



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DE CHILE POBLANO
(*Capsicum annuum* L.) Y SU RELACIÓN CON EL
RENDIMIENTO Y LA CALIDAD DEL FRUTO

JOSÉ DE LA CRUZ TUN DZUL

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

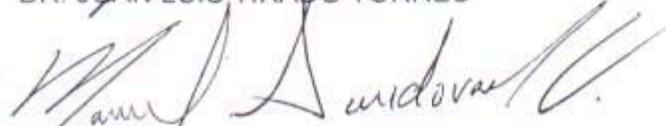
2008

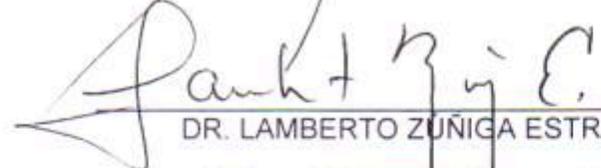
La presente tesis, titulada: **Requerimientos nutricionales de chile poblano (*Capsicum annuum* L.) y su relación con el rendimiento y la calidad del fruto**, realizada por el alumno: **José de la Cruz Tun Dzul**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

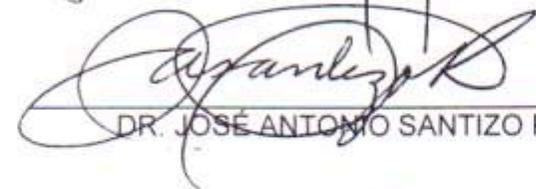
DOCTOR EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

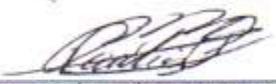
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
DR. JUAN LUIS TIRADO TORRES

ASESOR: 
DR. MANUEL SANDOVAL VILLA

ASESOR: 
DR. LAMBERTO ZUÑIGA ESTRADA

ASESOR: 
DR. JOSÉ ANTONIO SANTIZO RINCÓN

ASESOR: 
DR. RAÚL DÍAZ PLAZA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Abril de 2008

REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DE CHILE POBLANO (*Capsicum annuum* L.) Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD DEL FRUTO

José de la Cruz Tun Dzul, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2008

El chile poblano en México se cultiva en una superficie de 35,000 ha anuales, pero su producción es poco rentable debido a su bajo rendimiento (13 Mg ha^{-1}), siendo una de las principales causas la fertilización inadecuada por desconocimiento de sus requerimientos nutricionales. La presente investigación estuvo conformada por dos experimentos y tuvo por objetivo evaluar el efecto del nitrógeno, fósforo y potasio sobre el rendimiento y la calidad del fruto de chile poblano (cv. Caballero) en diferentes etapas fenológicas. Los experimentos se realizaron en invernadero y utilizando hidroponía. En el primer experimento se evaluó el efecto de NO_3^- (6, 9 y 12 me L^{-1}), H_2PO_4^- (0.5 y 1.0 me L^{-1}) y K^+ (5 y 7 me L^{-1}), sobre el crecimiento de las plántulas, en un arreglo factorial $3 \times 2 \times 2$ y un diseño completamente al azar con tres repeticiones. En el segundo, se evaluó el efecto de los mismos factores con cuatro niveles, NO_3^- (6, 8, 10 y 12 me L^{-1}), H_2PO_4^- (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 me L^{-1}) y K^+ (6, 7, 8 y 9 me L^{-1}), sobre el crecimiento, rendimiento y calidad del fruto, en un diseño San Cristóbal cuyas 12 combinaciones de tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Los resultados del primer experimento indicaron que los diferentes niveles de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ no afectaron el crecimiento de las plántulas, aunque el aumento del K^+ incrementó la acumulación foliar de nitrógeno y potasio. Las plántulas de mejor calidad se obtuvieron con la solución nutritiva que contenía 6 me L^{-1} de NO_3^- , 0.5 me L^{-1} de H_2PO_4^- y 5 me L^{-1} de K^+ . En el segundo experimento, el mayor crecimiento, producción de materia seca, concentración y acumulación foliar de nutrientes, y producción de fruto se obtuvieron con los niveles de 10 y 12 me L^{-1} de NO_3^- , mientras que los niveles de H_2PO_4^- y K^+ tuvieron poco o nulo efecto sobre las mismas variables. El mayor rendimiento de fruto (63.6 Mg ha^{-1}) se obtuvo con 12 me L^{-1} de NO_3^- , 1.0 me L^{-1} de H_2PO_4^- y 7 me L^{-1} de K^+ en la solución nutritiva.

Palabras clave: Hidroponía, invernadero, crecimiento, materia seca.

NUTRITIONAL REQUIREMENTS OF POBLANO PEPPER (*Capsicum annuum* L.)
AND ITS RELATIONSHIP WITH YIELD AND FRUIT QUALITY

José de la Cruz Tun Dzul, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2008

In Mexico, the poblano pepper is cultivated in 35,000 ha yearly, but its production had low profitability because yield is low (13 Mg ha^{-1}), due mainly to inadequate fertilization rates since nutritional requirements are unknown. Two experiments were carried out during this research in order to evaluate the nitrogen, phosphorus and potassium effects on poblano pepper (cv. Caballero) yield and fruit quality at different growth stages. Experiments were established in a greenhouse with nutrient solutions. In the first one, we evaluated NO_3^- (6, 9, and 12 me L^{-1}), H_2PO_4^- (0.5, and 1.0 me L^{-1}) y K^+ (5, and 7 me L^{-1}) effects on seedlings growth, using a $3 \times 2 \times 2$ factorial in a completely randomized design with three replications. In the second experiment, we evaluated four levels of NO_3^- (6, 8, 10, and 12 me L^{-1}), H_2PO_4^- (0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 me L^{-1}) and K^+ (6, 7, 8, and 9 me L^{-1}) effects on growth, yield and fruit quality, using a San Cristobal design which 12 treatments were distributed in a completely randomized design with three replications. Results from the first experiment indicated that different levels of NO_3^- , H_2PO_4^- and K^+ had no effects on growth of seedlings; however, increasing K^+ concentration in the nutrient solution increased nitrogen and potassium in leaves. Higher quality of seedlings was obtained with nutrient solution containing 6 me L^{-1} of NO_3^- , 0.5 me L^{-1} of H_2PO_4^- , and 5 me L^{-1} of K^+ . In the second experiment, higher plant growth, dry matter, foliar nutrient concentration and accumulation, and yield were obtained with 10 and 12 me L^{-1} of NO_3^- . H_2PO_4^- and K^+ had a slightly effect on same variables. The higher fruit yield (63.6 Mg ha^{-1}) was obtained with 12 me L^{-1} of NO_3^- , 1.0 me L^{-1} of H_2PO_4^- and 7 me L^{-1} of K^+ in nutrient solution.

Key words: Hydroponics, greenhouse, plant growth, dry matter.

Dedico esta tesis:

A mi amada esposa:

Nilvia Lízbeth Pech Ricalde

Por que siempre me ha brindado su amor, comprensión, estímulo y apoyo incondicionales, sin los cuales no hubiera sido posible alcanzar esta meta.

Por ser la compañera inseparable con la que he compartido los años más felices de mi existencia y un pilar inquebrantable de nuestra familia.

A mis amados hijos:

José de la Cruz y Lízbeth Selene

Bendición de dios que dio sentido a nuestras vidas y llenó de alegría nuestro hogar.
Porque son el motivo principal de nuestra existencia y superación.

A ellos tres, que son mi gran familia, y que me enseñaron que nunca es tarde para alcanzar nuestros sueños.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de Doctorado.

Al Colegio de Postgraduados (CP), especialmente al personal académico del Postgrado de Edafología, por su valiosa aportación para mejorar mi formación académica y desempeño profesional.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en especial al personal directivo del CIR Sureste, por las facilidades y apoyo brindados para la realización de mis estudios.

Al Dr. Juan Luis Tirado Torres, por su apoyo y dedicación brindada durante la preparación y conducción del trabajo de investigación y por sus valiosas sugerencias en la elaboración de la tesis. Por sus consejos y valiosa amistad.

AL Dr. Manuel Sandoval Villa, por su orientación y apoyo durante la conducción del trabajo de investigación y sus valiosas aportaciones y correcciones al documento de tesis. Por su desinteresada amistad.

Al Dr. Lamberto Zúñiga Estrada, por sus aportaciones al proyecto de investigación y sus valiosas sugerencias y aportaciones al documento de tesis. Por su amistad.

AL Dr. José Antonio Santizo Rincón, por su orientación durante la elaboración del proyecto de investigación y sus valiosas correcciones al documento de tesis. Por su amistad y apoyo.

AL Dr. Raúl Díaz Plaza, por sus valiosas aportaciones y correcciones al documento de tesis, y por su invaluable apoyo para la realización de mis estudios de doctorado. Por su sincera y desinteresada amistad a lo largo de muchos años. Muchas gracias.

A la Dra. María de las Nieves Rodríguez Mendoza, por las facilidades brindadas para realizar las evaluaciones y el trabajo de invernadero, por su apoyo y amistad.

A la Dra. Libia Iris Trejo Téllez, por las facilidades brindadas para la realización de los análisis foliares. Por su amistad.

Al MC. Cecilio Bautista Bañuelos, del departamento de Fitotecnia de la UACH, por facilitarme las instalaciones y el equipo para la cuantificación de capsaicina.

Al personal de la sección de Nutrición Vegetal, Laura, César, Don Lupe, Lupita, Roberto, Juan Manuel, Wenceslao, por su amistad y apoyo.

A mis amigos y compañeros Eduardo Villanueva, Eduardo Salcedo, Eduardo Valdez, José Tun, Fidencio Sustaita, Danya, Ibar, Fabiola, Nelson, Maribel, Soledad, Victorino, Álvaro, Ismael, José Chávez, Berenice, J. L. Ruiz, J. L. González, Esteban, Simón, Rufo, Saúl, Atenógenes, Alejandro, Israel, y Juan Medina, por los momentos compartidos durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

A todas las demás personas que directa o indirectamente contribuyeron a la realización de la presente investigación y que escapan a mi memoria. Muchas gracias.

CONTENIDO

| | Página |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Justificación..... | 2 |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1. Importancia del cultivo de chile..... | 4 |
| 2.2. Riego y fertilización del cultivo de chile..... | 7 |
| 2.3. La nutrición del cultivo de chile..... | 10 |
| 2.4. Papel del nitrógeno, fósforo y potasio en el cultivo de chile..... | 12 |
| 2.5. Nutrición de las plántulas de chile..... | 13 |
| 2.6. Efecto de la nutrición en el cultivo de chile..... | 15 |
| 2.7. La pungencia del fruto de chile..... | 17 |
| 2.8. Uso de soluciones nutritivas..... | 18 |
| 2.9. Conclusiones de la revisión de literatura..... | 19 |
| 3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS..... | 21 |
| 3.1. Objetivo General..... | 21 |
| 3.2. Objetivos específicos..... | 21 |
| 3.3. Hipótesis general..... | 21 |
| 3.4. Hipótesis específicas..... | 21 |
| 4. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 22 |
| 4.1. Experimento Uno: Producción de plántulas..... | 22 |
| 4.2. Experimento Dos: Fenología, crecimiento y producción de fruto..... | 25 |
| 4.2.1. Variables evaluadas..... | 27 |
| 4.2.1.1. Altura de la planta..... | 28 |
| 4.2.1.2. Diámetro del tallo principal..... | 28 |
| 4.2.1.3. Número de hojas..... | 28 |
| 4.2.1.4. Número de ramas..... | 28 |
| 4.2.1.5. Número de flores..... | 28 |
| 4.2.1.6. Número de frutos..... | 29 |
| 4.2.1.7. Área foliar..... | 29 |
| 4.2.1.8. Lecturas SPAD..... | 29 |
| 4.2.1.9. Producción de materia seca de raíz, tallo, hoja y fruto..... | 29 |
| 4.2.1.10. Contenido de nutrimentos de la hoja..... | 30 |
| 4.2.1.11. Rendimiento de fruto..... | 30 |
| 4.2.1.12. Calidad del fruto..... | 31 |
| 4.2.1.12.1. Determinación por clase de fruto..... | 31 |
| 4.2.1.12.2. Determinación por el contenido de capsaicina..... | 30 |
| 4.2.2. Análisis estadístico..... | 32 |

| | Página |
|---|--------|
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 33 |
| 5.1. Experimento Uno: Producción de plántulas de chile poblano..... | 34 |
| 5.1.1. Altura de la planta, diámetro del tallo y número de hojas..... | 34 |
| 5.1.2. Área foliar y lecturas SPAD..... | 34 |
| 5.1.3. Producción de MS..... | 35 |
| 5.1.4. Concentración y eficiencia de absorción nutrimental..... | 37 |
| 5.2. Experimento Dos: Fenología, crecimiento y producción de fruto..... | 39 |
| 5.2.1. Determinación de las etapas fenológicas del cultivo..... | 39 |
| 5.2.1.1. Etapas fenológicas y acumulación de grados día de desarrollo | 40 |
| 5.2.2. Análisis del crecimiento en función de las variables morfométricas | 42 |
| 5.2.2.1. Crecimiento promedio y tasa de crecimiento absoluto.... | 42 |
| 5.2.2.2. Análisis estadístico de las variables morfométricas..... | 45 |
| 5.2.2.2.1. Altura de la planta..... | 45 |
| 5.2.2.2.2. Diámetro del tallo..... | 46 |
| 5.2.2.2.3. Número de hojas..... | 48 |
| 5.2.2.2.4. Número de ramas..... | 50 |
| 5.2.2.2.5. Número de flores..... | 51 |
| 5.2.2.2.6. Número de frutos..... | 52 |
| 5.2.2.2.7. Área foliar..... | 54 |
| 5.2.2.2.8. Lecturas SPAD.. .. | 56 |
| 5.2.2.3. Resumen del análisis de las variables..... | 59 |
| 5.2.3. Análisis del crecimiento en función de la producción de MS.... | 60 |
| 5.2.3.1. Producción media y absoluta de materia seca..... | 60 |
| 5.2.3.2. Análisis estadístico de la producción materia seca..... | 64 |
| 5.2.3.1.1. Producción de materia seca de la hoja..... | 64 |
| 5.2.3.1.2. Producción de materia seca del tallo..... | 66 |
| 5.2.3.1.3. Producción de materia seca de la raíz..... | 68 |
| 5.2.3.1.4. Producción de materia seca del fruto..... | 70 |
| 5.2.3.1.5. Producción de materia seca total de la planta..... | 72 |
| 5.2.3.1.6. Producción de materia seca de la parte aérea..... | 75 |
| 5.2.3.1.7. Relación de la producción de MS aérea/raíz..... | 76 |
| 5.2.3.1.8. Relación de la producción de MS tallo/raíz..... | 78 |
| 5.2.3.3. Resumen del análisis de la producción de MS..... | 80 |
| 5.2.4. Concentración nutrimental en las hojas..... | 81 |
| 5.2.4.1. Concentración promedio de nutrimentos en las hojas..... | 82 |
| 5.2.4.2. Análisis estadístico de la concentración de nutrimentos en las hojas..... | 84 |
| 5.2.4.2.1. Concentración foliar de nitrógeno..... | 85 |
| 5.2.4.2.2. Concentración foliar de fósforo..... | 86 |
| 5.2.4.2.3. Concentración foliar de potasio..... | 88 |
| 5.2.4.3. Análisis de la concentración nutrimental en las hojas..... | 89 |

| | Página |
|---|------------|
| 5.2.5. Acumulación de nutrimentos en las hojas de chile | 90 |
| 5.2.5.1. Acumulación media de nutrimentos en las hojas..... | 90 |
| 5.2.5.2. Análisis estadístico de la acumulación de nutrimentos... | 91 |
| 5.2.5.2.1. Cantidad de nitrógeno acumulada en la hoja..... | 91 |
| 5.2.5.2.2. Cantidad de fósforo acumulada en la hoja..... | 93 |
| 5.2.5.2.3. Cantidad de potasio acumulada en la hoja..... | 95 |
| 5.2.5.3. Análisis de la acumulación de nutrimentos..... | 98 |
| 5.2.7. Producción de fruto de chile poblano..... | 99 |
| 5.2.7.1. Producción media de fruto de chile poblano..... | 99 |
| 5.2.7.2. Análisis estadístico de la producción de fruto..... | 101 |
| 5.2.7.2.1. Producción de fruto de primera clase..... | 101 |
| 5.2.7.2.2. Producción de fruto de segunda clase..... | 102 |
| 5.2.7.2.3. Producción de fruto de tercera clase..... | 104 |
| 5.2.7.2.4. Producción de fruto de rezaga..... | 104 |
| 5.2.7.2.5. Producción de fruto comercial..... | 104 |
| 5.2.7.2.6. Producción de fruto total..... | 106 |
| 5.2.7.2.7. Producción acumulada de fruto..... | 109 |
| 5.2.7.3. Análisis de la producción de fruto..... | 115 |
| 5.2.8. Calidad del fruto de chile poblano..... | 117 |
| 5.2.8.1. Tamaño y peso del fruto..... | 117 |
| 5.2.8.2. Contenido de capsaicina del fruto..... | 127 |
| 5.2.8.3. Análisis de la calidad del fruto | 121 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 123 |
| 6.1. Producción de plántulas de chile poblano..... | 123 |
| 6.2. Crecimiento y producción de chile poblano..... | 123 |
| 7. LITERATURA CITADA..... | 125 |
| 8. APÉNDICE..... | 135 |

INDICE DE CUADROS

| | Página |
|--|--------|
| Cuadro 1. Principales países productores de chile | 5 |
| Cuadro 2. Combinaciones de tratamientos del arreglo factorial 3x2x2 aplicadas a las plántulas de chile poblano en almácigo..... | 23 |
| Cuadro 3. Composición de las soluciones nutritivas de las 12 combinaciones de tratamientos, aplicadas a plántulas de chile poblano en almácigo..... | 23 |
| Cuadro 4. Combinaciones de tratamientos del Diseño San Cristóbal aplicadas a plantas de chile poblano en hidroponía..... | 25 |
| Cuadro 5. Composición de las soluciones nutritivas de las combinaciones de tratamientos del diseño San Cristóbal aplicadas a plantas de chile poblano..... | 26 |
| Cuadro 6. Descripción de los muestreos realizados para la evaluación de variables en plantas de chile poblano..... | 28 |
| Cuadro 7. Parámetros empleados para la clasificación de los frutos de chile poblano..... | 31 |
| Cuadro 8. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre las lecturas SPAD y la producción de materia seca de plántulas de chile poblano..... | 36 |
| Cuadro 9. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la concentración de nutrimentos en hojas de plántulas de chile poblano..... | 37 |
| Cuadro 10. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la eficiencia de absorción de la raíz de plántulas de chile poblano..... | 38 |
| Cuadro 11. Duración de las etapas fenológicas y acumulación de grados día de desarrollo de plantas de chile poblano..... | 41 |
| Cuadro 12. Descripción de las etapas fenológicas de las plantas de chile poblano, por días y grados día de desarrollo..... | 42 |
| Cuadro 13. Valor promedio de las variables de crecimiento evaluadas en plantas de chile poblano de diferente edad..... | 43 |
| Cuadro 14. Tasa de crecimiento absoluto de las variables evaluadas en plantas de chile poblano de diferente edad..... | 44 |

| | Página |
|--|--------|
| Cuadro 15. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la altura de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 46 |
| Cuadro 16. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el diámetro del tallo de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 48 |
| Cuadro 17. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el número de hojas de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 49 |
| Cuadro 18. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el número de ramas de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 50 |
| Cuadro 19. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el número de frutos de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 52 |
| Cuadro 20. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el área foliar de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 55 |
| Cuadro 21. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre las lecturas SPAD de hojas de chile poblano de diferente edad..... | 57 |
| Cuadro 22. Valor promedio de la producción de materia seca total y de diferentes órganos de plantas de chile poblano..... | 62 |
| Cuadro 23. Tasa de producción absoluta de materia seca de toda la planta y de diferentes órganos de plantas de chile poblano..... | 62 |
| Cuadro 24. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca de las hojas de chile poblano de diferente edad..... | 65 |
| Cuadro 25. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca del tallo de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 67 |
| Cuadro 26. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca de la raíz de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 69 |

| | Página |
|--|--------|
| Cuadro 27. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca del fruto de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 71 |
| Cuadro 28. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca total de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 73 |
| Cuadro 29. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca de la parte aérea de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 75 |
| Cuadro 30. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la relación de producción de materia seca de la parte aérea y de la raíz de plantas de chile poblano..... | 77 |
| Cuadro 31. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la relación de producción de materia seca del tallo y de la raíz de plantas de chile poblano de diferente edad..... | 79 |
| Cuadro 32. Niveles de suficiencia de algunos nutrimentos para plantas de chile en etapas de crecimiento y fructificación..... | 81 |
| Cuadro 33. Valor promedio de la concentración de tres nutrimentos en hojas de las plantas de chile poblano de diferente edad..... | 83 |
| Cuadro 34. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la concentración de fósforo en hojas de chile poblano de diferente edad..... | 87 |
| Cuadro 35. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la concentración de potasio en hojas de chile poblano de diferente edad..... | 89 |
| Cuadro 36. Valor promedio de la cantidad acumulada de nutrimentos en hojas de las plantas de chile poblano en función de la edad de la planta..... | 91 |
| Cuadro 37. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la acumulación de nitrógeno en hojas de chile poblano de diferente edad..... | 92 |
| Cuadro 38. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la acumulación de fósforo en hojas de chile poblano de diferente edad..... | 94 |

| | Página |
|---|--------|
| Cuadro 39. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la acumulación de potasio en hojas de chile poblano de diferente edad..... | 96 |
| Cuadro 40. Producción media de fruto de chile obtenida en cuatro cortes..... | 100 |
| Cuadro 41. Porcentaje medio del fruto de chile obtenida en cuatro cortes..... | 100 |
| Cuadro 42. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de frutos de primera clase de plantas de chile poblano..... | 102 |
| Cuadro 43. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de frutos de segunda clase de plantas de chile poblano..... | 103 |
| Cuadro 44. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de fruto comercial de chile poblano..... | 105 |
| Cuadro 45. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción total de fruto de chile poblano..... | 108 |
| Cuadro 46. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el rendimiento total acumulado de fruto de chile poblano..... | 111 |
| Cuadro 47. Rendimiento acumulado de fruto de plantas de chile poblano, tratadas con diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ | 113 |
| Cuadro 48. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el porcentaje de las clases de fruto de chile poblano..... | 117 |
| Cuadro 49. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la concentración de capsaicina en frutos de chile poblano..... | 121 |

1. INTRODUCCIÓN

El panorama agrícola de nuestro país, en el marco de los Tratados de Libre Comercio con diferentes países, exige que los agricultores mexicanos produzcan alimentos en mayor cantidad y calidad para competir en el mercado internacional. Lo anterior sólo se logrará empleando de tecnologías que permitan incrementar la producción por unidad de superficie, mejorar la calidad comercial de los productos y reducir sus costos de producción. Las hortalizas tienen gran importancia alimenticia y económica a nivel mundial; su producción en México juega un papel importante en la actividad agrícola, ya que es una fuente de divisas y genera una gran cantidad de empleos.

