stored under different conditions. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 7(3): 253-262.
- Hartz, T. K., P. R. Johnstone, D. M. Francis, and E. M. Miyao. 2005. Processing tomato yield and fruit quality improved with potassium fertigation. *HortScience* 40(6): 1862-1867.
- Hawkesford, M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I. S. Moller, and P. White. 2012. Functions of macronutrients. In: Marschner P (ed.) *Marschner's Mineral nutrition of higher plants*. Third edition. Academic Press, Elsevier, U.S.A. pp. 135-189.
- Himelblau, E., and R. M. Amasino. 2010. Nutrients mobilized from leaves of *Arabidopsis thaliana* during leaf senescence. *Journal of Plant Physiology*, 158(10): 1317-1323.
- Huber, S. C. and D. E. Moreland. 1981. Co-transporte of potassium and sugars across the plasmalemma of mesophyll protoplasts. *Plant Physiology* 67:163-169.
- Jensen, K. H., J. A. Savage, and N. M. Holbrook. 2013. Optimal concentration for sugar transport in plants. *Journal of the Royal Society Interface* 20130055.
- Jones, J., B. J. 2008. *Tomato Plant Culture in the field, greenhouse and Homegarden*. 2a Ed. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, Fl. 282 p.
- Kanai, S., K. Okhura, J. J. Adu-Gyamfi, P. K. Mohapatra, N. T. Nguyen, H. Saneoka and K. Fujita. 2007. Depression of sink activity precedes the inhibition of biomass production in tomato plants subjected to potassium deficiency stress. *Journal of Experimental Botany* 58(11): 2917-2928.
- Kin-Weng, K., Hock-Eng K., K. Nagendra Prasad, A. Ismail, Chin-Ping T., and N. Fadilah R. 2010. Revealing the power of the natural red pigment lycopene. *Molecules* 15: 959-987.
- Lee, S. L., and A. Kader. 2000. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. *Postharvest Biology and Technology* 20: 207-220.
- Lin, C. H. and B. H. Chen. 2003. Determination of carotenoids in tomato juice by liquid chromatography. *Journal of Chromatography A* 1012:103-109.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. 2nd Edition. Ed. Academic Press. San Diego CA. P. 299-312.

- Mellidou, I., J. Keulemans, A. K. Kanellis and M. W. Davey. 2012. Regulation of fruit ascorbic acid concentrations during ripening in high and low vitamin C tomato cultivars. *BMC Plant Biology* 12: 239: 1-19.
- Montagu, K. D., and K. M. Goh. 1990. Effects of forms and rates of organic and inorganic nitrogen fertilizers on the yield and some quality indices of tomatões (*Lycopersicon esculentum* Miller). *N Z J Crop Hortic Sci* 18: 31-37.
- Palmer, S. 2009. Understanding the health benefits of tomato products. *SCANNERS*, 2(2): 1-3.
- Parisi, M., I. Giordano, A. Pantangelo, B. D'Onofrio, and G. Villari. 2006. Effects of different levels of nitrogen fertilization on yield and fruit quality in processing tomato. *Acta Horticulturae* 700: 129-132.
- Prudent, M., M. Causse, M. Génard, P. Tripodi, S. Granadillo, and N. Bertin. 2009. Genetic and physiological analysis of tomato fruit weight and composition: influence of carbon availability on QTL detection. *Journal of Experimental Botany*, 60(3): 923-937.
- Robertson, G. H.; Mahoney, N. E.; Goodman, N.; Pavlath, A. E. Regulation of lycopene formation in cell suspension culture of VFNT tomato (*Lycopersicon esculentum*) by CPTA, growth regulators, sucrose, and temperature. *J. Exp. Bot.* 1995, 46, 667673.
- Sainju, U. M., R. Dris, and B. Singh. 2003. Mineral Nutrition of tomato. *Food, Agriculture & Environment* 1(2): 176–183.
- Sauer, N. 2007. Molecular physiology of higher plant sucrose transporters. *FEBS Letters* 581: 2309-2317.
- Stahl, W., and H. Sies. 2005. Bioactivity and protective effects of natural carotenoids. *Biochimica et Biophysica Acta* 1740: 101-107.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In: *Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC*. Lunteren, Wageningen, The Netherlands. pp: 633-650.
- Sulieman, A. M. E, K. M. A. Awn and M. T. Yusif. 2011. Suitability of some tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill.) genotypes for paste production. *Journal of Science and Technology* 12(2): 45-51.
- Taber H, P. Perkins-Veazie, S. Li, W. White, S. Rodermel, and Y. Xu. 2008. Enhancement of tomato fruit lycopene by potassium is cultivar dependent. *HortScience* 43(1): 159-165.
- Tang, G. 2010. Bioconversion of dietary provitamin A carotenoids to vitamin A in humans. *Am J Clin Nutr* 2010;91(suppl) 1468S-1473S.