La tecnología de riego y el conocimiento de los requerimientos hídricos y nutricionales de las especies cultivadas, incrementan la eficiencia de uso de los fertilizantes y del agua, dando por resultado el aumento de la productividad por unidad de superficie y la calidad comercial de los productos. Una de las técnicas de producción que tienen gran impacto técnico y económico es la aplicación de fertilizantes a través del agua de riego (fertirrigación); esta tecnología utiliza sistemas de riego localizado como el de goteo. La aplicación de esta tecnología en México, ha permitido el incremento de los rendimientos y la calidad de los productos, así como la rentabilidad de la horticultura.

El gobierno federal dio un gran impulso a la agricultura de riego mediante el Programa de Fertirrigación. Sin embargo, su aplicación ha estado limitada por falta de información sobre los requerimientos hídricos y nutricionales de los cultivos. También se requieren conocimientos de riego, análisis químico, fisiología y nutrición vegetal; conceptos que son indispensables para la aplicación de la tecnología de fertirrigación.

Los estudios de riego y nutrición en nuestro país, han generado recomendaciones para el manejo del riego por goteo; sin embargo, hay pocos estudios sobre el requerimiento nutricional de algunas hortalizas. Dicha información ha permitido incrementar los rendimientos, pero aún está lejos del rendimiento potencial de los cultivos, los cuales están influenciados por la fertilización, las condiciones físicas y químicas del suelo, volumen del suelo humedecido, frecuencia de aplicación del

riego, incidencia e intensidad de la precipitación, eficiencia de los fertilizantes, etc. Además, no es suficiente con tener el conocimiento acerca de los requerimientos nutricionales del cultivo, también es indispensable contar con una metodología para su aplicación y seguimiento bajo las circunstancias del productor, toda vez que las dosis y frecuencias de aplicación dependerán de las características físicas y químicas del suelo, el volumen y frecuencia de aplicación del riego, la incidencia e intensidad de la precipitación, la eficiencia de los fertilizantes a utilizar, etc.

El chile es una hortaliza de gran importancia económica para el país, ya que se cultivan más de 140,000 ha de diversos tipos de chile anualmente; sin embargo, los rendimientos son bajos, con relación a su potencial, debido al bajo nivel de tecnología empleada por los productores. Asimismo, los altos costos de producción reducen su competitividad en el mercado internacional lo cual limita su rentabilidad.

El chile poblano o ancho, junto con el mulato y el pasilla forman la "santísima trinidad" de los chiles utilizados para preparar las salsas de mole tradicionales. Se cultiva en la zona de Puebla, el valle de México y California; a pesar de ello son pocos los trabajos de investigación realizados con el objetivo de hacer eficiente su producción. Por tal razón, en el presente estudio se pretende incrementar el rendimiento, evaluar el efecto individual de los nutrimentos mencionados sobre las características agronómicas de la planta y sobre la calidad de fruto, además de determinar sus requerimientos nutrimentales, mediante la aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio en un sistema hidropónico bajo condiciones de invernadero.

1.1. Justificación

El chile poblano es importante en México por la superficie destinada anualmente a su cultivo (35,000 ha); sin embargo, los bajos rendimientos obtenidos (13 Mg ha^{-1}) lo hacen poco rentable, a pesar de la gran demanda que tiene para la elaboración de platillos nacionales. Los bajos rendimientos se atribuyen, en gran medida, a la falta de información, que debe ser generada mediante estudios de laboratorio, invernadero y campo, sobre los requerimientos nutricionales e hídricos de este cultivo (Pozo, 2000).

Los estudios sobre la fertirrigación han transformado a la agricultura en una actividad de alta precisión que requiere el conocimiento de las necesidades hídricas y nutricionales de los cultivos para el éxito de la producción. Esta tecnología, utilizada en el cultivo del chile, ha permitido obtener rendimientos superiores a los 40 Mg ha⁻¹ en Israel, Japón y España. En México, no obstante el aumento de la superficie que utiliza esta tecnología, el incremento en el rendimiento no ha sido significativo, debido al uso deficiente de la misma y la falta de información adecuada para suministrar agua y nutrimentos acorde a las necesidades del cultivo; situación que también disminuye la fertilidad natural del suelo y la sostenibilidad del sistema de producción e incrementa el riesgo de contaminación del suelo y el agua (Burgueño, 1999; FAOSTAT, 2006).

El cultivo intensivo de chile requiere de una rápida reposición de nutrimentos a la solución del suelo en cantidades y formas iónicas adecuadas para mejorar su acceso nutrimental y favorecer su absorción durante todo el ciclo de cultivo. Sin embargo, no se cuenta con el conocimiento sobre las necesidades de esta variedad de chile, por lo que se requiere de estudios para generar esta información (Bar-Tal et al., 2001b).

La información que se genera en la presente investigación, es de gran utilidad para definir el manejo adecuado de la nutrición, satisfacer las necesidades nutricionales del cultivo en todas las etapas fenológicas, e incrementar sustancialmente el rendimiento y la calidad del fruto de chile poblano, mejorándose directamente la productividad por unidad de superficie en las regiones en las que se cultiva.

El incremento del rendimiento de chile poblano, hasta en un 100% del promedio nacional, en las zonas de cultivo, además del aumento de la calidad del producto cosechado y la disminución de los riesgos de la producción, son aspectos que se consideran importantes para la competitividad en el mercado nacional y extranjero.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las hortalizas y las frutas ocupan el segundo lugar de los productos agropecuarios en el mundo, siendo las más importantes la papa y el tomate, las cuales contribuyen con el 50% de dicha producción mundial. El tomate es el principal producto hortícola de exportación en México y representa más del 37% del valor total de las exportaciones de legumbres y hortalizas del país, así como el 16% del valor de las exportaciones agropecuarias, siendo superado solamente por el ganado vacuno (Domínguez *et al.*, 2001). Otro de las hortalizas de gran importancia en México es el cultivo de chile.

Los productos mexicanos ocupan los primeros lugares en las importaciones de los Estados Unidos. En particular, a partir de 1993, el comercio de frutas y hortalizas mexicanas hacia los Estados Unidos se ha incrementado en 67% y alcanza un valor de 2,600 millones de dólares (López, 2001), razón por la cual la producción de hortalizas en México juega un papel de suma importancia dentro de la actividad agrícola nacional, ya que es una fuente de divisas para el país y genera una gran cantidad de empleos.

2.1. Importancia del cultivo de chile

El cultivo de chile ocupa una superficie de 1'696,891 ha a nivel mundial, en las cuales se obtiene una producción de 25'015,498 Mg de frutos de diversos tipos, y se estima que el incremento del consumo a nivel mundial ha sido de aproximadamente un 21% en los últimos años. Los principales países productores son China, Indonesia, México, Nigeria, y Turquía (Cuadro 1) que en conjunto cultivan cerca de 1'244,310 ha, que representa el 73% de la superficie total sembrada (FAOSTAT, 2006).

La misma fuente señala que el cultivo de las especies de chile en México es de gran relevancia económica, puesto que su cosecha total en el país corresponde al 80% de lo que se produce en América Latina y al 7% de la producción mundial, razón por la cual ocupa el tercer lugar mundial por la superficie cultivada y el segundo lugar por su volumen de producción y por el volumen exportado (432,960 Mg).

Cuadro 1. Principales países productores de chile (FAOSTAT, 2006).

| País | Superficie (ha) | Producción (Mg) | Rendimiento (Mg ha ⁻¹) |
|----------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|
| China | 612,800 | 12'531,000 | 20.45 |
| Indonesia | 173,817 | 871,080 | 5.01 |
| México | 140,693 | 1'853,610 | 13.17 |
| Nigeria | 91,000 | 720,000 | 7.90 |
| Turquía | 88,000 | 1'745,000 | 19.83 |
| Estados Unidos | 34,400 | 977,760 | 28.42 |
| España | 22,500 | 953,200 | 42.36 |
| Japón | 4,000 | 167,560 | 41.89 |
| Israel | 2,000 | 102,600 | 51.30 |
| Holanda | 1,200 | 315,000 | 262.50 |

Este cultivo es tradicional en nuestro país y se compara con lo que representan el maíz y frijol para nuestra alimentación. Se produce en todo el país en los dos ciclos agrícolas y aunque es uno de los principales productos que se exportan, el 80% de la producción se consume internamente como condimento (ASERCA, 1998).

En México anualmente se cultivan 140,693 ha y se producen cerca de dos millones de toneladas de frutos de diversos tipos, entre los que destacan el mirasol, mulato, jalapeño, poblano, serrano, habanero y de árbol, los cuales se consumen de diversas formas. El rendimiento medio es de 13.2 Mg ha⁻¹ y se estima que la producción de chile verde, presenta una tasa de crecimiento anual del 5.7% (FAOSTAT, 2006; Quiñones y Luján, 2002; Rivas *et al.*, 2002).

Esta especie se ha posicionado como una de las más sobresalientes por la superficie sembrada y por el valor de la producción (Vázquez *et al.*, 2003). Se cultiva en los 32 estados del país, y se localiza desde el nivel del mar hasta los 2,500 m de altitud. Las zonas de producción se especializan en ciertos tipos: en el Golfo jalapeño y serrano; en el Bajío chiles secos del tipo poblano (ancho, pasilla y mulato); en la mesa central poblano, serrano y carricillo; en el noroeste morrón, anaheim, caribe y fresno; y en el sur jalapeño, acompañado de los locales costeño y habanero. A pesar de la dispersión de las superficies cultivadas, cinco estados concentran más del 50% del total y contribuyen con el 60% de la producción, y su orden de importancia es: Sinaloa, Chihuahua, Guanajuato, Zacatecas y Sonora (ASERCA, 1998).

La diversidad de regiones, variedades, sistemas de producción, etc., hace difícil contar con estadísticas precisas sobre las superficies cultivadas de cada tipo de chile. Pozo (2000) reportó que los principales tipos de chile y la superficie anual cultivada, en hectáreas, son: jalapeño (48,000), puya o guajillo (35,000), poblano o ancho (35,000), serrano (18,000), morrón o bell (10,000), chilaca o pasilla (7,000), habanero (3,000), otros de México (2,000) y otros introducidos (2,000). Existen otros tipos de chile como el manzano y el piquín, cuya información no es precisa.

Este cultivo también reviste importancia social, ya que requiere de 300 a 400 jornales ha⁻¹ para su producción, pero su baja productividad y alto costo de producción limitan su rentabilidad y competitividad. El marco económico actual, debido a los acuerdos de libre comercio con otros países, exige la producción de alimentos en mayor cantidad y calidad para competir en el exigente y concurrido mercado internacional. Lo anterior sólo podrá lograrse mediante el empleo de tecnologías agrícolas que permitan incrementar la producción por unidad de superficie, mejorar la calidad comercial de los productos y reducir sus costos de producción (Tun, 2001; Zúñiga, 2003).

Es necesario optimizar los recursos e insumos involucrados en la producción de chile e implementar sistemas de producción modernos que incluyan variedades mejoradas, sistemas de riego presurizados, aplicación de fertilizantes en el agua de riego, etc. La fertirrigación no se ha desarrollado por completo para este cultivo, ya que aún no se han determinado los requerimientos hídricos y nutrimentales para los diversos tipos de chile cultivados (Mata, 2001; Tun, 2001).

El chile poblano se cultiva en Puebla y el valle del centro de México; en una superficie de 35,000 ha anuales. A pesar de ello se ha realizado poca investigación enfocada a hacer más eficiente su producción. Este chile se consume en fresco y en seco; de hecho, es el chile seco de mayor uso en México. El fruto es de color verde intenso y a la maduración es de color rojo ladrillo a vino oscuro, con tinte rojo-anaranjado cuando se mira a contraluz; mide de 10 a 15 cm de largo y 3 cm de ancho; su pulpa es de media a gruesa, es ancho del lado del tallo y angosto de la punta (Pozo, 2000; Sakata, 2004).

2.2. Riego y fertilización del cultivo de chile

En México se cultivan 20 millones de ha de diversas especies, de las cuales un poco más de 6 millones son de riego, lo que coloca al país entre los primeros del mundo en superficie irrigada. El sector agrícola consume el 83% del volumen de agua utilizada en el país (61.2 km³), pero se desperdicia más del 50% por la operación y los sistemas de riego ineficientes y cultivos inapropiados. La eficiencia total es de 45%. Los sistemas de producción bajo riego generan el 55% de la producción agrícola nacional y el 70% de los productos agrícolas de exportación. La productividad es baja, un alto porcentaje de los distritos de riego no es rentable y el precio de los productos no es competitivo (Mata, 2001; SAGARPA, 2003). Por lo anterior, se deduce que existe un alto potencial para incrementar la productividad de los cultivos, lo cual se puede lograr mediante el empleo del riego presurizado y la fertirrigación.

El chile es un cultivo susceptible al estrés hídrico debido a su gran área foliar transpirante y su elevada apertura estomatal. Los estomas son los primeros afectados por el estrés, y el cierre estomatal puede afectar la fotosíntesis. El estrés hídrico reduce significativamente la materia seca de hoja y tallo y afecta negativamente la producción del fruto e incrementa el número de frutos de mala calidad. La diferencia en el crecimiento de la planta también tiene efecto negativo sobre la duración del área foliar a lo largo del ciclo de cultivo y, como consecuencia, reduce la radiación absorbida por el dosel en alrededor del 20% (Delfine *et al.*, 1999).

El riego localizado reduce el volumen de suelo mojado y el área de concentración de nutrimentos (hasta en un 40%), pero no afecta el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, es necesario conocer el requerimiento nutrimental de los cultivos, ya que de lo contrario el efecto puede ser negativo. El tipo de suelo y el cultivo determinan el tipo de riego y la fertilización adecuada (Domínguez, 1993). El abastecimiento de agua es un factor importante en el sistema suelo-planta que permite el desarrollo de los cultivos (Bar-Yosef, 1999), por lo que se requiere conocer la demanda hídrica, las características hidráulicas del suelo y la demanda evaporativa del ambiente. Esta información es más importante cuando se cultiva con riego por goteo (Clark, 1992).

En invernadero, el volumen y el intervalo de riego dependen de la cantidad del sustrato y de su capacidad de almacenamiento de agua; las plantas que recibieron la mayor cantidad de agua y nutrientes produjeron mayores rendimientos, con una variación entre 14 y 20 kg m⁻² de chile bell al modificar el criterio para regar (Paschold y Zengerle, 1990). La demanda de agua de chile bell fluctuó de 0.5 a 4.0 mm diarios, aplicándose 348 mm de agua en todo el ciclo. Cuando el volumen de agua aplicado fue igual al 85% de la evaporación no se afectó el crecimiento de la planta y el rendimiento de fruto fue de 4.4 kg planta⁻¹, a menor cantidad de agua se tuvieron reducciones del rendimiento y calidad del fruto (Chartzoulakis y Drosos, 1997).

La nutrición de los cultivos debe realizarse oportunamente, de tal forma que se les proporcione los nutrientes en las cantidades adecuadas (dosis) y en el momento oportuno (frecuencia), en función de su necesidad fisiológica (fenología). Sólo así se obtendrá el rendimiento potencial, ya que éste depende del manejo controlado y las condiciones ambientales. También es indispensable conocer las fuentes de nutrientes (fertilizantes) más adecuadas para las condiciones específicas de cada tipo de suelo en el que se establecerá el cultivo, para obtener la mayor eficiencia de los mismos. El conocimiento de los aspectos mencionados, sólo se podrá obtener mediante la realización de ensayos de nutrición vegetal controlados (Tun, 2003).

La buena fertilidad del suelo no garantiza la producción, pues los nutrientes pueden estar en forma no asimilable debido a diversas causas, provocando deficiencias en los cultivos. El abastecimiento inadecuado de nutrientes es una limitante del rendimiento de las hortalizas, las cuales, por su crecimiento rápido y producción intensiva, requieren de altas cantidades en periodos cortos de tiempo (Tun, 2000). La interacción entre macro y micronutrientes induce alteraciones subcelulares que se manifiestan en cambios en las tasas de división y expansión celular, uso y transporte de carbohidratos y ácidos orgánicos, fotosíntesis, respiración, etc.; la influencia neta de estos cambios se traduce en el rendimiento, la calidad, la fisiología y la bioquímica postcosecha. La práctica actual de decidir sobre la dosis de fertilización, muchas veces se basa en amplias experiencias locales, lo cual es útil para obtener buenos rendimientos, pero a veces no es efectiva ni económica (Arellano y Gutiérrez, 2003.)

La fertilización debe hacerse a partir de la demanda nutrimental de la planta, de tal manera que cumpla su función; es decir, cubrir el requerimiento nutrimental en cantidad y en oportunidad, para favorecer la expresión del rendimiento y garantizar que la mayor parte del fertilizante aplicado sea aprovechado por el cultivo (Castro *et al.*, 2003). Los requerimientos de nutrición de las hortalizas varían considerablemente entre especies y puede ser difícil mantener rendimientos altos en el mismo suelo. Las prácticas de mejoramiento de la fertilidad del suelo tales como el abono orgánico y la rotación de cultivos, conjuntamente con la fertilización adecuada, parecen necesarias para mejorar los resultados en la producción comercial de hortalizas (Coffey, 1983).

La aplicación del agua mediante riego por goteo propicia el incremento del rendimiento sólo si el fertilizante es aplicado a través del agua con la frecuencia adecuada. Así, cuando la humedad aprovechable del suelo se incrementa con el riego por goteo, el factor limitante del rendimiento parece ser una combinación de agua y fertilizante (Liptay *et al.*, 1997; Nijensohn, 1981).

Esto significa que la fertilización debe ser un complemento del riego por goteo, para que los rendimientos puedan ser altos y sostenidos en el tiempo. El sistema de riego es determinante en los resultados de la fertirrigación, debido a la forma en que el agua se distribuye al cultivo y a la cantidad aplicada. Por lo mismo, al introducir cualquier sistema de riego, se deben evaluar sus características específicas y su eficiencia enfocada a la fertirrigación. Por lo anterior, los sistemas de riego localizado, tales como el riego por goteo, son los más eficientes (Tun, 2001).

Burgueño (1999), señala que el control del manejo de la fertirrigación en cada etapa fenológica de un cultivo, precisa del entendimiento del funcionamiento vegetal. El conocimiento de la movilidad de los nutrimentos en el suelo, aplicados a través del riego por goteo, permite decidir la forma química de los fertilizantes, su tiempo de aplicación durante el riego y la colocación del emisor. El manejo adecuado de los equilibrios químicos en fertirrigación, requiere de conocimientos previos sobre la fenología del cultivo y su cinética de absorción de nutrimentos y agua, teniendo como apoyo en este manejo el control nutricional con análisis de savia de las plantas, así

como de la solución del suelo de donde se nutren. También señala que las pérdidas de nutrientes lixiviados por el manejo inadecuado del riego pueden representar un porcentaje alto en el costo de la fertirrigación. Por ello, es indispensable que se tengan los conocimientos y las herramientas necesarias para realizar la aplicación del agua de riego de una manera adecuada y eficiente, para evitar riesgos de lavado del suelo y por ende la contaminación de los acuíferos.

2.3. La nutrición del cultivo de chile

A pesar de la importancia del cultivo de chile en México, son escasos los trabajos de investigación sobre el manejo de la fertilización y los niveles óptimos de nutrientes requeridos para su desarrollo y la manifestación de altos rendimientos. Además, en la mayoría de los sistemas de producción agrícola, el uso de fertilizantes muestra una baja eficiencia de recuperación, la cual no ha sido cuantificada debidamente, pero que sin duda tiene un fuerte impacto en la rentabilidad y en el deterioro ambiental.

Es necesario generar conocimiento para aumentar la eficacia de las técnicas para su producción, optimizar la fertilización para disminuir los costos de producción y reducir el efecto negativo sobre el ambiente, y al mismo tiempo se propicie una óptima calidad y cantidad de los productos. Una forma de abordar lo anterior es el desarrollo de técnicas cuantitativas de diagnóstico que permitan relacionar la demanda nutricional del cultivo con la oferta nutricional del suelo. La demanda es función de la biomasa total que se acumula durante el ciclo del cultivo y del requerimiento interno nutricional (RIN). Este último parámetro se refiere a la concentración del nutriente de interés en la biomasa aérea total, obtenido en el momento de la cosecha bajo una nutrición óptima y es independiente del rendimiento (Hernández *et al.*, 2003).

Estos autores, también señalan que para conocer la demanda total del nutriente de interés sólo se necesita conocer la meta de rendimiento y multiplicarla por el requerimiento interno nutricional. El contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en la planta es consecuencia de diversos factores como son el rendimiento, clima, tipo de suelo, e historial de fertilización. Para el cultivo de chile se reportan valores entre 100

y 450 kg ha⁻¹ de N; 40 y 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 250 y 700 kg ha⁻¹ de K₂O. Entonces, el RIN es un parámetro indispensable para cuantificar con precisión la demanda nutrimental real del cultivo. El RIN y la meta de rendimiento definen la magnitud de la demanda de cualquier cultivo, lo cual permite precisar las dosis de fertilización que se necesitan aplicar.

El alto costo de investigación sobre fertilización, es una de las causas por las que aún no se cuenta con recomendaciones que cubran las necesidades nutrimentales de este cultivo, y se utilizan dosis de fertilización obtenidas mediante ensayos tradicionales que no permiten tener resultados extrapolables y confiables. Actualmente, se trabaja para generar recomendaciones de fertilización, considerando la producción de un cultivo como un sistema y explicando la respuesta mediante un modelo, el cual establece que la cantidad de nutrimento que debe aplicarse es igual a la diferencia entre la demanda del nutrimento y la cantidad que puede aportar el suelo, todo esto ajustado por la eficiencia con la cual se recupera el nutrimento del suelo (Castro *et al.*, 2003).

Los mismos autores, señalan que de los componentes del modelo anterior, la demanda nutrimental del cultivo es función de su potencial de acumulación de materia seca y para determinar la demanda nutrimental de un cultivo, es preciso tener conocimiento del requerimiento de ese nutrimento, del índice de cosecha y del rendimiento esperado bajo una condición edafoclimática dada. En el cultivo de Chile es posible aplicar este concepto, siempre y cuando se cuente con la información para cada parámetro del modelo, ya que a diferencia de los métodos tradicionales, las bases de la expresión anterior están en el entendimiento de los principios fisiológicos que rigen la producción de los cultivos, de la dinámica nutrimental de los elementos en el suelo, y de la influencia de los factores edafoclimáticos.