- Tran, T. L. H and L. C. Raymundo.1999. Biosynthesis of carotenoids in bittermelon at high temperatura. *Phytochemistry* 52:275-280.
- Trudel, M. J. And J. L. Ozbun. 1971. Influence of potassium on carotenoid content of tomato fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 96: 763–765.
- Vicente, A. R., G. A. Manganaris, G. O. Sozzi and C. H. Crisosto. 2009. Nutritional quality of fruits and vegetables. In: W. J. Florkowski, R. L. Shewfelt, B. Brueckner and S. E. Prussia. *Postharvest handling: A system approach*. Elsevier Inc. Academic Press. Pp. 67-69.
- Wertz, K., Siler U, and Goralczyk R. 2004. Lycopene: Modes of action to promote prostate health. *Arch Biochem Biophys* 430:127-134.
- Wien, H. 1997. *The physiology of vegetable crops*. CAB International, Wallingford, UK. 672 p.
- Wien, H. 1997. *The physiology of vegetable crops*. Department of fruit and vegetable science, College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, USA. 672 p.
- Witham, H. F., D. F. Blaydes, and R. M. Devlin. 1971. *Experiments in Plant Physiology*. Van Nostrand Reinhold C. New York, USA. 245 p.
- Wuzhong N. 2002. Yield and quality of fruits of solanaceous crops as affected by potassium fertilization. *Better Crops International* 16(1): 6-8.

CONCLUSIONES GENERALES

Durante el ciclo biológico, el metabolismo de la planta experimenta cambios en la fisiología, el crecimiento, la producción de biomasa y los atributos de calidad físico química del fruto de tomate, los cuales al mismo tiempo son afectados por las dosis de N y K empleados en la solución nutritiva durante las etapas vegetativa y reproductiva del cultivo hidropónico.

En etapa vegetativa del cultivo, el nivel del N en la solución nutritiva afecta la respuesta del cultivo de tomate en el área foliar, la biomasa seca vegetativa, el índice de área foliar, la duración de área foliar, las tasas de crecimiento (de asimilación neta, de crecimiento relativo y de crecimiento del cultivo) y el porcentaje de N de hojas y tallos.

Mientras que en etapa reproductiva, los factores de estudio N y K en la solución nutritiva influyen diferencialmente las respuestas biológicas del cultivo de tomate, mostrando efectos de dos tipos: a) Principales (indicados por el N y K) en el área foliar, la biomasa seca vegetativa, el índice de área foliar, la duración del área foliar, el crecimiento del cultivo, los contenidos de N y K en hojas, tallos y frutos, el color del fruto (Hue y luminosidad), las concentraciones de licopeno, B-caroteno, vitamina C, porcentaje de jugo, sólidos solubles totales, azúcares totales, azúcares reductores, porcentaje de acidez y el rendimiento del fruto; y b) Simples (definidos por la interacción N*K) sobre la concentración de licopeno, β -caroteno y el porcentaje de N en frutos.

En etapa vegetativa, por el aumento de la concentración de N de 10 a 16 mol_c m⁻³, se incrementa el área foliar, la biomasa seca vegetativa, el índice de área foliar, la duración de área foliar y el porcentaje de N de hojas y tallos. Los valores más altos de estos índices pueden obtenerse con 14 y 16 mol_c m⁻³ de N aplicado en la solución nutritiva. El crecimiento del cultivo en este periodo se caracteriza por presentar tasas de asimilación neta, de crecimiento relativo y de crecimiento del cultivo, con ajuste de modelos del tipo cuadrático, las cuales varían por los efectos positivos del N.

Por otra parte, en el periodo reproductivo conforme aumenta el K en la solución nutritiva, se incrementa significativamente el área foliar, la biomasa seca vegetativa, el índice de área foliar y

la duración de área foliar cuando la concentración de este nutrimento cambia de 5 a 13 mol_c m⁻³. En tanto que la tasa de crecimiento del cultivo se ajusta a un modelo lineal negativo y cuadrático, mostrando relaciones directas con el K evaluado durante la segunda etapa del cultivo de tomate hidropónico. En forma similar, la concentración de N y K en hojas, tallos y frutos, crece en relación al nivel de N y K suministrado en la solución de cultivo. Al mismo tiempo, concentraciones crecientes de N de 10 a 16 mol_c m⁻³, aumentan los azúcares reductores, azúcares totales, vitamina C, luminosidad, porcentajes de jugo y acidez del fruto, pero disminuyen los SST, ángulo hue, licopeno y β-caroteno. Mientras que a medida que aumenta el K de 5 a 13 mol_c m⁻³, los sólidos solubles totales, azúcares reductores, síntesis de licopeno, luminosidad, porcentaje de jugo, la acidez del fruto y el rendimiento aumentan pero Hue se reduce. No obstante cuando en el fruto sean requeridas las mayores concentraciones en licopeno y β-caroteno, pueden considerarse las combinaciones (N:K en mol_c m⁻³) de 10:9, 10:13, 12:11 y 14:11; y 14:9 y 14:11 como las más recomendables para lograr su mayor contenido de N.

Si bien, los niveles de K aplicado en etapa reproductiva afectan el rendimiento y la calidad del fruto, de los cuales, solo la calidad del fruto muestra variaciones por el N aplicado en etapa vegetativa. Para lograr la mejor calidad del fruto y rendimiento se recomiendan dosis con N de 12 a 16 mol_c m⁻³ y K con 9 a 13 mol_c m⁻³.