El rendimiento y la calidad del fruto de un cultivo están determinados por la producción de materia seca (MS) de los órganos de la planta y la concentración de nutrimentos (CN) en dichos órganos, como una función del tiempo. Las funciones únicas de MS y CN (ambas independientes de las propiedades del suelo) determinan

el rendimiento y la calidad únicas del cultivo. El producto MS x CN define la función del consumo acumulado (CA). La MS y el CA que producen el máximo rendimiento y calidad de fruto bajo condiciones climáticas dadas, son denominadas curvas de MS y absorción nutrimental objetivo. La importancia práctica de las curvas objetivo es que ellas indican las tasas de aplicación diaria de ciertos nutrimentos necesarias para mantenerlos a una concentración constante en el suelo (Bar-Yosef, 1999).

La mayor parte de la información generada mediante la investigación ha sido sobre el cultivo de chile bell, el cual es una especie de chile de poca o nula pungencia y con buena aceptación para el consumo en países desarrollados; en contraste, la información generada para otros tipos de chile es escasa.

Miller *et al.*, en 1979, reportaron la producción de materia seca en chile bell (cv. Keystone Resistant Giant); al momento del transplante se acumularon 21 kg ha⁻¹, incrementándose a 1,158 y 5,111 kg ha⁻¹ a los 56 y 112 días después del transplante, respectivamente. En el último muestreo el 43% de la MS total se registró en el fruto. El rendimiento de fruto fresco fue de 13.4 Mg ha⁻¹ determinándose una acumulación de 111 kg de N, 172 kg de P, 136 kg de K, 33 kg de Ca y 34 kg de Mg (Zúñiga, 2003).

2.4. Papel del nitrógeno, fósforo y potasio en el cultivo de chile

El nitrógeno es un componente de enzimas y proteínas, e interviene en los procesos metabólicos de la planta. Forma parte de compuestos orgánicos como la clorofila, aminoácidos, alcaloides y hormonas, y es el nutrimento requerido en mayor cantidad (Archer, 1988; Marshner, 1995). La demanda de nitrógeno es muy alta en las primeras fases de desarrollo del pimiento, reduciéndose a partir del primer corte; para evitar un efecto negativo sobre la maduración se debe controlar en esta etapa, pues un exceso retrasa la maduración (Domínguez, 1993).

El fósforo forma parte de proteínas vegetales, fosfolípidos, fosfatos de azúcares, ácidos nucleicos, ATP y NADP, los cuales almacenan y liberan la energía química requerida para el metabolismo de los tejidos que crecen con mayor rapidez

(meristemos), frutos en maduración y semillas (Mengel y Kirkby, 1981). En el cultivo de pimiento, el adecuado suministro de fósforo es esencial desde la aparición de las primeras flores, periodo en el que la demanda de este elemento es máxima, así como en el periodo de maduración de la semilla (Domínguez, 1993).

La principal función del potasio es la de regular procesos celulares, incluyendo la síntesis de proteínas y existen más de 50 enzimas que dependen o son estimuladas por el potasio (Marshner, 1995). El potasio interviene en el metabolismo glucídico y proteínico, equilibrio hídrico, apertura y cierre de estomas, mantiene la turgencia celular, absorción y reducción del nitrato, división celular, acumulación y translocación de carbohidratos. Su deficiencia puede provocar manchas cloróticas que luego se vuelven necróticas, al intensificarse la carencia ocurre la disminución del crecimiento. Las plantas que presentan esta deficiencia son sensibles a enfermedades provocadas por microorganismos (Jones *et al.*, 1991). El potasio juega un papel vital en el crecimiento y metabolismo de la planta, aunque no es un constituyente de algún componente vegetal. Por lo general, se reconoce que la deficiencia de potasio suprime el crecimiento de la planta y disturba muchos aspectos del metabolismo de la hoja, tales como la concentración de carbohidratos, así como las tasas fotosintéticas y de traslocación (Baghour *et al.*, 2001).

El contenido de potasio aumenta hasta la floración manteniéndose después equilibrado con algo de excreción a la madurez; influye en la precocidad, coloración y calidad del fruto (Domínguez, 1993). Para altos rendimientos de tomate se requieren de 150 a 300 kg ha⁻¹ de K₂O, y para una mayor calidad son necesarios de 600 a 800 kg ha⁻¹ de K₂O (Marshner, 1995).

2.5. Nutrición de las plántulas de chile

El cultivo de chile se establece comúnmente a partir de la producción de plántulas bajo condiciones de invernadero. El éxito en su producción la determina en gran medida la calidad de las plántulas utilizadas, debido a que la condición de la planta al momento del trasplante afecta su supervivencia, precocidad, rendimiento total y

tamaño del fruto. El tamaño del contenedor, la nutrición y edad de la planta antes y después del transplante, y las prácticas de almacenamiento son factores que afectan el tamaño, calidad y desarrollo de los transplantes y pueden o no ser significativos sobre el rendimiento total, dependiendo del cultivo (Weston y Zandstra, 1989).

Para la producción de plantas de hortalizas se utilizan diferentes tipos de contenedores y el estudio de su efecto sobre la calidad de las plántulas ha producido resultados conflictivos en varios cultivos. En papa y otros cultivos se desconoce el efecto del tipo de contenedor sobre el crecimiento, desarrollo, producción de raíz y calidad de la plántula. Las raíces enrolladas y deformadas propician una reducción en la producción y la calidad de las plántulas. El tipo de contenedor puede inducir la deformación de la raíz y alterar adversamente el desarrollo de las plantas. El mejor contenedor es el de pirámide invertida (Ching, 2000).

Los efectos de la restricción radical sobre el desarrollo y la fisiología de las plantas han recibido muy poca atención a pesar de su importancia en forestería, agricultura y horticultura, para regular el crecimiento de las plantas. La restricción radical es un estrés físico impuesto a la raíz cuando las plantas se cultivan en contenedores pequeños, el cual conduce a una reducción pronunciada de la raíz y de la parte aérea de las plantas. Los procesos involucrados en la reducción del crecimiento incluyen la inhibición de la elongación foliar, cambios en las relaciones hídricas, en el intercambio gaseoso en la hoja y la fotosíntesis, en la partición de materia seca y la absorción de nutrimentos y en el metabolismo de hormonas. La condición del agua en la planta ha sido propuesto como uno de los factores primarios responsables de la reducción del crecimiento en plantas sujetas a restricción radical (Mugnai *et al.*, 2000).

El éxito de la producción de plántulas depende del cuidado con el que se realice la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio. La falta de información sobre la adecuada relación de nitrógeno, fósforo y potasio, las concentraciones y la oportunidad de aplicación dificulta el establecimiento de un calendario de fertilización. Usualmente, la solución nutritiva se aplica en todos los riegos, pero la acumulación de sales de la solución nutritiva y del agua de riego salina, pueden incrementar la

salinidad y el pH del medio y reducir el desarrollo (Dufault, 1987). El nitrógeno y el fósforo son importantes en la producción de transplantes de tomate. El régimen de fertilización durante la producción de transplantes en el invernadero afecta el tamaño del transplante y su habilidad para el rendimiento subsecuente (Weston y Zandstra, 1989).

La nutrición de este cultivo debe iniciarse en el almácigo, ya que cuando se generan las hojas verdaderas se incrementa la demanda de nutrimentos, especialmente de macronutrimentos. Debido a que la nutrición de las plántulas influye en su crecimiento, debe haber una adecuada sincronización entre el suministro de los nutrimentos y las características que determinan el momento del transplante. La respuesta de las plántulas a la concentración de nitrógeno está reportada para algunas especies, pero se requiere precisar su concentración óptima en Chile (Delgado *et al.*, 2003). La fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio en la producción de plantas de Chile poblano no ha recibido la atención adecuada, siendo común el uso de dosis recomendadas para otros tipos de Chile, lo cual propicia desuniformidad en el material obtenido.

2.6. Efecto de la nutrición en el cultivo de Chile

En la producción de hortalizas se requiere de una producción continua con altos rendimientos y calidad del fruto para tener éxito económico. Para el cultivo de Chile pimiento se tiene bastante información sobre el efecto de la fertilización nitrogenada sobre diferentes variedades. En la mayoría de los experimentos, la aplicación de nitrógeno incrementó el número de flores y el rendimiento de frutos. La aplicación óptima de nitrógeno para este cultivo varía de 135 a 252 kg ha⁻¹ dependiendo de las condiciones ambientales y la fertilidad del suelo; también se ha demostrado la importancia de la tasa de aplicación en función de la demanda del cultivo, para lo cual se ha establecido la curva de consumo de nitrógeno en Chile a campo abierto, obteniendo altos rendimientos con la fertirrigación aplicada con riego por goteo (Bartal *et al.*, 2001b).

La concentración óptima de nitrógeno en el agua de riego para cultivos tradicionales de Chile a campo abierto, varió entre 7 y 17.5 mMol L⁻¹ dependiendo de la radiación y el cultivar (Aloni *et al.*, 1994). Schon *et al.* (1994), encontraron que las plantas de Chile desarrolladas en lana de roca que recibieron nitrógeno a 12.5 mMol L⁻¹ produjeron significativamente más fruto y mayor peso total del fruto que las plantas que recibieron nitrógeno a concentraciones de 8.6 mMol L⁻¹.

La concentración de nitrógeno en los órganos de la planta se incrementó significativamente conforme su concentración en la solución se incrementó de 0.25 a 14 mMol L⁻¹ a una relación nitrato:amonio constante de 4.0. La concentración de nitrógeno fue mayor en hojas jóvenes que en hojas viejas, debido posiblemente a su translocación hacia las hojas jóvenes. La concentración de nitrógeno en el fruto declinó con el desarrollo del fruto (Bar-Tal *et al.*, 2001a). La concentración óptima de nitrógeno para la producción de materia seca de diferentes órganos de Chile fue de 8.0-9.4 mMol L⁻¹, mientras que el máximo rendimiento de alta calidad se obtuvo con 8.2 mMol L⁻¹. El efecto negativo de la concentración por encima de 10 mMol L⁻¹ probablemente fue causado por la alta concentración de amonio y coincidió con la reducción de la absorción de calcio y potasio conforme la concentración de nitrógeno se incrementó por encima de 7.0 mMol L⁻¹ (Bar-Tal *et al.*, 2001b).

El aumento de la concentración de nitrógeno en la solución de 0.25 a 7 mMol L⁻¹ propició el incremento del rendimiento de alta calidad y total en 350% y 550%, respectivamente; un mayor aumento, de 7 a 14 mMol L⁻¹ redujo el rendimiento de alta calidad en 32%. La concentración de nitrógeno calculada para el rendimiento máximo fue de 9.4 mMol L⁻¹. La concentración de potasio fue del mismo orden en hojas jóvenes y viejas y en los frutos. La relación potasio:calcio en el fruto estuvo en el rango de 40:1 a 50:1, mientras que en hojas viejas el rango fue de 1:1 a 3:1. La concentración de potasio en todos los órganos se redujo conforme la relación nitrato:amonio en la solución se redujo debido al mecanismo de balance catión-anión en la planta. La concentración de potasio fue máxima en las hojas cuando la concentración de nitrógeno varió entre 7 y 10.5 mMol L⁻¹, mientras que en el fruto se redujo al incrementar el suministro en el intervalo estudiado (Bar-Tal *et al.*, 2001a).

2.7. La pungencia del fruto de chile

La pungencia del chile es una característica importante de calidad y está determinada por la producción de capsaicinoides en la baya (Bosland, 1992); está dada por un complejo de cinco de ellos: capsaicina, dihidrocapsaicina, nordihidrocapsaicina, homodihidrocapsaicina y homocapsaicina (García *et al.*, 1995). Se ha encontrado que el principal sitio de formación y acumulación de los capsaicinoides es la vacuola de las células de la placenta (Fujiwake *et al.*, 1980). También se puede encontrar capsaicina en las semillas debido a que éstas la absorben de la placenta, así como en el pericarpio del fruto (Bosland, 1992; Ríos, 1969).

La capsaicina ($C_{18}H_{27}O_3N$) es la más importante, constituye el 70% de los capsaicinoides, y es 100% pungente con respecto al resto del grupo (25 a 50%) (García *et al.*, 1995). Es un alcaloide fuerte y estable y se reporta que en diluciones muy bajas (1 mg L^{-1}), es detectable por el paladar humano, propiciando el incremento de la secreción de saliva y la sensación de calor y ardor en la boca (Bosland, 1992; García *et al.*, 1995). El contenido de capsaicina en el fruto de chile puede ser afectado por factores bióticos y abióticos. Entre los bióticos mencionan la especie y tipo, la variedad, el grado de madurez y el daño causado por plagas y enfermedades; entre los abióticos juegan un papel importante el suelo, el clima (temperatura y luz) y la fertilización (Bajaj *et al.*, 1980; García *et al.*, 1995; Johnson y Decoteau, 1996). Sin embargo, existe muy poca investigación que soporte estas sugerencias.

Johnson y Decoteau (1996) en un trabajo realizado en hidroponía y en condiciones de invernadero, encontraron que el suministro de nitrógeno (7.5 y 22.5 mM) incrementó la concentración de capsaicina en frutos de chile jalapeño cv. Jalapa, mientras que el suministro de potasio (1, 3, 6, 9 y 12 mM) no tuvo efecto significativo. Ríos (1969) encontró una concentración de 1.18% de capsaicina en frutos de chile jalapeño de Veracruz, en tanto que Mata *et al.* (1987) citados por García *et al.* (1995) encontraron 0.58% también en chile jalapeño. Velasco (1999) reporta concentraciones de 0.18 a 0.40 % en chile jalapeño cv. M, lo cual pudo deberse a que este tipo de chile es de

poca pungencia. Esto es un indicador de que el material genético determina en gran medida el contenido de capsaicina, aunque la fertilización es importante.

2.8. Uso de soluciones nutritivas

El cultivo de plantas en solución nutritiva, con o sin el uso de sustrato para proporcionar soporte mecánico (vermiculita, grava, arena, aserrín, etc.) se le ha llamado hidroponía. Los sistemas hidropónicos son catalogados como abiertos y cerrados (Jensen y Collins, 1985). El empleo de soluciones nutritivas permite tener un control en las relaciones mutuas de aniones y de cationes además, de un control de la presión osmótica la cual es diferente para cada especie, estado fenológico de la planta y época del año (Baca, 1995, citado por Armenta, 1998).

Los nutrimentos que se involucran en una solución nutritiva en ensayos de hidroponía son principalmente K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , $H_2PO_4^-$ y SO_4^{2-} ; sin embargo, eso no implica que la solución no contenga a los demás nutrimentos. Los micronutrimentos tienen relativamente poca influencia en el crecimiento de las plantas en un intervalo definido en la composición de la solución nutritiva, por lo que no tiene sentido utilizarlos como variable de estudio en las investigaciones. Por otra parte, se señala incluso que, si ocurren pequeñas desviaciones en la composición química de la solución de nutrimentos, las mismas plantas pueden seleccionar los iones en una relación mutua favorable para su crecimiento y desarrollo (Steiner, 1984).

La metodología desarrollada en la determinación de la solución nutritiva universal de Steiner, toma en cuenta entre otros aspectos las relaciones que deben existir entre los nutrimentos, aspecto que se debe tomar como referencia en la búsqueda de las mejores dosis de nutrimentos en el sistema de riego por goteo y en la producción de plántulas de tomate en invernadero. La utilización de la solución nutritiva Steiner modificada permitió reducir considerablemente las cantidades de nitrógeno y potasio aplicadas en campo, lo cual a su vez implica un ahorro económico y la reducción de la contaminación del suelo y los acuíferos (Armenta, 1998).

Las características principales que tienen influencia en el crecimiento, desarrollo, calidad de los cultivos y sus productos de importancia económica son: la relación mutua de cationes K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; la relación mutua entre aniones NO_3^- , $H_2PO_4^-$ y $SO_4^{=}$, la cantidad total de solutos ($mMol L^{-1}$ de nutrimentos) la cual está representada por la presión osmótica y se expresa en atmósferas; y el pH (Steiner, 1961).

2.9. Conclusiones de la revisión de literatura

En la producción de hortalizas se requiere de una producción continua con altos rendimientos y calidad del fruto para tener éxito económico. El chile es una hortaliza de gran importancia económica, social y cultural para el país; anualmente se cultivan más de 140,000 ha, de diversos tipos; sin embargo, los rendimientos son bajos ($13 Mg ha^{-1}$) debido al bajo nivel de tecnología empleada. Asimismo, los altos costos de producción reducen su competitividad en el mercado internacional, lo cual limita su rentabilidad.

Los principales problemas a los que se enfrenta el cultivo son de carácter técnico, sobresaliendo los aspectos nutricionales. No obstante, el potencial de producción es alto, pero para obtenerlo es indispensable realizar investigación enfocada a diversos aspectos entre los que destaca la fertilización para cada tipo de chile, ya que la experiencia indica que no es factible extrapolar los pocos resultados a todos los tipos de chile y condiciones de producción. La mayor cantidad de trabajos de investigación en este cultivo se ha realizado en chile bell, jalapeño y serrano; sin embargo, la información no puede ser extrapolada a todos los tipos que se cultivan en el país, razón por la cual es necesario generar el conocimiento para cada uno de ellos. La aplicación de la fertirrigación en hortalizas ha demostrado su bondad en el incremento del rendimiento y la calidad de los productos; sin embargo, su implementación requiere del conocimiento de los requerimientos hídricos y nutricionales de los cultivos.

El chile poblano es de gran importancia en el país por su superficie y uso en diversos platillos. No obstante, existe poca investigación sobre sus requerimientos de agua y nutrimentos, por lo que es necesario obtener esta información para cada etapa fenológica incluyendo la de almácigo. La determinación de su requerimiento nutrimental, se debe realizar bajo condiciones controladas, para obtener la información del efecto de los nutrimentos sobre las funciones fisiológicas y los componentes del rendimiento y la calidad de los frutos. Esto permitirá mejorar el manejo comercial del cultivo e incrementar su rendimiento y calidad, para beneficio de los agricultores que dependen de esta actividad. Por todo lo anterior, se propone el presente trabajo de investigación, cuyos objetivos e hipótesis se establecen a continuación.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Objetivo General

Determinar el efecto de la nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio sobre el rendimiento y la calidad del fruto de chile poblano.

3.2. Objetivos Específicos

1. Evaluar el efecto de la nutrición nitrogenada, fosfórica y potásica sobre el crecimiento del cultivo de chile poblano.
2. Evaluar el efecto de la nutrición nitrogenada, fosfórica y potásica sobre el rendimiento y la calidad del fruto de chile poblano.
3. Evaluar el efecto de la nutrición nitrogenada, fosfórica y potásica sobre la concentración y la acumulación nutrimental.

3.3. Hipótesis General

La nutrición con nitrógeno, fósforo y potasio, incrementa el rendimiento y la calidad del fruto de chile poblano.

3.4. Hipótesis Específicas

1. La aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio incrementa el crecimiento de las plantas de chile poblano en sus diferentes etapas fenológicas.
2. La aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio, incrementa el rendimiento y la calidad del fruto del cultivo de chile poblano.
3. La aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio, incrementa la concentración y la acumulación de nutrimentos en las plantas de chile poblano.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Experimento Uno: Producción de plántulas de chile poblano

El experimento se desarrolló en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, ubicado en Montecillo, Estado de México, en un invernadero, y se utilizaron soluciones nutritivas. Se evaluó el efecto de tres concentraciones de NO_3^- (6, 9 y 12 me L^{-1}), dos de H_2PO_4^- (0.5 y 1.0 me L^{-1}) y dos de K^+ (5 y 7 me L^{-1}) en la solución nutritiva, sobre el crecimiento, producción de materia seca (MS) y la concentración de nitrógeno, fósforo, y potasio en las hojas de plántulas de chile poblano híbrido Caballero. El diseño experimental fue completamente al azar con un arreglo factorial de tratamientos (3 x 2 x 2), lo cual dio lugar a 12 combinaciones de tratamiento (Cuadro 2) y se establecieron tres repeticiones para un total de 36 unidades experimentales.

Las soluciones nutritivas fueron modificaciones realizadas a la solución universal Steiner (Steiner, 1984). A partir de la composición de dicha solución nutritiva se cambiaron los niveles de los factores estudiados, pero teniendo cuidado de mantener el balance iónico (20 cationes y 20 aniones) y el pH (6.5) en las 12 soluciones nutritivas resultantes (Cuadro 3). Las soluciones nutritivas se complementaron con micronutrientes. Para preparar las soluciones se utilizaron fuentes grado reactivo. Las fuentes de macronutrientes fueron $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 , K_2SO_4 , y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, y las de micronutrientes H_3BO_3 , $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ y Fe-EDTA.

La siembra se realizó el 9 de septiembre de 2005, en charolas de poliestireno (35 mL) de 200 cavidades, con sustrato orgánico (peat moss), y se colocó una semilla por cavidad. La emergencia de las plántulas inició el 23 de septiembre y para el 4 de octubre se tenía un 50% de germinación con lo cual se obtuvieron las plántulas necesarias para establecer el experimento. Las plántulas se acomodaron en las charolas para establecer tres unidades experimentales por charola y se dejaron 40 plantas por unidad experimental.

Cuadro 2. Combinaciones de tratamientos del arreglo factorial 3x2x2 aplicadas a las plántulas de chile poblano en almácigo.

| Combinación de tratamientos | Nivel del elemento estudiado (me L ⁻¹) | | |
|-----------------------------|--|---|----------------|
| | NO ₃ ⁻ | H ₂ PO ₄ ⁻ | K ⁺ |
| 1 | 6 | 0.5 | 5 |
| 2 | 6 | 0.5 | 7 |
| 3 | 6 | 1.0 | 5 |
| 4 | 6 | 1.0 | 7 |
| 5 | 9 | 0.5 | 5 |
| 6 | 9 | 0.5 | 7 |
| 7 | 9 | 1.0 | 5 |
| 8 | 9 | 1.0 | 7 |
| 9 | 12 | 0.5 | 5 |
| 10 | 12 | 0.5 | 7 |
| 11 | 12 | 1.0 | 5 |
| 12 | 12 | 1.0 | 7 |

La aplicación de los tratamientos se inició el 14 de octubre de 2005, cuando el 75% de las plántulas presentaron su primera hoja verdadera. Se dieron dos riegos diarios con las soluciones nutritivas durante periodos de 4 días, alternándolos con riegos de lavado con agua destilada (día 5), para reducir la acumulación de sales.

Cuadro 3. Composición de las soluciones nutritivas de las 12 combinaciones de tratamientos, aplicadas a plántulas de chile poblano en almácigo.

| Combinación de tratamientos | Concentración de cationes y aniones (me L ⁻¹) | | | | | | | |
|-----------------------------|---|---|-------------------------------|-----------|------------------|------------------|----------------|-----------|
| | NO ₃ ⁻ | H ₂ PO ₄ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Total | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Total |
| 1 | 6 | 0.5 | 13.5 | 20 | 10 | 5 | 5 | 20 |
| 2 | 6 | 0.5 | 13.5 | 20 | 9 | 4 | 7 | 20 |
| 3 | 6 | 1.0 | 13.0 | 20 | 10 | 5 | 5 | 20 |
| 4 | 6 | 1.0 | 13.0 | 20 | 9 | 4 | 7 | 20 |
| 5 | 9 | 0.5 | 10.5 | 20 | 10 | 5 | 5 | 20 |
| 6 | 9 | 0.5 | 10.5 | 20 | 9 | 4 | 7 | 20 |
| 7 | 9 | 1.0 | 10.0 | 20 | 10 | 5 | 5 | 20 |
| 8 | 9 | 1.0 | 10.0 | 20 | 9 | 4 | 7 | 20 |
| 9 | 12 | 0.5 | 7.5 | 20 | 10 | 5 | 5 | 20 |
| 10 | 12 | 0.5 | 7.5 | 20 | 9 | 4 | 7 | 20 |
| 11 | 12 | 1.0 | 7.0 | 20 | 10 | 5 | 5 | 20 |
| 12 | 12 | 1.0 | 7.0 | 20 | 9 | 4 | 7 | 20 |

Al final del experimento, el 15 de noviembre de 2005, se cosecharon 30 plantas por tratamiento. En 15 de ellas se midió altura, diámetro del tallo, número de hojas y lecturas SPAD, con un medidor de la intensidad del color verde portátil (Minolta SPAD-502). Las plantas se separaron en raíz, tallo y hoja. Se usó un integrador de área foliar (LI-COR portable meter; modelo LI-300) para determinar la superficie de las hojas, las cuales se lavaron con agua corriente y destilada para su secado.

Para la evaluación de la MS, las 15 plantas restantes se separaron en tres partes y se prepararon de la misma manera. Las muestras vegetales se secaron en estufa de aire forzado a 65°C por 72 h y después se obtuvo el peso seco de la hoja, el tallo y la raíz. Con dichos valores se determinó la producción de MS total y la relación de producción de MS de la parte aérea y la raíz, así como la relación de MS del tallo y la raíz.

Las hojas se molieron y se pasaron a través de un tamiz de 20 mallas. El análisis químico de las hojas se realizó de la manera siguiente: el nitrógeno total se extrajo mediante el método de micro-Kjeldahl y su concentración se cuantificó por la destilación del extracto y la titulación manual con H₂SO₄ 0.05 N usando indicador verde de bromocresol-rojo de metilo; la extracción de fósforo y potasio se hizo por digestión húmeda de las muestras usando una mezcla de HNO₃-HClO₄ y su concentración se cuantificó con un espectrofotómetro de emisión ICP-AES Plasma 96 Varian (Alcántar y Sandoval, 1999). Con los datos del análisis foliar y la MS de la raíz se calculó la eficiencia de absorción nutrimental de la raíz.

Se hizo el análisis de varianza del factorial y la prueba de comparación de medias (Tukey; $\alpha \leq 0.05$), empleando el paquete estadístico SAS, de todas las variables. En los Cuadros A1 y A2 del Apéndice se presentan el programa del SAS empleado para el análisis estadístico del experimento factorial y el cuadro del análisis de varianza, respectivamente.

4.2. Experimento Dos: Fenología, crecimiento y producción de fruto

El experimento se condujo en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, ubicadas en Montecillo, Estado de México, bajo condiciones de invernadero e hidroponía, durante 2006. En este experimento también se usó como base la solución universal Steiner (Steiner, 1984), a partir de la cual se hicieron variar las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio. Las dosis que se evaluaron fueron NO_3^- : 6, 8, 10, y 12 me L⁻¹; H_2PO_4^- : 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 me L⁻¹; y, K^+ : 6, 7, 8 y 9 me L⁻¹. Dichos niveles se determinaron en función de los trabajos realizados en el cultivo de chile por diversos autores (Mata, 2001; Tun, 1999; Zúñiga, 2003).

Para estudiar los tres factores y sus cuatro niveles experimentales, los cuales están igualmente espaciados, se usó el diseño San Cristóbal (Rojas, 1979), en el cual se ensayan 12 combinaciones de tratamientos (Cuadro 4) con lo que se pudo tener un experimento compacto. Las combinaciones de tratamientos se arreglaron en un diseño completamente al azar con tres repeticiones (36 unidades experimentales). Cada unidad experimental tuvo un total de 36 plantas, en las cuales se realizaron las evaluaciones. En las 12 soluciones se mantuvo el balance iónico (20 cationes y 20 aniones) y se ajustó el pH a 6.5 (Cuadro 5).

Cuadro 4. Combinaciones de tratamientos del Diseño San Cristóbal aplicadas a plantas de chile poblano en hidroponía.

| Combinación de tratamientos | NO_3^- (me L ⁻¹) | H_2PO_4^- (me L ⁻¹) | K^+ (me L ⁻¹) |
|-----------------------------|--|--|---------------------------------------|
| 1 | 6 | 0.5 | 6 |
| 2 | 10 | 0.5 | 6 |
| 3 | 6 | 1.5 | 6 |
| 4 | 10 | 1.5 | 6 |
| 5 | 6 | 0.5 | 8 |
| 6 | 10 | 0.5 | 8 |
| 7 | 6 | 1.5 | 8 |
| 8 | 10 | 1.5 | 8 |
| 9 | 8 | 1.0 | 7 |
| 10 | 12 | 1.0 | 7 |
| 11 | 8 | 2.0 | 7 |
| 12 | 8 | 1.0 | 9 |

Cuadro 5. Composición de las soluciones nutritivas de las combinaciones de tratamientos del diseño San Cristóbal aplicadas a plantas de chile poblano.

| Combinación de tratamientos | Concentración de cationes y aniones (me L ⁻¹) | | | | | | | |
|-----------------------------|---|---|-------------------------------|-------|------------------|------------------|----------------|-------|
| | NO ₃ ⁻ | H ₂ PO ₄ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Total | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Total |
| 1 | 6 | 0.5 | 13.5 | 20 | 9 | 5 | 6 | 20 |
| 2 | 10 | 0.5 | 9.5 | 20 | 9 | 5 | 6 | 20 |
| 3 | 6 | 1.5 | 12.5 | 20 | 9 | 5 | 6 | 20 |
| 4 | 10 | 1.5 | 8.5 | 20 | 9 | 5 | 6 | 20 |
| 5 | 6 | 0.5 | 13.5 | 20 | 8 | 4 | 8 | 20 |
| 6 | 10 | 0.5 | 9.5 | 20 | 8 | 4 | 8 | 20 |
| 7 | 6 | 1.5 | 12.5 | 20 | 8 | 4 | 8 | 20 |
| 8 | 10 | 1.5 | 8.5 | 20 | 8 | 4 | 8 | 20 |
| 9 | 8 | 1.0 | 11.0 | 20 | 9 | 4 | 7 | 20 |
| 10 | 12 | 1.0 | 7.0 | 20 | 9 | 4 | 7 | 20 |
| 11 | 8 | 2.0 | 10.0 | 20 | 9 | 4 | 7 | 20 |
| 12 | 8 | 1.0 | 11.0 | 20 | 8 | 3 | 9 | 20 |

Las fuentes de macronutrientes fueron Ca(NO₃)₂·4H₂O, KH₂PO₄, K₂SO₄, y MgSO₄·7H₂O. La nutrición del cultivo se complementó aplicando una solución de micronutrientes cuyas fuentes fueron H₃BO₃, MnSO₄·4H₂O, ZnSO₄·7H₂O, CuSO₄·5H₂O, H₂MoO₄·H₂O y Fe-EDTA, todas las fuentes fueron de grado técnico.

El cultivo indicador fue el chile poblano (*Capsicum annuum* L., híbrido Caballero); el cual es de alto rendimiento y fruto de excelente calidad. Presenta frutos grandes de color verde intenso y maduración en rojo escarlata, paredes gruesas y con frutos lisos de 2 lóculos. Las plantas son vigorosas con entrenudos largos y pedúnculo fuerte. Su ciclo vegetativo, de la siembra a la cosecha, es de 150 días (Sakata, 2004).

La siembra se realizó el 20 de febrero de 2006, en charolas planas llenas con peat moss. La emergencia de más del 50% de las plántulas ocurrió el 1 de marzo y el 7 de marzo alcanzó un total del 95% de germinación. Las plantas se trasladaron a las charolas de poliestireno de 200 cavidades entre el 7 y el 10 de marzo, colocando una planta por cavidad. El manejo nutricional de las plantas en el almácigo se realizó con la mejor dosis obtenida en el experimento de la primera fase: una solución nutritiva con 6 me L⁻¹ NO₃⁻, 0.5 me L⁻¹ H₂PO₄⁻ y 7 me L⁻¹ K⁺, la cual se aplicó diariamente de 1 a 2 veces por día dependiendo de la temperatura, e inició el 16 de marzo (24 días después de la siembra) cuando las plántulas presentaron la primera hoja verdadera.

Para su desarrollo, las plantas de chile se transplantaron a bolsas con tezontle rojo de diámetro mediano (aprox. 0.5 cm) como sustrato. El tamaño de la bolsa dependió del número de muestreo que le correspondió, siendo las de mayor capacidad las de los muestreos 5 al 9. También se colocó diferente número de plantas por bolsa (1, 2, 3, y 4) el cual fue proporcional al tamaño de la bolsa. El transplante se realizó entre el 8 y el 10 de mayo de 2006 (77 a 79 días después de la siembra), cuando las plantas tenían en promedio una altura de 12 cm, un diámetro del tallo de 1.7 mm, 8 ocho hojas verdaderas, área foliar de 19.6 cm² y lectura SPAD de 48.8.

La aplicación de las soluciones nutritivas correspondientes a cada tratamiento inició el 12 de mayo, 2 días después del transplante (ddt), una vez que las plántulas ya estaban bien establecidas en las bolsas. El manejo de los tratamientos se realizó mediante aplicaciones manuales de las soluciones nutritivas a cada bolsa y la cantidad de solución aplicada dependió del tamaño de la bolsa y el número de plantas en cada una y de la edad, de tal manera que el volumen fue el mismo para cada plántula. La frecuencia y el volumen de los riegos también fueron variables, ya que el requerimiento hídrico por planta se incrementó a medida que las plantas crecieron.

Las evaluaciones se realizaron cada 18 días para un total de 9 muestreos. El número de plantas evaluadas en cada muestreo fue variable en función del tamaño de las mismas al momento del muestreo. Se evaluaron 10 plantas en el primer muestreo, 8 en el segundo, 5 en el tercero, 2 en el cuarto y una planta por unidad experimental en los restantes muestreos. La gran cantidad de evaluaciones realizadas, propició que cada muestreo se realizara en un periodo de tiempo que varió de 2 a 4 días, siendo mayor el periodo en los últimos muestreos debido al tamaño de las plantas. Los muestreos realizados se describen en el Cuadro 6.

4.2.1. Variables evaluadas

Las evaluaciones realizadas en cada muestreo y la metodología empleada en cada una de ellas, fueron las siguientes:

Cuadro 6. Descripción de los muestreos realizados para la evaluación de variables en plantas de chile poblano.

| No. de muestreo | Fecha de muestreo | Edad (ddt) | Duración (días) |
|-----------------|-------------------|------------|-----------------|
| 1 | 28 de mayo | 18 | 2 |
| 2 | 15 de junio | 36 | 2 |
| 3 | 3 de julio | 54 | 2 |
| 4 | 21 de julio | 72 | 3 |
| 5 | 8 de agosto | 90 | 3 |
| 6 | 26 de agosto | 108 | 3 |
| 7 | 13 de septiembre | 126 | 4 |
| 8 | 1 de octubre | 144 | 4 |
| 9 | 19 de octubre | 162 | 4 |

ddt = días después del transplante

4.2.1.1. Altura de la planta

Esta variable se evaluó utilizando una regla graduada y la lectura se tomó desde el cuello de la planta hasta la altura máxima de la planta.

4.2.1.2. Diámetro del tallo principal

Se midió con un vernier digital y la lectura se tomó a 1 cm por debajo del primer nudo.

4.2.1.3. Número de hojas

Se contabilizaron todas las hojas bien desarrolladas en cada planta.

4.2.1.4. Número de ramas

Se contaron todas las ramas que tenían al menos un par de hojas bien desarrolladas.

4.2.1.5. Número de flores

Para esta variable se contaron todas las flores que ya estaban abiertas o estaban en proceso de formación de fruto. Muchas de las flores no se detectaron en los muestreos, pues solo permanecen abiertas 4 días y luego se transforman en frutos.

4.2.1.6. Número de frutos

Los frutos contabilizados fueron los que tenían un tamaño mínimo de 1 cm. Se contaron todos los frutos que tenía la planta al momento del muestreo, aunque muchos de los frutos emitidos se perdieron. La mayor cantidad de los frutos perdidos se abortaron de manera “natural” debido a la gran cantidad de frutos emitidos y a las altas temperaturas prevalecientes durante la fructificación, mientras que una cantidad pequeña se perdió debido a las prácticas de manejo del cultivo (principalmente debido al entutorado), las enfermedades y las plagas, en ese orden de importancia.

4.2.1.7. Área foliar

La evaluación se realizó en las hojas sin el pedúnculo foliar; se acomodaron extendidas en acetatos, se cubrieron con papel periódico y se colocaron en una prensa mecánica durante 24 horas antes de ser llevadas al integrador de área foliar. En los muestreos 1 a 4 se empleó un integrador de área foliar LI-COR 3000, en tanto que para los muestreos 5 a 9 se usó el integrador de área foliar LI-COR 3100.

4.2.1.8. Lecturas SPAD

La evaluación se hizo con un medidor portátil de clorofila Minolta SPAD-502. Las mediciones se realizaron en dos hojas bien desarrolladas por planta, y en cada hoja se tomaron 10 lecturas a lo largo de la lámina foliar y se anotó el valor promedio.

4.2.1.9. Producción de materia seca de raíz, tallo, hoja y fruto

Las plantas se separaron en hoja, fruto, tallo y raíz, se lavaron con agua corriente y agua destilada y se colocaron en bolsas de papel perforadas para su secado en la estufa, a 65°C durante 72 horas. Posteriormente, se obtuvo el peso seco de hoja, fruto, tallo y raíz con una balanza granataria. Con dichos valores se determinó la producción de MS total y de la parte aérea, así como la relación de producción de MS de la parte aérea y la raíz, y la relación de producción de MS del tallo y la raíz.

La materia seca del fruto, se determinó a partir de una muestra del total de frutos evaluados por tratamiento y repetición. Posteriormente se determinó el contenido de humedad para cada una de las muestras y se estimó el peso seco del total de fruto cosechado en cada unidad experimental. La evaluación del número de frutos y su materia seca se realizó en las plantas en las que se midieron todas las variables excepto las de rendimiento y calidad del fruto.

4.2.1.10. Contenido de nutrimentos de la hoja

Las hojas se molieron y tamizaron en un molino tipo Wiley provisto de una malla No. 20. El análisis químico de las hojas se realizó de la siguiente manera: el nitrógeno total se extrajo mediante el método de micro-Kjeldahl y su concentración se cuantificó por la destilación del extracto y la titulación manual con H_2SO_4 0.05 N usando indicador verde de bromocresol-rojo de metilo; la extracción de fósforo y potasio se hizo por digestión húmeda de las muestras usando una mezcla de HNO_3 - HClO_4 y su concentración se cuantificó con un espectrofotómetro de emisión ICP-AES Plasma 96 Varian (Alcántar y Sandoval, 1999). Con la información de materia seca y el resultado del análisis químico, se determinaron las cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio, acumuladas en las hojas del cultivo; estos resultados a su vez permitieron determinar las tasas de absorción nutrimental y elaborar las curvas de absorción nutrimental.

4.2.1.11. Rendimiento de fruto

Se realizaron cuatro cortes de fruto en total: 8 de agosto (90 ddt), 13 de septiembre (126 ddt), 1 de octubre (144 ddt) y 19 de octubre (162 ddt). En cada corte se seleccionaron los frutos de primera, segunda, tercera y rezaga, y se determinó el peso total de los mismos, para cada clase. El rendimiento comercial se determinó sumando el peso de los frutos de primera, segunda y tercera, y para obtener el rendimiento total se sumaron los pesos de todas las clases evaluadas. La evaluación del rendimiento se realizó en dos plantas de cada unidad experimental, la cuales fueron cultivadas con este objetivo y se seleccionaron desde el momento del transplante.

4.2.1.12. Calidad del fruto

La calidad del fruto se determinó de dos maneras: el porcentaje de cada clase, y el contenido de capsaicina. Los frutos evaluados correspondieron a las dos plantas seleccionadas para la evaluación del rendimiento.

4.2.1.12.1. *Determinación por clase de fruto*

En cada corte, los frutos se seleccionaron con base en su peso y tamaño de acuerdo a los parámetros que se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Parámetros empleados para la clasificación de los frutos de chile poblano.

| Clase | Tamaño (largo) | Peso (g) |
|---------|----------------|-------------|
| Primera | > 15.0 cm | > 80.0 |
| Segunda | 13.0 – 15.0 cm | 65.0 – 79.9 |
| Tercera | 10.0 - 12.9 cm | 55.0 – 64.9 |
| Rezaga | < 10.0 cm | < 55.0 |

Los frutos de las primeras tres clases fueron aquellos que no presentaban lesiones o deformaciones y los incluidos en la clase de rezaga fueron los que presentaban el tamaño y peso señalado más aquellos que presentaban deformaciones, manchas o cualquier otra característica que dañara su aspecto físico.

4.2.1.12.2. *Determinación por el contenido de capsaicina*

Esta variable se determinó en una muestra de frutos del tercer corte. Se realizó en 24 unidades experimentales (repeticiones I y II de cada tratamiento), en cada una de las cuales se seleccionaron dos frutos que se pesaron en fresco al momento del corte. La metodología usada fue la propuesta por Ríos (1969), la cual consistió en la extracción, purificación y cuantificación de la capsaicina por espectrofotometría. En el Apéndice 3 se describe el procedimiento empleado.

4.2.2. Análisis estadístico

El diseño San Cristóbal no es un diseño ortogonal para estimar un modelo de segundo orden, razón por la cual el análisis de los resultados tuvo que hacerse mediante computadora. En este caso particular, el análisis con el paquete estadístico SAS se vuelve elemental, combinando los procedimientos de análisis de varianza y los modelos generales lineales (GLM, por sus siglas en inglés) de regresión de este programa (Martínez y Martínez, 1996). También se realizó la comparación de medias de las 12 combinaciones de tratamientos del experimento (Tukey; $\alpha=0.05$), para cada una de las variables evaluadas. En el Cuadro A4 del Apéndice, se presenta el programa del SAS empleado para el el análisis estadístico del Diseño San Cristóbal.

El análisis de varianza se realizó considerando el diseño completamente al azar empleado, mientras que la regresión se realizó considerando el modelo propuesto para la matriz San Cristóbal y que es el siguiente:

$$Y = b_0 + b_1n + b_2p + b_3k + b_4n^2 + b_5p^2 + b_6k^2 + b_7np + b_8nk + b_9pk$$

En dicho modelo solo se incluyen 9 de los 11 grados de libertad del análisis de varianza, por lo que en el Cuadro A5 del Apéndice se desglosan los 11 grados de libertad de los tratamientos en 9 del análisis de regresión y 2 del residual. El valor del residual permite determinar la validez del modelo obtenido, de tal manera que si el valor es estadísticamente significativo ($\alpha = 0.05$), el modelo no explica la respuesta obtenida. Los resultados del análisis de regresión también proporcionaron las funciones de respuesta de cada una de las variables evaluadas a los factores estudiados, así como su significancia estadística.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de las dos fases de investigación. Para abreviar la descripción de los tratamientos, se utilizará la notación que se indica a continuación: **5 (6, 0.5, 8)** en donde **5** es el número de tratamiento, y **(6, 0.5, 8)** son los niveles de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , respectivamente, en me L^{-1} .

Para el primer experimento se analizan y discuten los resultados de las variables morfométricas del crecimiento: altura (ALT, cm), diámetro del tallo (DT, mm), número de hojas (NH, unidades), área foliar (AF, cm^2), y lecturas SPAD (SPAD, valores SPAD); y de la producción de materia seca de la raíz (MSr), tallo (MSt), hoja (MSh) y total (MST) todas ellas en mg planta^{-1} ; así como la relación MS de la parte aérea y de la raíz (MSa/MSr). Finalmente, se reporta la concentración foliar de nitrógeno, fósforo y potasio, y se calcula la eficiencia de absorción nutrimental de la raíz.

Para el segundo experimento, se presenta la descripción de la fenología del cultivo en función de los grados día de desarrollo (GDD). Posteriormente, se presentan los resultados del análisis del crecimiento en función de las variables morfométricas evaluadas para describir este fenómeno: altura de la planta (ALT, cm), diámetro del tallo (DT, mm), número de hojas (NH, unidades), número de ramas (NR, unidades), número de flores (NF, unidades) número de frutos (NFR, unidades), área foliar (AF, cm^2), y lecturas SPAD (SPAD, valores SPAD); y en función de su producción final de materia seca: materia seca de la hoja (MSh), tallo (MSt), raíz (MSr), fruto (MSf), de toda la planta (MST), y parte aérea (MSa), todas ellas en g planta^{-1} ; así como la relación aérea/raíz (MSa/MSr) y la relación tallo/raíz (MSt/MSr).

Posteriormente, se presentan los resultados de la concentración (porcentaje) y la acumulación (mg g^{-1}) de nitrógeno, fósforo y potasio en las hojas de las plantas de chile poblano. Al final de este apartado, se presentan los resultados del rendimiento de fruto (g planta^{-1}), la calidad del fruto (porcentaje de las clases) y el contenido de capsaicina del fruto (mg L^{-1}).

Las variables mencionadas, excepto las correspondientes al rendimiento y la calidad del fruto, se analizaron en función de los resultados obtenidos en seis etapas fenológicas del cultivo, las cuales fueron: crecimiento vegetativo (CV), floración y fructificación (FF), y los cuatro cortes de fruto realizado (C1, C2, C3 y C4).

5.1. Experimento uno: Producción de plántulas de chile poblano

5.1.1. Altura de la planta, diámetro del tallo y número de hojas

El análisis de varianza no reportó respuesta estadística significativa para las variables altura de la planta, diámetro del tallo y número de hojas. En todas las combinaciones de tratamientos se obtuvieron plántulas de buena calidad en altura, diámetro de tallo y número de hojas, incluso con el nivel bajo de los nutrimentos evaluados. La buena respuesta a niveles bajos de NO_3^- y H_2PO_4^- también se ha observado en la altura de plántulas de lechuga. La respuesta en crecimiento de las plántulas de chile poblano, de este estudio, a la dosis de 0.5 me L^{-1} de H_2PO_4^- (16 mg L^{-1}) fue similar al crecimiento de las plántulas de lechuga obtenido entre 0 y 15 mg L^{-1} de fósforo por Soundy *et al.* (2001a). La falta de nitrógeno y potasio en las soluciones nutritivas produjo reducción de la altura de las plántulas (Huang *et al.*, 2002).

5.1.2. Área foliar y lecturas SPAD

Los resultados del análisis estadístico tampoco reportaron efecto significativo sobre el área foliar (AF) de las plántulas de chile. Se tienen reportes de que en plántulas de lechuga, el nitrógeno no afectó el AF y la respuesta fue mayor con 100 que con 60 mg L^{-1} de nitrógeno; pero al aumentar el nivel de fósforo el AF se incrementó (Soundy *et al.*, 2001a). No obstante, los efectos de la nutrición sobre el AF no se han estudiado en mayor detalle (Jong y van Iersel, 2004).

La variable lecturas SPAD fue la única que presentó respuesta significativa a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva. La prueba de comparación de medias (Cuadro 8) mostró que el valor de las lecturas SPAD

disminuyó significativamente ($\alpha \leq 0.01$) al aumentar los niveles de NO_3^- . Por lo general, el suministro de nitrógeno aumenta la concentración de clorofila y de nitrógeno en las hojas de las plantas. Aunque con las lecturas SPAD se puede inferir la concentración de clorofila y la condición de nitrógeno en la planta, no se predice con exactitud el porcentaje de nitrógeno (Chang y Robison, 2003). En este estudio, la concentración de nitrógeno en la hoja fue inversa al valor de las lecturas SPAD, lo cual puede explicarse debido a que el índice de verdor a altos niveles de nitrógeno no aumenta sino que se hace constante, mientras que la concentración de nitrógeno en la hoja puede seguir creciendo con el suministro de nitrógeno. En consecuencia, este método puede considerarse inadecuado para medir el consumo de lujo de nitrógeno por la planta (Piekielek *et al.*, 1995) especialmente en la etapa de plántula.

5.1.3. Producción de materia seca

El análisis de varianza indicó que solo se encontraron diferencias significativas del efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ sobre la producción de MS de la raíz, la cual se redujo significativamente ($\alpha \leq 0.05$) al incrementar la dosis de NO_3^- en la solución nutritiva lo que se reflejó como un incremento en la relación de producción de MSa/MSr al aumentar las dosis de NO_3^- (Cuadro 8). Esta respuesta se atribuyó a un efecto de salinidad pues, de acuerdo con Villa *et al.* (2003), la adición de nitrógeno propicia el incremento de la salinidad del medio, y dicha salinidad puede producir la reducción del crecimiento de la raíz (Bartal *et al.*, 2001a).

Aloni *et al.* (1991) también reportaron que la producción de MSr de plántulas de chile fue inversa al suministro de nitrógeno, ya que el peso seco de la raíz fue más bajo a 200 que a 30 mg L^{-1} de nitrógeno. En plántulas de lechuga, el nivel de 100 mg L^{-1} de nitrógeno redujo el crecimiento de la raíz comparado con 60 mg L^{-1} , y el mayor incremento en la MS total en respuesta al fósforo aplicado ocurrió entre 0 y 15 mg L^{-1} (Soundy *et al.*, 2001a) lo cual corresponde al primer nivel de fósforo (16 mg L^{-1}) del presente trabajo.

Cuadro 8. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre las lecturas SPAD y la producción de materia seca de plántulas de chile poblano.

| Concentración (me L ⁻¹) | Lecturas SPAD | Producción de materia seca (mg planta ⁻¹) | | |
|--|------------------|---|------------|--------|
| | | Raíz | Aérea/raíz | |
| NO_3^- | 6 | 41.7 a [†] | 25.9 a | 5.11 b |
| | 9 | 40.4 b | 24.8 a | 5.71 b |
| | 12 | 39.3 b | 20.0 b | 6.67 a |
| H_2PO_4^- | 0.5 | 40.2 a | 22.7 a | 5.85 a |
| | 1.0 | 40.8 a | 24.3 a | 5.82 a |
| K^+ | 5 | 40.3 a | 22.7 a | 5.94 a |
| | 7 | 40.7 a | 24.4 a | 5.71 a |

[†] Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($\alpha \leq 0.05$).

El comportamiento del crecimiento y la producción de MS al incrementar la dosis de K^+ en la solución nutritiva fueron similares a los observados por Khosla y Papadopoulos (2001), pues las plántulas de chile requieren alta concentración de potasio en la solución nutritiva para su crecimiento óptimo. La aplicación de fósforo no afectó la raíz y el tallo de plántulas de tomate (Melton y Dufault, 1991) y de apio (Tremblay *et al.*, 1987).

En plantas de lechuga de 28 días la longitud de la raíz y el área se incrementaron al aumentar el fósforo aplicado y la mayor respuesta de crecimiento ocurrió entre 0 y 15 mg L⁻¹ de fósforo (Soundy *et al.*, 2001a), por lo que el resultado de este experimento tuvo un comportamiento similar. La falta de fósforo en las soluciones nutritivas propician la reducción del peso seco del tallo de las plántulas (Huang *et al.*, 2002).

Las plantas pueden crecer bien a niveles de fósforo bajos (10 μM), equivalentes a la concentración de fósforo encontrada en suelos fértiles. Tales plantas usualmente tienen una relación raíz/tallo más alta que las que se cultivan con altos niveles de fósforo (Borch *et al.*, 2003). Se puede producir plántulas de chile con concentraciones nutritivas bajas si los nutrimentos se suministran continuamente (Maruo *et al.*, 2004).

5.1.4. Concentración nutrimental y eficiencia de absorción nutrimental

La respuesta a la aplicación de los nutrimentos evaluados sobre la concentración de nitrógeno, fósforo, y potasio en las hojas fue variable y solo tuvieron efectos significativos las concentraciones de NO_3^- y K^+ en la solución nutritiva. La concentración de dichos nutrimentos, en todos los casos, estuvo dentro de los intervalos de suficiencia reportados por Mills y Jones (1996).

El incremento de la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva no tuvo efecto estadístico significativo sobre la concentración de los nutrimentos analizados, aunque en todos los casos favoreció su concentración (Cuadro 9). Soundy *et al.* (2001a y 2001b) reportaron que las plantas de lechuga cultivadas con 100 mg L^{-1} de nitrógeno tuvieron más nitrógeno en las hojas que las cultivadas con 60 mg L^{-1} . En plantas de chile, la concentración de nitrógeno en la hoja aumentó al incrementar su nivel en la solución (Bar-Tal *et al.*, 2001a). Según Xu *et al.* (2002), altos niveles de nitrógeno favorecen la absorción de potasio, ya que el metabolismo del nitrógeno en las plantas requiere una concentración adecuada de potasio en el citoplasma. El incremento del nivel de fósforo en la solución nutritiva aumentó la concentración de todos los nutrimentos en la hoja, aunque dicho incremento sólo fue significativo para el potasio.

Cuadro 9. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la concentración de nutrimentos en hojas de plántulas de chile poblano.

| Concentración (me L^{-1}). | | Concentración del nutrimento (g kg^{-1}) | | |
|---------------------------------------|-----|---|---------|---------|
| | | Nitrógeno | Fósforo | Potasio |
| NO_3^- | 6 | 47.5 a [†] | 7.39 a | 42.9 a |
| | 9 | 49.2 a | 7.55 a | 41.2 a |
| | 12 | 50.1 a | 7.59 a | 43.7 a |
| H_2PO_4^- | 0.5 | 48.6 a | 7.53 a | 41.5 b |
| | 1.0 | 49.3 a | 7.48 a | 43.8 a |
| K^+ | 5 | 46.2 b | 7.34 a | 41.4 b |
| | 7 | 51.7 a | 7.68 a | 43.8 a |

[†] Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($\alpha \leq 0.05$).

El incremento de la concentración de K^+ en la solución nutritiva, propició el aumento significativo ($\alpha \leq 0.05$) de la concentración de nitrógeno y potasio en las hojas, en tanto que la concentración de fósforo fue similar con ambas dosis (Cuadro 9). Se han reportado incrementos de nitrógeno, fósforo y potasio en el tejido foliar al aumentar el nivel de potasio en la solución nutritiva en plantas de tomate (Khosla y Papadopoulos, 2001; Bugarín *et al.*, 2002), papa (Marschner, 1995), salvia (Jong y van Iersel, 2004) y lechuga (Soundy *et al.*, 2001b), debido a que este nutrimento regula el movimiento de agua en la planta y ello favorece la absorción de los nutrimentos (Marschner, 1995).

El análisis de varianza para la estimación de la eficiencia de absorción nutrimental, mostró que a pesar de que al aumentar la concentración de NO_3^- , $H_2PO_4^-$ y K^+ en la solución nutritiva se redujo la producción de MSr (Cuadro 8), la eficiencia de absorción de la raíz se incrementó pues la acumulación de nutrimentos en la planta aumentó significativamente ($\alpha \leq 0.01$) para nitrógeno y potasio (Cuadro 10).

Cuadro 10. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , $H_2PO_4^-$ y K^+ sobre la eficiencia de absorción de la raíz de plántulas de chile poblano.

| Concentración (me L ⁻¹). | | Eficiencia de absorción (mg mg ⁻¹ de raíz) | | |
|--------------------------------------|-----|---|---------|---------|
| | | N | P | K |
| NO_3^- | 6 | 0.295 b [†] | 0.045 b | 0.267 b |
| | 9 | 0.317 b | 0.048 b | 0.265 b |
| | 12 | 0.392 a | 0.059 a | 0.341 a |
| $H_2PO_4^-$ | 0.5 | 0.327 a | 0.051 a | 0.280 a |
| | 1.0 | 0.342 a | 0.052 a | 0.303 a |
| K^+ | 5 | 0.292 b | 0.046 b | 0.262 b |
| | 7 | 0.379 a | 0.056 a | 0.321 a |

[†] Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($\alpha \leq 0.05$).

Normalmente, la aplicación de NO_3^- incrementa el crecimiento de la raíz, pero en este caso se redujo la MSr (Cuadro 8). El incremento de la eficiencia de absorción se debió al fácil acceso a todos los nutrimentos de la solución nutritiva, por lo que la reducción de la MSr no influyó sobre el crecimiento de las plántulas. Marschner (1995), señala que al aumentar el suministro de nitrógeno, la MSt se incrementa con mayor rapidez que la MSr, y que un sistema radical pequeño es suficiente para abastecer bien una parte aérea grande con nutrimentos y agua. Xu *et al.* (2001a)

reportaron que las plantas de chile dulce con restricción de raíces fueron más eficientes en la utilización del agua y los nutrimentos mediante el incremento de la permeabilidad radical, de tal manera que esto no afectó la absorción de nutrimentos.

La aplicación de nitrógeno, fósforo, potasio y azufre fue necesaria como fertilización de pretransplante para el máximo potencial de crecimiento. Sin embargo, en la producción comercial de transplantes, por lo general se prefieren plántulas compactas y no con el crecimiento máximo. Así, el potasio y el azufre pueden omitirse ya que su contribución al crecimiento sólo fue ocasional y pequeña (Huang *et al.*, 2002), por lo que es necesario definir el objetivo de la producción de plantas para poder decidir el tratamiento de nutrición que se debe aplicar durante el crecimiento de las plántulas.

Los numerosos reportes de los efectos significativos del régimen de nitrógeno en las plántulas de tomate producidas en invernaderos, sobre su productividad en el campo, no fueron soportados en el estudio de Hartz *et al.* (2002), en el cual no se observaron efectos relacionados con el nitrógeno. Este estudio mostró que los productores de plántulas de tomate tuvieron flexibilidad en el manejo del transplante, ya que prácticas de transplante ampliamente dispares dentro del intervalo estudiado tuvieron poco o nulo impacto diferencial práctico sobre el desarrollo posterior en el campo

5.2. Experimento dos: Fenología, crecimiento y producción de fruto

5.2.1. Determinación de las etapas fenológicas del cultivo

Las etapas fenológicas del cultivo se determinaron con base en las observaciones realizadas durante el ciclo de cultivo. Para el valor cuantitativo de las etapas fenológicas se llevó el registro de las temperaturas máximas y mínimas diarias, con las que se realizó el cálculo de las unidades térmicas también conocidas como grados-día de desarrollo (GDD), para lo cual se requiere de un cero biológico (temperatura base) que para el cultivo de chile es de 10°C (Maroto, 2002) y se calcularon con base en el método residual para la determinación de las constantes térmicas (Ortiz-Solorio, 1987), el cual emplea la siguiente expresión:

$$\text{GDD} = \sum [(T_{\text{mín}} + T_{\text{máx}})/2] - T_b$$

Donde:

GDD = Grados-día de desarrollo, °C

$T_{\text{mín}}$ = Temperatura mínima diaria, °C. Cuando $T_{\text{mín}} < 10^{\circ}\text{C}$, entonces $T_{\text{mín}} = 10$

$T_{\text{máx}}$ = Temperatura máxima diaria, °C

T_b = Temperatura base a partir de la cual se desarrolla el cultivo de chile (10°C)

5.2.1.1. Etapas fenológicas y acumulación de grados-día de desarrollo

La siembra se realizó el 20 de febrero, fecha a partir de la cual se realizaron las observaciones de las etapas fenológicas del cultivo para relacionarlas posteriormente con la temperatura. Las etapas fenológicas fueron: la siembra (S), definida como la fecha de colocación de las semillas en el sustrato húmedo; emergencia (E), cuando más del 50 de las semillas sembradas habían aparecido por encima del sustrato y tenían abierto los cotiledones. El transplante (T) fue la fecha de cambio de las plántulas del almácigo a las bolsas con tezontle para iniciar el experimento. El desarrollo vegetativo (DV), para fines de la fenología, se consideró como la etapa que inició a partir del transplante y finalizó al inicio de la floración, aunque en las plantas de chile el crecimiento es continuo hasta el final del ciclo vegetativo.

El inicio de la floración (F) fue cuando más del 50% de las plantas presentaron al menos una flor abierta; y, el inicio de fructificación (IF) fue cuando más del 50% de las plantas presentaron al menos un fruto formado. Finalmente, el corte (C1, C2, C3 y C4) fue el momento en que se cosecharon los frutos con madurez fisiológica. Todas las etapas fenológicas se relacionaron con la fecha de siembra y se indican como días después de la siembra y las que ocurrieron después del transplante también se indican en función de este momento como días después del transplante (Cuadro 11).

También se observa que las plántulas de chile poblano tardaron 9 días en emerger y requirieron de 117 GDD para alcanzar esta etapa. Después de la emergencia, su crecimiento en el almácigo requirió de 70 días y 1,154.5 GDD. El desarrollo vegetativo requirió de 36 días y la acumulación de 462.3 GDD después del transplante (ddt). La

floración se presentó a los 37 ddt y para ello se acumularon 475.8 GDD a partir del transplante. El inicio de fructificación se presentó cuatro días después de la floración (41 ddt) y hasta esta etapa se acumularon 530.8 GDD a partir del transplante. El primer corte de frutos (C1) se realizó 90 ddt y durante ese periodo se acumularon 1,123 GDD.; el segundo corte se hizo a los 126 ddt y requirió de 1,614.4 GDD; el tercer corte se realizó a los 144 ddt y para ese momento se habían acumulado 1,854.4 GDD; finalmente, a los 162 ddt se realizó el cuarto y último corte y para esa fecha se habían acumulado 2,077.6 GDD después del transplante.

Cuadro 11. Duración de las etapas fenológicas y acumulación de grados día de desarrollo (GDD), de plantas de chile poblano.

| Etapa fenológica | Días después de la siembra | Días después del transplante | GDD acumulados |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------|
| Siembra (20 de febrero) | 0 | | 0 |
| Emergencia | 9 | | 117.0 |
| Transplante (10 de mayo) | 79 | 0 | 1,154.5 |
| Desarrollo vegetativo | 115 | 0 – 36 | 1,616.8 |
| Inicio de la floración | 116 | 37 | 1,630.3 |
| Inicio de la fructificación | 120 | 41 | 1,685.3 |
| Primer corte | 169 | 90 | 2,277.5 |
| Segundo corte | 205 | 126 | 2,768.9 |
| Tercer corte | 223 | 144 | 3,008.9 |
| Cuarto corte | 241 | 162 | 3,232.1 |

La duración del ciclo del cultivo fue de 241 días y en total acumuló 3,232.1 GDD. Las plantas estuvieron 79 días en el almácigo, tiempo durante el cual acumularon 1,154.5 GDD. Después del transplante, se cultivaron durante 162 días y en este periodo se realizó una acumulación de 2,077.6 GDD (Cuadro 12).

El ciclo de cultivo fue mucho mayor que las reportadas para los cultivares a campo abierto, debido principalmente a las condiciones de bajas temperaturas bajo las cuales se dio el cultivo a pesar de encontrarse en invernadero. Una gran cantidad de las temperaturas mínimas se situaron por debajo de la temperatura base considerada (10°C) lo cual provocó el alargamiento del ciclo de cultivo. Además, a pesar de los reportes del valor de la temperatura base, se pudo observar que el crecimiento se afectó en gran medida cuando las temperaturas mínimas fueron menores a 15°C, lo cual podría explicar con mayor claridad el ciclo de cultivo tan largo que se obtuvo.

Cuadro 12. Descripción de las etapas fenológicas de las plantas de chile poblano, por días y grados día de desarrollo.

| | S | E | T | DV | F | IF | C1 | C2 | C3 | C4 |
|----|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S | | 117.0 | 1154.5 | 1616.8 | 1630.3 | 1685.3 | 2277.5 | 2768.9 | 3008.9 | 3232.1 |
| E | 9 | | 1037.5 | 1499.8 | 1513.3 | 1568.3 | 2160.5 | 2651.9 | 2891.9 | 3115.1 |
| T | 79 | 70 | | 462.3 | 475.8 | 530.8 | 1123.0 | 1614.4 | 1854.4 | 2077.6 |
| DV | 115 | 106 | 36 | | 13.5 | 68.5 | 660.7 | 1152.1 | 1392.1 | 1615.3 |
| F | 116 | 107 | 37 | 1 | | 55.0 | 647.2 | 1138.6 | 1378.6 | 1601.8 |
| IF | 120 | 111 | 41 | 5 | 4 | | 592.2 | 1083.6 | 1323.6 | 1546.8 |
| C1 | 169 | 160 | 90 | 54 | 53 | 49 | | 491.4 | 731.4 | 954.6 |
| C2 | 205 | 196 | 126 | 90 | 89 | 85 | 36 | | 240.0 | 463.2 |
| C3 | 223 | 214 | 144 | 108 | 107 | 103 | 54 | 18 | | 223.2 |
| C4 | 241 | 232 | 162 | 126 | 125 | 121 | 72 | 36 | 18 | |

S = Siembra. E = Emergencia. T = Transplante. DV = Desarrollo vegetativo.
 F = Inicio de floración. IF = Inicio de fructificación. C1 = Primer corte. C2 = Segundo corte.
 C3 = Tercer corte. C4 = Cuarto corte.

La aplicación de los tratamientos no modificó el momento de inicio, ni la duración de cada una de las etapas fenológicas, pues estas estuvieron regidas por las condiciones de temperatura prevalecientes a lo largo del ciclo de cultivo. Sin embargo, la información obtenida será de gran utilidad en el manejo de las plantaciones comerciales de chile poblano, sin importar su ubicación geográfica, permitiendo programar diversas prácticas culturales, como en el caso específico del control de ciertas plagas, o bien la contratación de mano de obra para la realización de las labores.

5.2.2. Análisis del crecimiento en función de las variables morfométricas

5.2.2.1. Crecimiento promedio y tasa de crecimiento absoluto

En el Cuadro 13, se reportan los valores medios de las variables de crecimiento y se observa el comportamiento del cultivo durante su ciclo vegetativo y en cada fecha de muestreo. En el Cuadro 14 se tienen las tasas de crecimiento absoluto de las mismas variables, las cuales indican su incremento diario. Cabe señalar que el crecimiento de las plantas aún no llegaba a su final cuando se realizó la última evaluación, por lo que los datos reportados están por debajo de los que se pudieron obtener al final del ciclo, debido al crecimiento semiperenne del cultivo de chile.

La altura media al transplante fue de 12 cm. El crecimiento inicial fue lento, pues a los 18 ddt las plantas sólo alcanzaron una altura media de 17 cm (0.20 cm día^{-1}), debido al efecto del transplante. El crecimiento fue rápido entre los 36 ddt, cuando las plantas alcanzaron 34 cm de altura (0.98 cm día^{-1}) y los 54 ddt cuando la altura media fue de 57 cm (1.25 cm día^{-1}). La tasa de crecimiento absoluto se redujo entre los 72, 90 y 108 ddt (0.48 , 0.35 y 0.28 cm día^{-1} , respectivamente); se incrementó de manera importante a los 126 ddt (0.64 cm día^{-1}), tuvo una reducción a los 144 ddt (0.40 cm día^{-1}) y de nuevo se incrementó a los 162 ddt (0.75 cm día^{-1}). Este comportamiento estuvo determinado por las etapas fenológicas que se presentan al mismo tiempo en la planta de chile (crecimiento, floración, fructificación y llenado de fruto).

El diámetro del tallo al momento del transplante fue de 1.7 mm y se incrementó con la edad de la planta, presentando variaciones graduales en cada uno de los muestreos. El incremento entre muestreos siempre varió entre 1.1 y 1.6 mm y sólo se aprecian dos variaciones más altas: la primera entre los 36 y 54 ddt (1.95 mm), y la segunda entre los 90 y los 108 ddt (2.14 mm). El comportamiento de la tasa de crecimiento absoluto fue similar al de la altura, sobre todo entre el transplante y los 72 ddt.

El número de hojas de la planta aumentó lentamente entre el transplante y los 36 ddt; entre los 36 y los 108 ddt el incremento fue de 41 hojas en promedio ($2.13 \text{ hojas día}^{-1}$) y posteriormente el incremento fue mucho mayor, siendo más notorio a los 126 ddt con 134 hojas ($7.45 \text{ hojas día}^{-1}$) y a los 144 ddt con 150 hojas ddt ($8.33 \text{ hojas día}^{-1}$), y una reducción a los 162 ddt a 88 hojas ($4.88 \text{ hojas día}^{-1}$).

Cuadro 13. Valor promedio de las variables de crecimiento evaluadas en plantas de chile poblano de diferente edad.

| Variable morfométrica | Edad de las plantas (días después del transplante) | | | | | | | | |
|-------------------------------|--|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 18 | 36 | 54 | 72 | 90 | 108 | 126 | 144 | 162 |
| Altura (cm) | 17.0 | 34.7 | 57.3 | 66.0 | 72.4 | 77.4 | 89.0 | 96.3 | 109.8 |
| Diám. tallo (mm) | 2.4 | 3.9 | 5.9 | 7.1 | 8.7 | 9.9 | 11.0 | 12.3 | 13.3 |
| No. hojas | 13.5 | 24.4 | 73.1 | 113.5 | 149.9 | 191.3 | 325.5 | 475.4 | 563.2 |
| No. ramas | | 4.9 | 24.7 | 46.4 | 59.2 | 70.8 | 101.2 | 128.0 | 135.8 |
| No. flores | | 0.4 | 3.1 | 3.0 | 1.5 | 1.5 | 5.3 | 9.9 | 10.9 |
| No. frutos | | | 3.7 | 20.3 | 30.2 | 6.6 | 7.5 | 28.1 | 61.5 |
| Área foliar (cm^2) | 39 | 154 | 343 | 660 | 854 | 1124 | 1685 | 2384 | 3140 |
| Lecturas SPAD | 54.7 | 51.7 | 54.6 | 64.0 | 74.2 | 76.6 | 79.7 | 76.8 | 72.9 |

La ramificación de las plantas de chile poblano inició cuando tenían en promedio 14 hojas (21 ddt), y se dio por etapas: sólo se emitieron 5 ramas hasta los 36 ddt (0.33 ramas día⁻¹), 20 ramas cada 18 días (1.15 ramas día⁻¹) desde los 36 y hasta los 72 ddt; 12 ramas cada 18 días (0.68 ramas día⁻¹) entre los 90 y 108 ddt; 29 ramas cada 18 días (1.61 ramas día⁻¹) entre los 126 y 144 ddt; y, 8 ramas (0.43 ramas día⁻¹) durante los últimos 18 días del cultivo.

Cuadro 14. Tasa de crecimiento absoluto[†] de las variables evaluadas en plantas de chile poblano de diferente edad.

| Variable morfológica | Edad de las plantas (días después del transplante) | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 18 | 36 | 54 | 72 | 90 | 108 | 126 | 144 | 162 |
| Altura (cm) | 0.28 | 0.98 | 1.25 | 0.48 | 0.35 | 0.28 | 0.64 | 0.40 | 0.75 |
| Diám. tallo (mm) | 0.04 | 0.08 | 0.11 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.05 |
| No. hojas | 0.30 | 0.60 | 2.70 | 2.24 | 2.02 | 2.30 | 7.45 | 8.33 | 4.88 |
| No. ramas | | 0.33 | 1.10 | 1.20 | 0.71 | 0.64 | 1.69 | 1.49 | 0.43 |
| No. flores | | 0.02 | 0.15 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.21 | 0.25 | 0.05 |
| No. frutos | | | 0.20 | 0.92 | 0.55 | 0.00 | 0.05 | 1.14 | 1.85 |
| Área foliar (cm ²) | 1.1 | 6.4 | 10.5 | 17.6 | 10.8 | 15.0 | 31.2 | 38.8 | 42.0 |
| Lecturas SPAD | 0.32 | -0.17 | 0.16 | 0.52 | 0.57 | 0.13 | 0.17 | -0.16 | -0.22 |

[†] Los valores de las tasas de crecimiento absoluto se reportan en incremento diario (día⁻¹).

El número de flores y frutos no muestran tendencia clara. Esto se debió al método e intervalo de muestreo, ya que la vida promedio de la flor (4 a 5 días) no permitió registrar el número total pues muchas ya eran frutos al momento del muestreo o bien se habían perdido por diversas causas; en cuanto a los frutos, la últimas evaluaciones del número de frutos se dio en plantas a las que ya se le había cosechado frutos.

El área foliar al momento del transplante fue de 18.9 cm². Los datos mostraron una tendencia clara de incremento en función del tiempo. Entre el transplante y los 18 ddt, la generación de área foliar apenas fue de 20.1 cm² (1.1 cm² día⁻¹); sin embargo, a los 36 y 72 ddt el área foliar casi se duplicó en cada intervalo de 18 días; entre los 72 y 90 ddt se incrementó en casi 200 cm² (10.8 cm² día⁻¹); entre los 90 y los 108 ddt el aumento fue de 270 cm² (15 cm² día⁻¹) y se duplicó (561 cm²) a los 126 ddt (31.2 cm² día⁻¹); a los 144 ddt el valor se incrementó en 700 cm² (38.8 cm² día⁻¹) y a los 162 se tuvo el incremento máximo de 756 cm² (42.0 cm² día⁻¹).

En cuanto a los datos de las lecturas SPAD, los valores más bajos se presentaron entre los 18 y los 54 ddt, periodo durante el cual se pueden considerar uniformes; entre los 72 y los 126 ddt se observó un notable incremento, alcanzando a los 126 ddt un valor máximo cercano a los 80; y, finalmente se tuvo un ligero descenso a los 144 y 162 ddt (Cuadro 15). Es importante resaltar que los valores de esta variable fueron muy altos y se ubicaron por encima del promedio registrado para otros cultivos.

5.2.2.2. Análisis estadístico de las variables morfométricas

En los Cuadros 15 a 21 se presentan los resultados de la comparación de medias de tratamiento de las variables que explican el crecimiento de las plantas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ . Se observó que al final del ciclo de cultivo sólo se obtuvieron respuestas estadísticas significativas para las variables área foliar y lecturas SPAD, por lo que sólo en ellas se realizó el ajuste de los modelos estadísticos que explican dichas respuestas.

5.2.2.2.1. Altura de la planta

La altura máxima (124.0 cm) se obtuvo en las plantas del tratamiento 10 (12, 1, 7) y la mínima (94.3 cm) en las del tratamiento 3 (6, 1.5, 6) y en la última fecha de evaluación (162 ddt). A pesar de la diferencia de altura (29.7 cm), no se tuvieron diferencias significativas para esta variable al final del experimento. Cabe señalar que la altura alcanzada por las plantas en todos los tratamientos superó por mucho la reportada para el híbrido Caballero de 80 cm en condiciones de cultivo a cielo abierto (Sakata, 2004).

En el Cuadro 15 se puede observar que los tratamientos aplicados provocaron respuestas estadísticamente diferentes durante las etapas de crecimiento vegetativo y floración-fructificación, y que, una vez que las plantas iniciaron la producción de fruto, la altura de la planta no respondió significativamente a la aplicación de los tratamientos con diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , lo cual se debe a que en esas etapas fenológicas los nutrimentos son utilizados principalmente para el

crecimiento del fruto, debido a que el rápido desarrollo de los frutos requiere de un suministro intensivo de fotosintatos (Xu *et al.*, 2001a). Es notorio también que las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7) fueron las que alcanzaron la mayor altura durante todo el ciclo del cultivo, y que las plantas con menor altura fueron las de los tratamientos cuyas soluciones nutritivas contenían 6 me L⁻¹ de NO₃⁻, comportamiento similar al reportado para tomate, cultivo en el que el incremento de la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva propició el incremento de la altura, mientras que el aumento de la relación potasio:nitrógeno redujo la altura de la planta (Khosla y Papadopoulos, 2001). Las plantas de chile dulce también incrementaron su altura al aumentar las dosis de nitrógeno de 70 a 210 kg ha⁻¹ (Kirnak *et al.*, 2003).

Cuadro 15. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺, sobre la altura de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Altura de la planta (cm), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|----------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 32.3 e [†] | 51.6 bc | 70.7 a | 82.3 a | 92.0 a | 100.7 a |
| 2 | 36.3 abcd | 59.8 abc | 67.2 a | 90.7 a | 97.7 a | 99.7 a |
| 3 | 31.9 de | 54.2 bc | 62.3 a | 79.7 a | 90.0 a | 94.3 a |
| 4 | 37.2 abc | 59.7 abc | 73.2 a | 90.3 a | 92.3 a | 110.0 a |
| 5 | 32.8 bcde | 54.2 bc | 66.5 a | 78.7 a | 87.0 a | 114.7 a |
| 6 | 37.2 abc | 61.5 ab | 81.8 a | 92.7 a | 95.3 a | 112.7 a |
| 7 | 31.4 de | 50.6 c | 73.2 a | 89.8 a | 88.0 a | 104.0 a |
| 8 | 37.4 ab | 61.7 ab | 73.0 a | 99.0 a | 103.0 a | 120.7 a |
| 9 | 35.1 bcde | 59.2 abc | 74.5 a | 92.7 a | 107.0 a | 111.0 a |
| 10 | 40.2 a | 65.1 a | 80.0 a | 102.0 a | 109.3 a | 124.0 a |
| 11 | 34.1 bcde | 55.5 abc | 72.8 a | 93.3 a | 106.3 a | 121.0 a |
| 12 | 32.3 cde | 54.9 abc | 73.8 a | 77.3 a | 87.3 a | 105.3 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

5.2.2.2.2. Diámetro del tallo

Al finalizar el experimento, el diámetro máximo del tallo (14.5 mm) se obtuvo en las plantas del tratamiento 12 (8, 1.0, 9), en tanto que el valor mínimo (12.1 mm) correspondió a las plantas del tratamiento 5 (6, 0.5, 8). Al realizar el análisis estadístico se obtuvieron diferencias significativas ($\alpha=0.0171$) en el análisis de varianza y altamente significativas ($\alpha=0.0069$) en el análisis de regresión, a los factores evaluados; sin embargo, al realizar la comparación de medias, no se

obtuvieron diferencias entre las mismas (Cuadro 16) debido probablemente a que el método empleado (Tukey, 0.05) es muy estricto y la diferencia mínima significativa fue de 2.57, en tanto que la máxima diferencia entre las medias de tratamiento fue de 2.47, de tal manera que se pueden considerar diferentes al menos los tratamientos con los valores máximo y mínimo. También puede deberse al bajo coeficiente de determinación obtenido ($r^2 = 0.56$). La función de respuesta de esta variable a los factores evaluados no se calculó debido a la falta de diferencia significativa entre las medias de tratamiento y el bajo coeficiente de determinación.

Los resultados de la comparación de medias de tratamiento (Cuadro 16) para cada etapa fenológica, indican que los tratamientos provocaron efectos significativos en las etapas de crecimiento vegetativo, floración-fructificación, corte 2 y corte 3, por lo que se infiere que el grosor del tallo depende de la concentración de nutrimentos en la solución nutritiva y que es necesario considerar este requerimiento durante la etapa de fructificación para evitar deficiencias que afecten a esta variable y que puedan reflejarse en el rendimiento del fruto. El incremento continuo del diámetro del tallo se debe a que la planta necesita incrementar su vigor y resistencia para soportar el peso de los frutos en crecimiento y que este proceso no represente una limitante para la producción. Las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7), al igual que en el caso de la altura, fueron las que mostraron el mayor diámetro del tallo durante todo el ciclo del cultivo, y también se apreció la tendencia de menor grosor del tallo cuando las soluciones nutritivas tuvieron 6 me L^{-1} de NO_3^- .

Los resultados indican que para el cultivo de chile poblano, la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva tuvo efecto sobre el diámetro del tallo, uno de los indicadores de vigor de la planta y de gran importancia en el mantenimiento de los frutos producidos, lo que coincide con los resultados de Kirnak *et al.* (2003) quienes encontraron que al aumentar la aplicación de nitrógeno de 70 a 210 kg ha^{-1} se incrementó el diámetro del tallo de plantas de chile dulce, pero contrasta con los resultados obtenidos por Zúñiga (2003) para chile jalapeño, en los cuales el diámetro del tallo se modificó por efecto del fósforo y el potasio aplicados y fue ocasionado principalmente por el efecto de los tratamientos, sobresaliendo las plantas que

recibieron fertilización de base de 00-600-500 ppm de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente. En tomate, también se reportó que el aumento de la relación potasio:nitrógeno (menor concentración de nitrógeno) redujo el diámetro del tallo (Khosla y Papadopoulos, 2001).

Cuadro 16. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el diámetro del tallo de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Diámetro del tallo (mm), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 3.6 d [†] | 5.3 c | 7.7 a | 10.6 ab | 11.9 ab | 12.7 a |
| 2 | 4.0 abc | 5.9 abc | 8.4 a | 11.4 ab | 12.1 ab | 13.8 a |
| 3 | 3.8 bcd | 5.4 c | 8.7 a | 10.8 ab | 11.2 b | 13.0 a |
| 4 | 4.1 ab | 6.1 abc | 8.9 a | 11.2 ab | 12.1 ab | 14.1 a |
| 5 | 3.8 bcd | 5.6 bc | 8.5 a | 10.8 ab | 11.4 b | 12.1 a |
| 6 | 4.1 ab | 6.4 ab | 8.8 a | 10.8 ab | 12.0 ab | 12.7 a |
| 7 | 3.7 cd | 5.6 bc | 8.7 a | 10.9 ab | 12.5 ab | 12.5 a |
| 8 | 4.3 a | 6.0 abc | 9.2 a | 11.8 a | 13.2 ab | 14.2 a |
| 9 | 4.0 abc | 6.0 abc | 9.3 a | 10.9 ab | 12.2 ab | 12.7 a |
| 10 | 4.3 a | 6.5 a | 9.3 a | 11.9 a | 14.3 a | 14.5 a |
| 11 | 3.9 bcd | 5.9 abc | 8.6 a | 10.3 b | 12.0 ab | 13.1 a |
| 12 | 3.9 bcd | 6.0 abc | 8.8 a | 11.2 ab | 12.5 ab | 14.5 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

5.2.2.2.3. Número de hojas

El mayor número de hojas (649) se presentó en las plantas del tratamiento 8 (10, 1.5, 8) y el menor (480 hojas) en las del tratamiento 5 (6, 0.5, 8). El análisis estadístico de la respuesta de esta variable a los factores evaluados, no reportó diferencias significativas para los datos del último muestreo (162 ddt). En las etapas de crecimiento vegetativo y floración-fructificación se tuvieron diferencias significativas del número de hojas por planta a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , mientras que a partir del inicio de la cosecha, no se detectaron efectos de los tratamientos sobre el número de hojas (Cuadro 17). Se puede observar que en ambas etapas la mejor respuesta fue para el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y la menor para el tratamiento 1 (6, 0.5, 6), y que en la etapa de cosecha, las mayores cantidades de hojas por planta fueron generadas por los tratamientos que contenían 10 me L^{-1} de NO_3^- en la solución nutritiva.

Cuadro 17. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el número de hojas de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Número de hojas por planta, por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|----------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 20.6 b [†] | 55.6 d | 137.0 a | 345.0 a | 528.0 a | 481.7 a |
| 2 | 25.6 ab | 82.0 ab | 128.3 a | 338.7 a | 585.7 a | 550.0 a |
| 3 | 23.1 ab | 59.8 cd | 158.7 a | 326.3 a | 386.7 a | 498.0 a |
| 4 | 24.9 ab | 81.5 ab | 152.3 a | 318.0 a | 460.0 a | 628.7 a |
| 5 | 22.5 ab | 61.7 bcd | 120.7 a | 304.0 a | 447.0 a | 480.0 a |
| 6 | 25.9 ab | 82.3 ab | 164.3 a | 311.3 a | 501.7 a | 550.7 a |
| 7 | 22.4 ab | 62.8 bcd | 150.0 a | 307.3 a | 404.0 a | 537.3 a |
| 8 | 26.7 a | 80.1 abc | 178.0 a | 303.3 a | 472.3 a | 648.7 a |
| 9 | 24.5 ab | 82.3 ab | 151.7 a | 373.0 a | 482.7 a | 551.0 a |
| 10 | 28.1 a | 86.2 a | 146.0 a | 345.0 a | 563.7 a | 605.0 a |
| 11 | 23.7 ab | 63.0 bcd | 151.7 a | 332.7 a | 379.3 a | 611.7 a |
| 12 | 25.2 ab | 80.2 abc | 160.3 a | 301.0 a | 484.0 a | 616.0 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

Se concluye que el número de hojas de las plantas de chile poblano está determinada por la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva y que su incremento propicia el aumento del número de hojas; lo mismo fue reportado para plantas de tomate (Khosla y Papadopoulos, 2001), y chile serrano (Mata, 2001), mientras que para plantas de chile jalapeño esta variable fue influenciada por la fertilización de base y por efecto del fósforo y la interacción de fósforo x potasio (Zúñiga, 2003). También se sabe que una deficiencia de fósforo propicia una reducción del número de hojas en plantas de chile dulce c.v. Lamuyo (Baghour *et al.*, 2001) y de lechuga a través de su efectos sobre la división celular del mesófilo y la epidermis (Broadley *et al.*, 2002).

El efecto de la nutrición del cultivo sobre la producción de hojas del transplante a la floración-fructificación es vital para la producción de frutos, dado que la producción de fotosintatos y su posterior envío hacia los frutos depende de la eficiencia fotosintética de la planta, la cual está sustentada en el mantenimiento del crecimiento vegetativo vigoroso, en el que el número de hojas es parte fundamental (Peil y Gálvez, 2005; Xu *et al.*, 2001b). También es importante considerar que el crecimiento de chiles picantes con más de $>280 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrógeno produjo exceso de follaje a expensas de la cantidad de fruto (Johnson y Decoteau, 1996). Por ello, el manejo de la concentración adecuada de nitrógeno en la solución nutritiva cobra mayor importancia.

5.2.2.2.4. Número de ramas

El máximo número de ramas emitidas por planta (164) se presentó en el tratamiento 12 (8, 1.0, 9) y el menor número de ramas emitidas (116) correspondió a las plantas del tratamiento 1 (6, 0.5, 6). En el análisis estadístico de la respuesta de esta variable a los factores evaluados no se encontraron diferencias significativas para los datos de la última evaluación (162 ddt).

El análisis estadístico de los datos, por etapa fenológica del cultivo, detectó efectos significativos a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ (Cuadro 18) sobre el número de ramas de las plantas de chile poblano en las etapas de crecimiento vegetativo (36 ddt) y floración-fructificación (54 ddt), en las cuales, la mayor producción de ramas se obtuvo en los tratamientos que contenían 10 me L^{-1} de NO_3^- en la solución nutritiva; en tanto que durante la etapa de producción de fruto el mayor número de ramas se manifestó en los tratamientos que tuvieron entre 8 y 12 me L^{-1} de NO_3^- en la solución nutritiva. Las plantas de chile tienen ramificación dicotómica y producen un brote floral en cada nudo (Zewdie y Bosland, 2000), por lo que el número de ramas esta directamente relacionada con la producción de frutos.

Cuadro 18. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el número de ramas de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Número de ramas por planta, por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|----------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 2.60 b [†] | 17.5 c | 52.3 a | 107.7 a | 166.0 a | 115.7 a |
| 2 | 5.80 ab | 28.8 a | 51.0 a | 105.0 a | 143.7 a | 133.7 a |
| 3 | 4.13 ab | 18.2 c | 56.3 a | 98.3 a | 95.0 a | 127.7 a |
| 4 | 5.00 ab | 28.3 a | 59.0 a | 102.3 a | 112.3 a | 129.3 a |
| 5 | 3.93 ab | 22.0 abc | 47.3 a | 82.0 a | 103.0 a | 119.0 a |
| 6 | 5.80 ab | 27.8 ab | 74.0 a | 112.7 a | 158.7 a | 134.7 a |
| 7 | 3.47 ab | 19.8 bc | 55.7 a | 109.3 a | 99.7 a | 128.3 a |
| 8 | 6.20 a | 29.8 a | 73.3 a | 97.3 a | 124.0 a | 158.0 a |
| 9 | 5.47 ab | 28.7 a | 61.7 a | 106.0 a | 138.0 a | 124.0 a |
| 10 | 6.20 a | 29.5 a | 58.0 a | 109.0 a | 168.3 a | 155.3 a |
| 11 | 4.40 ab | 21.7 abc | 62.7 a | 91.0 a | 104.3 a | 140.0 a |
| 12 | 5.47 ab | 24.7 abc | 59.0 a | 93.7 a | 123.3 a | 164.3 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)
 CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

La falta de efecto de los tratamientos sobre la producción de ramas de las plantas de chile poblano, a partir del inicio de la cosecha de frutos, al igual que el del número de hojas, puede ser un indicador de que la planta enfoca el suministro de nutrimentos hacia la producción de asimilados que son enviados hacia los frutos y mantiene un crecimiento vegetativo uniforme, de tal manera que la biomasa vegetativa formada durante las dos primeras etapas fenológicas determinará el volumen de producción de fruto y por ende el rendimiento total, de ahí la importancia de un suministro adecuado durante el crecimiento previo a la formación de frutos (Xu *et al.*, 2001b).

5.2.2.2.5. Número de flores

La evaluación de esta variable no mostró con claridad lo que sucedió durante la floración, debido a que la evaluación se realizó considerando en el conteo las flores que se encontraban abiertas en ese momento. Muchas flores no se detectaron debido a que ya eran frutos o bien se habían caído por diversas causas, de ahí que la cantidad de flores registrada fue muy baja y no existió una congruencia obvia entre el número de flores reportado y el número de frutos evaluados. Ante la falta de evidencia clara sobre esta variable, no se consideró necesario realizar la interpretación de los resultados de los análisis estadísticos, en los cuales no se encontraron diferencias significativas.

Sin embargo, los resultados para el cultivo de chile dulce indican que el número de flores aumentó cuando se incrementó la concentración de nitrógeno de 3 a 9 mM durante el ciclo de otoño-invierno y cuando se realizó la aplicación constante de 12 mM de nitrógeno durante el ciclo de primavera-verano (Xu *et al.*, 2001b). Por su parte, Alonso (2001) señala que aplicaciones moderadas de nitrógeno y potasio favorecieron significativamente la floración de las plantas de chile jalapeño. El comportamiento de las otras variables analizadas previamente fue similar al de los reportes mencionados, razón por la cual se puede inferir que la producción de flores también estuvo influenciada por la concentración de NO_3^- y K^+ en la solución nutritiva.

5.2.2.2.6. Número de frutos

La cantidad de frutos que se detectaron en las plantas evaluadas muestran el potencial de producción de este cultivo. También se observó una gran variación del número de frutos por efecto de los tratamientos evaluados. En la última evaluación (162 ddt), el mayor número de frutos (94 frutos) se obtuvo en las plantas del tratamiento 12 (8, 1.0, 9) y el menor número (36 frutos) en las plantas del tratamiento 7 (6, 1.5, 8). Al analizar estadísticamente dichos resultados, no se encontraron diferencias significativas del efecto de los tratamientos sobre la producción de frutos.

El análisis estadístico por etapa fenológica, reportó diferencias significativas para la etapa de floración-fructificación (54 ddt) y el tercer corte (C3, 144 ddt). En los resultados de la comparación de medias por etapa fenológica (Cuadro 19) se puede observar una tendencia al incremento del número de frutos al aumentar la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva; sin embargo, dichos resultados presentaron una alta variabilidad, con coeficientes de variación de 26.3% en la etapa FF, hasta 105% en el C3, lo que no permite sacar conclusiones de los mismos.

Cuadro 19. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el número de frutos de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Número de frutos por planta, por etapa fenológica | | | | |
|-------------|---|---------|---------|---------|---------|
| | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 2.7 b [†] | 30.0 a | 3.7 a | 13.0 b | 59.0 a |
| 2 | 3.5 ab | 27.7 a | 3.3 a | 35.3 ab | 70.7 a |
| 3 | 3.0 ab | 20.7 a | 0.7 a | 10.7 b | 79.0 a |
| 4 | 3.7 ab | 31.0 a | 13.0 a | 15.3 b | 40.7 a |
| 5 | 5.0 ab | 26.3 a | 5.0 a | 9.7 b | 66.7 a |
| 6 | 3.5 ab | 37.7 a | 3.7 a | 43.7 ab | 46.3 a |
| 7 | 3.3 ab | 27.0 a | 9.7 a | 12.0 b | 36.3 a |
| 8 | 4.2 ab | 35.7 a | 2.7 a | 29.3 ab | 91.3 a |
| 9 | 4.3 ab | 34.3 a | 10.7 a | 23.7 ab | 49.0 a |
| 10 | 5.7 a | 32.0 a | 12.3 a | 84.0 a | 50.7 a |
| 11 | 3.8 ab | 29.7 a | 12.0 a | 20.0 b | 53.7 a |
| 12 | 2.3 b | 31.0 a | 13.3 a | 40.7 ab | 94.3 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)
FF = Floración-fructificación

Una gran cantidad de los frutos emitidos por la planta no llegaron a la etapa de cosecha. Xu *et al.* (2001a) señalan que el aborto floral, la baja formación de fruto y la forma anormal del fruto, así como la baja formación de semillas ha sido un problema para la buena producción de chile dulce, especialmente cuando la temperatura es menor de 15°C y mayor a 32-38°C. La floración del cultivo de chile es acropétala, fructifica en orden secuencial y en abundancia, pero solo un pequeño porcentaje del fruto potencial se mantiene (Zewdie y Bosland, 2000). La abscisión de flores y frutos está relacionada con la competencia por asimilados disponibles, la sensibilidad de la flor al etileno inducido por el estrés de calor, y por la exportación de auxinas desde los primeros frutos formados. La variación estacional de la temperatura es el principal factor ambiental que afecta la abscisión de flores y frutos de chile (Xu *et al.*, 2001b).

Son muchas las causas que propician la abscisión de flores de chile. Algunas de éstas pueden ser controladas (plagas, enfermedades, etc.), pero otras no se controlan con facilidad (temperatura, luz, etc.). En general, el potencial de producción es muy alto y es necesario trabajar sobre las causas de pérdida de fruto para incrementar sustancialmente el rendimiento por planta. La cantidad de fruto que se perdió no pudo contabilizarse debido a las condiciones bajo las cuales se desarrolló el experimento, dado que no se pudieron aislar las plantas para una evaluación de este tipo.

Johnson y Decoteau (1996) reportaron que el número de frutos de chile jalapeño se incrementó curvilíneamente al incrementar la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva y el intervalo de 15 a 22 mM dio el mayor incremento de frutos por unidad de nitrógeno; sin embargo, la tasa óptima para la producción de frutos fue 15 mM. Para chile dulce cultivado en otoño-invierno, el incremento gradual de la concentración total de nitrógeno de 3 a 6 y 9 mM propició el aumento del número total de frutos (Xu *et al.*, 2001b) y al aumentar la dosis de 70 a 210 kg ha⁻¹ de nitrógeno, se incrementó el número de frutos (Kirnak *et al.*, 2003). El incremento de la concentración de fósforo de 18 a 54 g m⁻³, propició el incremento del número de frutos de berenjena (Zipelevish *et al.*, 2000). Por su parte, Zúñiga (2003) reportó que el número de frutos de chile jalapeño se modificó por efecto de los tratamientos, la fertilización basal, la fertilización con fósforo y la interacción de fósforo x potasio. El

porcentaje de formación de frutos por plantas crecidas en contenedores grandes se redujo de 79% a 25% conforme la concentración del nutrimento se incrementó de bajo a alto (Xu *et al.*, 2001a), por lo que es importante conocer los requerimientos óptimos de los nutrimentos.

5.2.2.2.7. Área foliar

Los datos de esta variable al final del ciclo de cultivo (162 ddt) indicaron que el valor máximo de área foliar (4,118 cm²) se obtuvo en las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y el mínimo (2,375 cm²) en las plantas del tratamiento 1 (6, 1.5, 8); esta diferencia (1,743 cm²) hace notorio el efecto de los tratamientos aplicados. Al realizar el análisis estadístico de los resultados de esta variable se encontraron diferencias altamente significativas ($\alpha < 0.0001$) tanto en el análisis de varianza como en el de regresión, para los datos de la etapa C4 (162 ddt).

Al realizar la comparación de las medias de tratamientos de los datos, se obtuvieron los resultados que se presentan en el Cuadro 20, en el que se observa que el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) mostró la mayor producción de área foliar. Enseguida se situó el tratamiento 8 (10, 1.5, 8) que es estadísticamente igual al tratamiento 10.

Los resultados por etapa fenológica indican que la producción de área foliar estuvo determinada por la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva y que a medida que se redujo su concentración, se redujo el área foliar. Para la etapa C4 (162 ddt), la excepción fue el comportamiento del tratamiento 8 (10, 1.5, 8), ya que en este caso la respuesta de la reducción de la concentración de NO₃⁻ no afectó la producción de área foliar, pero fue necesario incrementar las concentraciones de H₂PO₄⁻ y de K⁺. En los restantes tratamientos se observa que con los niveles de 8 y 10 me L⁻¹ de NO₃⁻ se obtuvieron más de 3,000 cm² de área foliar, y que los tratamientos con el nivel de 6 me L⁻¹ de NO₃⁻ produjeron los menores valores de área foliar. También se aprecia que en las respuestas obtenidas, no es claro el efecto de los niveles de H₂PO₄⁻ y de K⁺, de tal manera que la concentración de NO₃⁻ en la solución nutritiva parece ser la responsable de los mismos.

Cuadro 20. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el área foliar de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Área foliar por planta (cm^2), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|-----------|---------|---------|----------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 104 e [†] | 225 e | 684 b | 1608 a | 2080 bc | 2375 b |
| 2 | 164 abc | 328 abcde | 900 ab | 1894 a | 2785 ab | 3315 ab |
| 3 | 136 cde | 274 de | 723 b | 1364 a | 1977 bc | 2687 b |
| 4 | 212 a | 410 abc | 884 ab | 2021 a | 2337 abc | 3447 ab |
| 5 | 107 de | 286 cde | 679 b | 1275 a | 1791 c | 2630 b |
| 6 | 158 abcd | 424 ab | 1076 a | 1777 a | 2761 ab | 3315 ab |
| 7 | 130 cde | 289 cde | 719 b | 1559 a | 1975 bc | 2442 b |
| 8 | 160 abcd | 404 abcd | 943 ab | 1660 a | 2609 abc | 4037 a |
| 9 | 168 abc | 396 abcd | 851 ab | 1668 a | 2317 abc | 3042 ab |
| 10 | 206 ab | 441 a | 1047 a | 2123 a | 3238 a | 4118 a |
| 11 | 154 bcde | 294 bcde | 840 ab | 1790 a | 2219 bc | 2969 ab |
| 12 | 151 cde | 349 abcde | 900 ab | 1485 a | 2524 abc | 3304 ab |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

En el cultivo de salvia, el incremento de la concentración de la solución nutritiva propició el incremento del área foliar. Este efecto es de suma importancia si se considera que para optimizar el crecimiento vegetal, los programas de fertilización deberían tener por objetivo la optimización de la fotosíntesis vegetal y que el total de la fotosíntesis vegetal depende tanto de la fotosíntesis por unidad de área foliar como del total de área foliar de la planta (Kang y van Iersel, 2004). Khosla y Papadopoulos (2001) reportaron que la reducción de la relación potasio:nitrógeno (aumento de nitrógeno) incrementó el área foliar de plantas de tomate. También en chile jalapeño se reportó un incremento del área foliar al aumentar los niveles de NO_3^- en la solución nutritiva, siendo los mejores tratamientos los que contenían concentraciones de 10 a 12 me L^{-1} (Alonso, 2001).

Aunque no se tuvo como objetivo de este trabajo la obtención de la función de respuesta que explique la producción de área foliar de las plantas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , El análisis de regresión con base en el modelo propuesto para el diseño experimental empleado, permitió obtener la función de respuesta, la cual se presenta a continuación:

$$AF = 4725.605 - 183.922N - 22.208P - 653.729K + 5.390N^2 - 311.786P^2 + 29.560K^2 + 91.319NP + 36.256NK + 22.021PK$$

Donde: AF es la producción de área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) de las plantas de chile poblano; N es la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva (me L^{-1}); P es la concentración de H_2PO_4^- en la solución nutritiva (me L^{-1}); y, K es la concentración de K^+ en la solución nutritiva (me L^{-1}). N, P y K son los efectos lineales; N^2 , P^2 y K^2 son los efectos cuadráticos de los respectivos nutrientes, y NP, NK y PK son los efectos de interacción entre ellos. El modelo obtenido tuvo un buen ajuste ($r^2=70\%$; $\text{CV}=12.7\%$) de la respuesta del área foliar a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ .

5.2.2.2.8. Lecturas SPAD

Para la etapa C4 (162 ddt), el valor máximo (79.7) de las lecturas SPAD correspondió a las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y el más bajo (68.2) a las plantas del tratamiento 5 (6, 0.5, 8). El análisis estadístico de los resultados de la última etapa fenológica (C4, 162 ddt) reportó diferencias significativas, tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.06$) como en el de regresión ($\alpha=0.03$), de esta variable a los factores evaluados. Para esta misma etapa, la comparación de las medias de tratamientos arrojó los resultados que se presentan en el Cuadro 21, en el que se puede observar que el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) tuvo la mayor lectura SPAD; enseguida, se situó el tratamiento 8 (10, 1.5, 8), y ambos fueron estadísticamente diferentes.

También se puede observar que el efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva fue estadísticamente diferente en 4 de las 6 etapas fenológicas analizadas. Además, es notorio que los tratamientos que contenían 10 me L^{-1} de NO_3^- en la solución nutritiva fueron los que propiciaron las mayores lecturas SPAD en las hojas de las plantas de chile poblano evaluadas y no se aprecia tendencia alguna del efecto de la variación de las concentraciones de H_2PO_4^- y K^+ sobre esta variable. Los resultados de Kirnak *et al.* (2003) coinciden con estos resultados ya que al aumentar la dosis de nitrógeno de 70 a 210 kg ha^{-1} se incrementó el contenido de clorofila en las hojas de chile dulce.

Cuadro 21. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre las lecturas SPAD de hojas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Lecturas SPAD, por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|-------------------------------------|----------|----------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 49.9 cd [†] | 55.5 abc | 73.3 abc | 80.7 a | 79.5 a | 70.5 ab |
| 2 | 54.2 abc | 57.9 ab | 76.8 a | 77.3 a | 76.5 a | 72.0 ab |
| 3 | 48.1 d | 54.0 abc | 69.1 bc | 82.9 a | 77.9 a | 70.7 ab |
| 4 | 52.2 abcd | 54.9 abc | 75.3 abc | 83.0 a | 74.1 a | 74.1 ab |
| 5 | 49.0 cd | 50.5 c | 75.9 ab | 74.7 a | 75.2 a | 68.2 b |
| 6 | 54.7 ab | 57.9 ab | 75.5 abc | 78.0 a | 73.6 a | 75.3 ab |
| 7 | 50.3 bcd | 52.4 bc | 68.1 c | 79.0 a | 75.7 a | 74.2 ab |
| 8 | 51.1 bcd | 52.9 bc | 75.4 abc | 81.6 a | 76.2 a | 75.6 ab |
| 9 | 51.2 bcd | 56.1 abc | 74.2 abc | 79.7 a | 77.4 a | 69.1 ab |
| 10 | 57.0 a | 58.9 a | 75.3 abc | 80.8 a | 77.8 a | 79.7 a |
| 11 | 51.2 bcd | 51.4 c | 75.6 ab | 78.6 a | 77.0 a | 70.7 ab |
| 12 | 52.8 abcd | 52.6 bc | 75.7 ab | 80.0 a | 80.5a | 74.7 ab |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

El medidor SPAD (Soil-Plant Analysis Development), ha sido usado para la medición instantánea de la cantidad de clorofila presente en las hojas. Mediante una pequeña cámara donde se introduce la hoja, el medidor emite luz de dos diodos, una genera una longitud de onda con pico de 650 nm (roja) y la otra produce una longitud de onda con pico de 940 nm (infrarroja), y son transmitidas alternadamente a través de la hoja. Debido a que la clorofila absorbe la luz roja pero excluye la infrarroja, un valor SPAD con un índice de 0 a 100 se calcula instantáneamente a partir de la densidad óptica diferencial entre las longitudes de onda roja e infrarroja detectada por un fotodiodo. Como resultado, las lecturas SPAD están fuertemente relacionadas con la cantidad relativa de clorofila presente en la hoja (Wang *et al.*, 2004).

Si se considera que el SPAD 502 es un aparato portátil diseñado como parte de un método no destructivo para medir el contenido de clorofila en las hojas (Bonneville y Fyles, 2006; Debaeke *et al.*, 2006) y que las lecturas obtenidas con el SPAD frecuentemente están correlacionadas linealmente con el contenido extractable de clorofila de las hojas de muchos cultivos (Yadava, 1986; Madeira y de Varennes, 2005), de acuerdo con los resultados se puede indicar que el incremento de los niveles de NO_3^- en la solución nutritiva propició el aumento del contenido de clorofila en la hoja, y que cuando el nivel de NO_3^- en la solución nutritiva se redujo, el

contenido de clorofila de la hoja se pudo mantener con niveles de 1.0 a 1.5 me L⁻¹ de H₂PO₄⁻ y de 8 a 9 me L⁻¹ de K⁺ en la solución nutritiva. Parece que el nitrógeno juega un papel importante en la formación de la estructura de los cloroplastos y por tanto sobre la intensidad fotosintética de las plantas de chile (Doncheva *et al.*, 2001).

También es muy importante el hecho de que las lecturas SPAD tuvieron tendencia al incremento a partir del transplante y hasta la etapa del segundo corte (C2, 1260 ddt) en la cual alcanzó los máximos valores, para luego tener una tendencia a la reducción hasta el final del ciclo de cultivo. Esta tendencia parece indicar que para ser usado como un indicador del nivel de clorofila, y posiblemente del contenido de nitrógeno, en las hojas es necesario contar los estándares para cada etapa fenológica.

Como se mencionó anteriormente, las lecturas obtenidas fueron mucho mayores a las reportadas para otros cultivos tales como toronja (Li *et al.*, 1998), maíz (Piekielek *et al.*, 1995), sorgo y chícharo (Yamamoto *et al.*, 2002) calabaza (Swiader y Moore, 2002), trigo (Jia *et al.*, 2004), remolacha (Sexton y Carroll, 2002) y tomate (Rodríguez *et al.*, 1998; Sandoval *et al.*, 2002). Pero fueron similares a las lecturas reportadas para chile poblano (Urrieta, 2006) y flores de lily (Wang *et al.*, 2004). Esto indica que para este cultivo deben ajustarse las líneas de regresión para cada etapa fenológica.

Aunque se ha encontrado una alta correlación entre las lecturas SPAD y el contenido relativo de clorofila en la hoja, las funciones de regresión deben determinarse para cada cultivo, estado fisiológico, condición de crecimiento, especie y variedad para maximizar la exactitud de la estimación del contenido de clorofila como una función del índice SPAD (Castelli *et al.*, 1996; Fox *et al.*, 2001; Yamamoto *et al.*, 2002).

La función de respuesta para el comportamiento de las lecturas SPAD de las hojas de chile poblano en la etapa C4 (162 ddt), a la aplicación de diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺, es la que se presenta a continuación:

$$\text{SPAD} = 155.338 - 7.851N - 0.755P - 17.270K + 0.467N^2 - 0.384P^2 + 1.075K^2 - 0.462NP + 0.231NK + 1.025PK$$

Donde: SPAD, es la lectura SPAD promedio de la hoja a los 162 ddt (C4), y los demás términos ya se definieron con anterioridad. Este modelo tuvo un bajo coeficiente de determinación ($r^2=0.46$) y a pesar de su baja variabilidad ($CV=5.38\%$), no explica la respuesta de las lecturas SPAD a la aplicación de las dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ .

5.2.2. Resumen del análisis de las variables morfométricas

En este apartado se discutieron las variables morfométricas del crecimiento (ALT, DT, NH, NR, AF y SPAD) así como los componentes del rendimiento (NR, NF y NFF), cuyos resultados pueden ser resumidos a continuación. Es necesario señalar que la repetición de la variable NR se debe a que es un indicador del crecimiento y al mismo tiempo tiene gran importancia en la producción de fruto para este cultivo, dado que en cada ramificación se generan los racimos de flores.

En cuanto a las variables morfométricas del crecimiento se puede apreciar que la ALT, DT, NH, NR, AF y SPAD manifestaron diferencias significativas a los tratamientos en las dos primeras etapas fenológicas (CV, 36 ddt; y FF, 54 ddt) periodo durante el cual el incremento de las concentraciones de NO_3^- en la solución nutritiva propiciaron el incremento de dichas variables, con lo cual las plantas alcanzaron un porte y vigor que determinó en gran medida el rendimiento de fruto. Para el AF y lecturas SPAD, los tratamientos tuvieron efecto significativo en casi todas las etapas fenológicas. Es claro también que el efecto de las concentraciones de H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva fue mínimo sobre estas variables y siempre estuvieron supeditadas al nivel de NO_3^- . En todos los casos, el mejor tratamiento fue el 10 (12, 1.0, 7) equivalente a la solución universal Steiner.

Los resultados obtenidos permiten aceptar sin reservas la primera hipótesis con relación al nitrógeno, ya que su aplicación incrementó el crecimiento de las plantas de chile en diferentes etapas fenológicas; sin embargo, los efectos del fósforo y del potasio no fueron concluyentes, ya que sí se tuvieron efectos, pero en algunos casos positivos y en otros negativos, sobre las variables evaluadas.

En cuanto a los componentes del rendimiento (NR, NF y NFR) también se observaron efectos significativos de los tratamientos en diversas etapas fenológicas, para NR y NFR pero no para NF, esto último debido al método de evaluación empleado. La respuesta de estas variables fue similar a la de las anteriores, ya que, en todos los casos, el incremento de las concentraciones de NO_3^- en la solución nutritiva propiciaron el incremento, con lo cual se deduce un efecto directo de este nutriente sobre el rendimiento. De manera similar el efecto de las concentraciones de H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva no fueron determinantes sobre estas variables. El mejor tratamiento también fue el 10 (12, 1.0, 7). De acuerdo con esto, se puede aceptar de manera parcial la segunda hipótesis, solo para el caso del nitrógeno, ya que para fósforo y potasio no es concluyente pues de acuerdo con el análisis de regresión se tuvieron efectos pero no necesariamente sobre el incremento de las variables.

5.2.3. Análisis del crecimiento en función de la producción de materia seca

5.2.3.1. Producción media y absoluta de materia seca

El rendimiento de un cultivo está dado por la capacidad de acumular biomasa (materia fresca y seca) en los órganos que se destinan a la cosecha y un incremento de la biomasa destinada a estos órganos garantiza un incremento del rendimiento. Así, la distribución de materia seca (MS) entre los diferentes órganos de la planta tiene un papel fundamental en la producción de cultivos (Peil y Gálvez, 2005).

En el Cuadro 22, se reportan los valores medios de la producción de MS (g planta^{-1}) de diferentes órganos de plantas de chile poblano y se observa su comportamiento durante su ciclo vegetativo en cada evaluación. En el Cuadro 23 se presentan las tasas de producción absoluta de MS ($\text{mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$), con lo cual podemos conocer el incremento diario de cada una de las variables. Cabe recordar que el crecimiento de las plantas aún no llegaba a su final cuando se realizó la última evaluación, por lo que los datos reportados están por debajo de los que se pudieron obtener al final del ciclo, debido al crecimiento semiperenne de esta especie.

La producción de MS de la hoja (MSh) durante el ciclo vegetativo del cultivo, presentó tres etapas, la primera se dio desde el transplante y hasta los 36 ddt, periodo en el cual fue pequeña; en la segunda etapa (de los 36 a los 108 ddt) se observó una producción media de 2.0 g por cada 18 días ($111 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$), y, finalmente, de los 108 a los 162 ddt la producción fue, en promedio, de 4.0 g cada 18 días ($222 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$).

La producción de MS del tallo (MSt) fue pequeña entre el transplante y los 18 ddt ($3 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$) y entre los 18 y 36 ddt ($22 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$); para el siguiente periodo de evaluación se incrementó notoriamente ($167 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$), para después tener una disminución en los dos siguientes muestreos, antes de tener fuertes incrementos en las siguientes evaluaciones. Es notorio que la mayor tasa de producción diaria de MSt ($689 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$) se dio a los 162 ddt, por lo que se puede deducir que el cultivo aún tendría un periodo de crecimiento prolongado.

La producción de MS de la raíz (MSr) tuvo tendencia al crecimiento, pero se observaron periodos de baja y alta producción en todos los tratamientos. Sólo entre el transplante y los 18 ddt la producción de MSr triplicó la del tallo en el mismo intervalo de tiempo, debido probablemente a una respuesta de adaptación al nuevo contenedor en el que se colocaron y preparando su sistema radical para la exploración de todo el volumen disponible y el abastecimiento de la planta. La máxima tasa de producción de MSr ($178 \text{ mg planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$) se dio a los 162 ddt, lo cual podría ser un indicador de que la planta se estaba preparando para una nueva fase de fuerte crecimiento y fructificación.

A partir de la cuarta evaluación (72 ddt), la producción de MS del fruto (MSf) tuvo un aporte considerable a la MS total, siendo predominante en todas las evaluaciones restantes (Cuadro 22). La tasa de producción de MSf (Cuadro 23) fue por mucho la mayor de todos los órganos de la planta evaluados; este comportamiento concuerda con el del chile jalapeño (Alonso, 2001; Zúñiga, 2003), llegando a superar los $3.5 \text{ g planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (162 ddt), en tanto que la máxima tasa de producción de MSt, en la misma fecha de evaluación, apenas fue de $0.689 \text{ g planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

Cuadro 22. Valor promedio de la producción de MS total y de diferentes órganos (g planta⁻¹), de plantas de chile poblano.

| Parte de la planta | Edad de las plantas (días después del transplante) | | | | | | | | |
|--------------------|--|-----|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 18 | 36 | 54 | 72 | 90 | 108 | 126 | 144 | 162 |
| MS hoja | 0.3 | 0.7 | 2.6 | 4.9 | 6.1 | 8.4 | 12.8 | 16.8 | 21.8 |
| MS tallo | 0.1 | 0.5 | 3.5 | 5.6 | 7.8 | 12.1 | 19.3 | 24.3 | 36.7 |
| MS raíz | 0.2 | 0.7 | 2.9 | 3.2 | 4.2 | 6.1 | 7.6 | 8.6 | 11.8 |
| MS fruto | | | 1.1 | 6.6 | 21.5 | 13.3 | 18.7 | 23.9 | 64.0 |
| MS Total | 0.6 | 1.9 | 10.1 | 20.3 | 39.6 | 39.9 | 58.4 | 73.6 | 134.3 |
| MS parte aérea | 0.4 | 1.2 | 7.2 | 17.1 | 35.4 | 33.8 | 50.8 | 65.0 | 122.5 |
| MS aérea/MS raíz | 2.0 | 1.7 | 2.5 | 5.3 | 8.4 | 5.5 | 6.7 | 7.5 | 10.4 |
| MS tallo/MS raíz | 0.5 | 0.7 | 1.2 | 1.7 | 1.8 | 2.0 | 2.5 | 2.8 | 3.1 |

Al sumar las producciones de MSh, MSt, MSr y MSf, se obtuvo la producción total de MS de la planta (MST). Este valor estuvo influenciado por la producción de MSt y MSf a partir del tercer corte (144 ddt). Se tuvo una etapa de fuerte producción de MST a los 54 ddt (394 mg planta⁻¹ día⁻¹); en las 2 evaluaciones siguientes (72 y 90 ddt) la producción de MST se duplicó en cada muestreo, se mantuvo igual entre los 90 y 108 ddt para luego presentar incrementos importantes hasta el final del experimento. Entre los 144 y 162 ddt la tasa de producción de MST casi se triplicó, lo cual parece mostrar un crecimiento importante de la planta que denota la continuidad del crecimiento, de tal manera que su ciclo vegetativo aún estaba lejos de concluir.

Cuadro 23. Tasa de producción absoluta de materia seca de toda la planta y de diferentes órganos (mg planta⁻¹ día⁻¹), de plantas de chile poblano.

| Parte de la planta | Edad de las plantas (días después del transplante) | | | | | | | | |
|--------------------|--|----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| | 18 | 36 | 54 | 72 | 90 | 108 | 126 | 144 | 162 |
| MS hoja | 11 | 22 | 105 | 127 | 67 | 127 | 244 | 222 | 278 |
| MS tallo | 3 | 22 | 167 | 117 | 122 | 239 | 400 | 278 | 689 |
| MS raíz | 10 | 28 | 122 | 17 | 55 | 105 | 83 | 55 | 178 |
| MS fruto | | | 85 | 305 | 828 | 738 | 1039 | 1327 | 3555 |
| MS Total | 24 | 72 | 479 | 566 | 1072 | 1209 | 1766 | 1882 | 4700 |
| MS parte aérea | 14 | 44 | 357 | 549 | 1017 | 1104 | 1682 | 1827 | 4522 |

La suma de la MSf, MSt y MSh nos proporcionó la producción de MS de la parte aérea (MSa) de la planta. La acumulación de la MSa, en promedio, tuvo un incremento muy pequeño desde el transplante y hasta los 36 ddt, pero a partir de los 54 ddt los incrementos fueron notorios como un reflejo de la formación y crecimiento de los frutos, teniendo su máximo crecimiento entre los 144 y 162 ddt.

Al analizar la relación de producción de MSa/MSr promedio, se observó que el comportamiento presentó dos fases de ascenso gradual con picos máximos, entre el transplante y los 90 ddt se tiene un incremento gradual desde 2.0 y hasta 8.4; a los 108 ddt se observa una reducción de esta relación, la cual estuvo determinada por la reducción de la producción de MSf a causa del primer corte de fruto y el lento crecimiento de los frutos restantes. Sin embargo, este efecto no volvió a apreciarse, ya que entre los 108 y los 162 ddt se dio de nuevo el incremento continuo de la relación desde 5.5 y hasta 10.4 a pesar de haberse realizado dos cortes intermedios. Los resultados de esta relación podrían interpretarse como un inadecuado crecimiento de la raíz; sin embargo, considerando el vigor de la planta y el tamaño de la misma, se puede concluir que a pesar de su reducido tamaño, la raíz fue capaz de suministrar de manera adecuada los nutrimentos y el agua requeridos por la planta, lo cual pudo deberse al sistema hidropónico empleado y al constante abastecimiento de solución nutritiva realizado durante todo el ciclo de cultivo.

Los datos de la producción de MSt/MSr, muestran una tendencia al incremento como corresponde a las plantas en crecimiento. La relación observada a los 18 y 36 ddt indica que la producción de MSr fue mayor que la MSt aunque la diferencia tiende a reducirse, de tal manera que a partir de los 54 ddt el tallo empezó a tener una mayor producción de MS que la raíz y la diferencia fue cada vez mayor conforme la planta creció. Entre los 54 y 72 ddt la relación mostró un incremento similar (0.4 y 0.5), a los 90 y 108 ddt el incremento de la relación también fue similar pero de menor magnitud (0.1 y 0.2), pero a los 126 ddt se volvió a incrementar la relación a 0.6 y de nuevo se redujo a los 144 (0.2) y 162 (0.3) ddt. Estos resultados se pueden interpretar de la misma manera que en el caso de la variable anterior y se puede afirmar que la planta produjo la cantidad de raíces que, aunque pequeña, fue suficiente para lograr un buen abastecimiento de agua y nutrimentos y que es característico de las plantas cultivadas en hidroponía.

5.2.3.2. Análisis estadístico de la producción de materia seca

En los Cuadros 24 a 31 se presentan los resultados de la comparación de medias de tratamiento que explican el efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ sobre la producción de MS de diversos órganos de las plantas de chile poblano cultivadas en hidroponía, en diferentes etapas fenológicas. Para la etapa fenológica C4 (162 ddt), sólo se obtuvieron respuestas significativas para las variables producción de MSh, MST, MSa, y la relación de producción de MST/MSr, por lo que en ellas se realizó el ajuste de los modelos que explican dichas respuestas. Sin embargo, el análisis estadístico de las variables en cada etapa fenológica mostró efecto significativo de los tratamientos sobre todas las variables evaluadas.

5.2.3.1.1. Producción de materia seca de la hoja

El valor máximo de la producción final (162 ddt) de MSh ($29.5 \text{ g planta}^{-1}$) correspondió a las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y el valor mínimo ($17.2 \text{ g planta}^{-1}$) se presentó en las hojas de las plantas del tratamiento 5 (6. 0.5, 8); esta diferencia ($12.3 \text{ g planta}^{-1}$), permite vislumbrar el efecto de los tratamientos sobre esta variable. El análisis estadístico de los resultados de la producción final de MSh indicó que se obtuvieron diferencias altamente significativas ($\alpha < 0.0001$) a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , tanto en el análisis de varianza como en el de regresión.

Los resultados de la comparación de las medias de tratamiento, para esta etapa fenológica (C4, 162 ddt), se presentan en el Cuadro 24. La mayor producción de MSh se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7); enseguida se situó el tratamiento 4 (10, 1.5, 6) y en tercer lugar el tratamiento 8 (10, 1.5, 8), los cuales fueron estadísticamente diferentes entre sí. Se puede apreciar que los tratamientos 4 y 8 tienen en común la misma concentración de NO_3^- y H_2PO_4^- y solo difieren en la concentración de K^+ .

Cuadro 24. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca de las hojas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Materia seca de la hoja (g planta^{-1}), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|-----------|---------|---------|---------|-----------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 0.4 g [†] | 2.0 de | 4.7 b | 11.3 ab | 15.4 a | 17.7 cd |
| 2 | 0.7 bcde | 3.0 abcd | 6.5 ab | 14.6 ab | 19.9 a | 23.6 abcd |
| 3 | 0.5 fg | 1.9 e | 5.0 b | 10.4 b | 14.5 a | 17.9 bcd |
| 4 | 0.8 abcd | 3.4 a | 6.4 ab | 15.0 a | 18.0 a | 25.0 ab |
| 5 | 0.5 efg | 2.0 de | 4.6 b | 10.4 b | 12.6 a | 17.2 d |
| 6 | 0.9 abc | 3.1 abc | 8.0 a | 13.8 ab | 18.1 a | 22.6 abcd |
| 7 | 0.5 fg | 2.3 bcde | 5.0 b | 12.2 ab | 15.3 a | 17.0 d |
| 8 | 0.9 ab | 2.8 abcde | 6.9 ab | 13.2 ab | 16.0 a | 24.7 abc |
| 9 | 0.7 bcdef | 2.6 abcde | 6.1 ab | 13.3 ab | 18.7 a | 21.4 bcd |
| 10 | 1.1 a | 3.4 a | 7.8 a | 14.6 ab | 21.1 a | 29.4 a |
| 11 | 0.7 cdef | 2.2 cde | 6.0 ab | 12.9 ab | 15.0 a | 20.9 bcd |
| 12 | 0.6 defg | 2.5 abcde | 6.5 ab | 11.4 ab | 17.5 a | 24.1 abcd |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

Los resultados de la comparación de medias de tratamientos por etapa fenológica (Cuadro 24) muestran que para esta variable se obtuvieron efectos significativos de los tratamientos en 5 de las 6 etapas fenológicas. Estos resultados también muestran que las mayores producciones de MSh se obtuvieron con los tratamientos que tuvieron de 10 a 12 me L^{-1} de NO_3^- , y las menores producciones se obtuvieron con los tratamientos que tuvieron 6 me L^{-1} de NO_3^- . Esta respuesta fue similar a las reportadas para chile dulce, en el que el efecto del nitrógeno fue cuadrático con un óptimo de 9.2 mM L^{-1} (Bar-Tal *et al.*, 2001a); y también para chile jalapeño en las que el peso seco de las hojas respondió curvilíneamente a la tasa de fertilidad de nitrógeno y potasio (Johnson y Decoteau, 1996), mientras que en tomate no se encontró efecto de los tratamientos de potasio sobre MSh (Bugarín *et al.*, 2002).

Los niveles de H_2PO_4^- y K^+ no tuvieron mucho efecto, pues la variación de la concentración de NO_3^- fue determinante en la respuesta. Estos resultados presentan una fuerte relación con el número de hojas producidas por la planta (Cuadro 17) y con el área foliar (Cuadro 20), lo cual es un buen indicador de que se tuvo uniformidad en el tamaño de las hojas de las plantas de chile poblano. En chile jalapeño, cultivado en suelo vertisol, se encontró que la fertilización de base, el incremento en las dosis de

fósforo y la interacción de las dosis de fósforo x potasio incrementaron la producción de MSh; y que las plantas desarrolladas con 1000 ppm de fósforo y 1500 ppm de potasio presentaron la mayor producción de MSh (Zúñiga, 2003).

La función de respuesta para la producción de MSh de las plantas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la etapa C4 (162 ddt), se muestra a continuación:

$$\text{MSh} = 49.019 + 0.153\text{N} + 0.716\text{P} - 10.452\text{K} + 0.068\text{N}^2 - 1.750\text{P}^2 + 0.727\text{K}^2 + 0.435\text{NP} + 0.008\text{NK} + 0.084\text{PK}$$

Donde: MSh es la producción de MS de la hoja (g planta^{-1}) en la etapa fenológica C4 (162 ddt); y los demás términos ya fueron definidos. El alto coeficiente de determinación ($r^2=0.77$) de esta función y la baja variabilidad ($\text{CV}=11.2\%$) indican que el modelo obtenido explica la producción de MS de la hoja a la aplicación de soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ .

5.2.3.1.2. Producción de materia seca del tallo

El análisis de los resultados de la producción final de MSt (C4, 162 ddt) permite señalar que el valor máximo ($46.9 \text{ g planta}^{-1}$) se obtuvo en las plantas del tratamiento 8 (10, 1.5, 8), en tanto que el valor mínimo ($29.8 \text{ g planta}^{-1}$) lo expresaron los tallos de las plantas del tratamiento 5 (6, 0.5, 8). Al realizar el análisis estadístico de los resultados, no se encontraron diferencias significativas en el análisis de varianza ($\alpha=0.09$) ni en el de regresión ($\alpha=0.06$) de este variable a los factores evaluados.

El análisis estadístico de los resultados de esta variable para cada etapa fenológica, arrojó diferencias significativas en las etapas CV (36 dt), FF (54 ddt), y C2 (90 ddt), cuyas comparaciones de medias de tratamiento se reportan en el Cuadro 25. En las etapas en las que se encontraron diferencias significativas, se observa que los tratamientos con niveles de 10 a 12 me L^{-1} de NO_3^- fueron los que produjeron las mayores cantidades de MSt y que los tratamientos con el nivel de 6 me L^{-1} de NO_3^- fueron los de menor producción. Cabe señalar que el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) fue el

mejor, debido a que fue el que produjo mayor MSt en la mayoría de las etapas fenológicas. La falta de diferencias significativas entre las medias de tratamientos y los bajos coeficientes de determinación obtenidos en las etapas C3 (144 ddt) y C4 (162 ddt), fue la razón por la cual no se consideró pertinente realizar el ajuste de la función de respuesta de esta variable a los factores evaluados.

Cuadro 25. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca del tallo de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Materia seca del tallo (g planta^{-1}), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|---|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 0.3 d [†] | 2.5 e | 6.5 a | 16.4 ab | 25.9 a | 30.2 a |
| 2 | 0.6 bc | 3.8 abcde | 6.8 a | 21.7 ab | 27.7 a | 36.3 a |
| 3 | 0.4 cd | 2.5 e | 6.0 a | 14.7 b | 19.4 a | 33.8 a |
| 4 | 0.7 ab | 4.6 ab | 7.5 a | 20.3 ab | 23.5 a | 38.8 a |
| 5 | 0.4 cd | 2.6 de | 5.9 a | 15.0 b | 18.2 a | 29.8 a |
| 6 | 0.7 ab | 4.2 abc | 10.9 a | 20.2 ab | 24.6 a | 32.6 a |
| 7 | 0.4 cd | 3.0 cde | 6.7 a | 20.9 ab | 21.9 a | 31.5 a |
| 8 | 0.7 ab | 4.0 abcd | 8.8 a | 22.0 ab | 27.1 a | 47.0 a |
| 9 | 0.5 bc | 3.6 abcde | 8.5 a | 19.4 ab | 23.6 a | 34.0 a |
| 10 | 0.8 a | 4.9 a | 9.8 a | 23.8 a | 35.1 a | 45.7 a |
| 11 | 0.5 cd | 3.0 cde | 7.9 a | 18.2 ab | 22.1 a | 38.8 a |
| 12 | 0.4 cd | 3.2 bcde | 8.4 a | 19.5 ab | 22.8 a | 41.7 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

La tendencia de incremento del peso seco del tallo de las plantas de chile poblano al aumentar las concentraciones de NO_3^- en la solución nutritiva fue similar a los resultados obtenidos para plantas de chile dulce (Bar-Tal *et al.*, 2001b; Kirnak *et al.*, 2003) y salvia (Kang y van Iersel, 2004) en los que el peso del tallo se incremento significativamente y en gran medida al aumentar las concentraciones en la solución nutritiva. Pero difieren ligeramente de la respuesta de las plantas de chile jalapeño en las que la fertilización de base y el incremento en las dosis de fósforo y potasio incrementaron la producción de MSt, y con la mayor cantidad de MSt acumulada de las plantas desarrolladas con 1000 ppm de fósforo y 1500 ppm de potasio (Zúñiga, 2003).

Los resultados de la producción de MSt, tiene una relación estrecha con las variables diámetro de tallo (Cuadro 16) y número de ramas (Cuadro 18), cuyos comportamientos, con relación al efecto de los tratamientos sobre esta variable, son similares, lo cual es de esperarse cuando las plantas se desarrollan adecuadamente y sin restricciones. La falta de respuesta en las dos últimas evaluaciones es un indicador de que las plantas ya tenían la estructura y soporte suficientes para el crecimiento de los frutos producidos.

5.2.3.1.3. Producción de materia seca de la raíz

Al final del experimento (162 ddt) se obtuvo la máxima producción final de MSr (15.8 g planta⁻¹) y ésta se presentó en las plantas del tratamiento 12 (8, 1.0, 9), en tanto que, para la misma etapa fenológica, el valor mínimo (9.7 g planta⁻¹) se registró en las plantas del tratamiento 5 (6, 0.5, 8). Los análisis de varianza y de regresión, de los resultados de esta variable al final del experimento, no reportaron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados. Sin embargo, en los datos del Cuadro 26 se puede observar que los tratamientos que registraron las mayores producciones de MSr fueron aquellos que tuvieron concentraciones de 10 a 12 me L⁻¹ de NO₃⁻ en la solución nutritiva, lo cual permite deducir que la raíz requiere de altas concentraciones de este nutrimento en la solución nutritiva para la acumulación de MS, pero para esta etapa la acumulación de MSr fue suficiente para la adecuada nutrición de la planta por lo cual no se encontraron efectos de los tratamientos.

En las etapas de crecimiento vegetativo (36 ddt), floración-fructificación (54 ddt) y tercer corte (144 ddt), se obtuvieron diferencias significativas en los análisis de varianza y de regresión, lo cual llevó a realizar la comparación de medias de tratamientos (Cuadro 26). Los tratamientos cuyas concentraciones de NO₃⁻ en la solución nutritiva variaron entre 10 y 12 me L⁻¹, fueron los que reportaron los mayores valores de MSr y que los valores más bajos se obtuvieron en los tratamientos que tan solo contenían 6 me L⁻¹ de NO₃⁻. Esta respuesta coincide con el trabajo de Kirnak *et al.* (2003) quienes encontraron un aumento de la MSr al aumentar la dosis de nitrógeno de 70 a 110 kg ha⁻¹.

Cuadro 26. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca de la raíz de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Materia seca de la raíz (g planta^{-1}), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|----------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 0.6 cde [†] | 2.1 d | 4.4 a | 6.4 ab | 9.1 ab | 11.1 a |
| 2 | 0.7 abcde | 3.0 abcd | 4.2 a | 8.6 ab | 10.1 ab | 13.1 a |
| 3 | 0.5 e | 2.6 bcd | 3.5 a | 5.5 b | 6.1 b | 10.8 a |
| 4 | 0.8 abcd | 3.4 abc | 3.6 a | 8.0 ab | 8.0 ab | 12.1 a |
| 5 | 0.6 bcde | 2.4 d | 3.5 a | 6.5 ab | 7.1 ab | 9.7 a |
| 6 | 0.8 ab | 3.6 ab | 5.8 a | 8.2 ab | 9.3 ab | 10.5 a |
| 7 | 0.5 e | 2.5 cd | 3.4 a | 7.7 ab | 7.8 ab | 10.4 a |
| 8 | 0.8 abc | 3.3 abc | 4.4 a | 8.5 ab | 9.2 ab | 13.1 a |
| 9 | 0.6 abcde | 2.8 abcd | 4.3 a | 7.8 ab | 7.9 ab | 10.4 a |
| 10 | 0.9 a | 3.7 a | 4.7 a | 8.7 a | 12.1 a | 13.4 a |
| 11 | 0.6 abcde | 2.6 bcd | 4.3 a | 6.4 ab | 8.1 ab | 11.4 a |
| 12 | 0.6 abcde | 3.2 abc | 4.9 a | 8.5 ab | 8.4 ab | 15.8 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

El efecto del K^+ no es claro, aunque se aprecia una ligera tendencia al incremento de la MSr al aumentar las dosis. También el incremento en las dosis de potasio y la interacción de las dosis de fósforo x potasio incrementaron la producción de MSr de chile jalapeño cultivado en suelo vertisol; aunque los tratamientos con diferentes dosis de fósforo presentaron respuestas diversas en las diferentes etapas fenológicas del cultivo, al final del ciclo las plantas desarrolladas con 1000 ppm de fósforo y 1500 ppm de potasio presentaron la mayor producción de MSr (Zúñiga, 2003). El potasio puede ser el principal factor limitante en la reducción del crecimiento del volumen radical, debido que para su absorción las plantas de tomate y lechuga requieren de una mayor área superficial de la raíz (Xu *et al.*, 2001a). En el caso del fósforo, el peso de las raíces no difirió significativamente en la presencia o ausencia del fósforo aplicado, lo mismo que ocurrió para el peso seco y la longitud de las raíces de cultivares de trigo que fueron significativamente más largas bajo condiciones de deficiencia de fósforo (Hayes *et al.*, 2004). También se ha reportado que la ausencia de fósforo en plantas de chile ancho San Luis propició una mayor producción de MSr (Davies *et al.*, 1999).

El conocimiento del ambiente radical y la eficiencia de la raíz, para la absorción de agua y nutrientes, es muy importante para el entendimiento de los factores que afectan la cantidad y calidad del rendimiento. Las raíces no tienen influencia directa sobre el rendimiento máximo. Los efectos de la raíz sobre la producción de MST están basados en suministros subóptimos o condiciones limitantes del crecimiento de la raíz. En la actualidad, la caracterización de los sistemas radicales por su peso seco ha sido reemplazada por la caracterización de su longitud y área superficial (Schwarz, 2004).

5.2.3.1.4. Producción de materia seca del fruto

Al final del experimento (162 ddt) se obtuvo la mayor cantidad de MS del fruto ($100.1 \text{ g planta}^{-1}$) y correspondió a las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7), en tanto que la menor cantidad ($39.2 \text{ g planta}^{-1}$) correspondió a las plantas del tratamiento 1 (6, 0.5, 6). El análisis estadístico de los resultados de la producción de MSf en la última evaluación indicó que se obtuvieron diferencias altamente significativas, tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0009$), como en el de regresión ($\alpha=0.0004$), a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ .

Los resultados de la comparación de las medias de tratamiento (Cuadro 27) para esta etapa fenológica (C4, 162 ddt), indican que la mayor producción de MS del fruto se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7); enseguida se situó el tratamiento 12 (8, 1.0, 9), el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento 10. Estos tratamientos difieren tanto en la concentración de NO_3^- , como en la de K^+ , y tienen el mismo nivel de H_2PO_4^- , por lo que se puede señalar que la reducción de la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva propició la reducción de la producción de MSf a pesar del incremento de la concentración de K^+ , lo cual podría señalar que el K^+ no tiene mucha importancia en la acumulación de MSf de chile poblano, similar al efecto del K^+ encontrado en el cultivo de tomate en el que el incremento de la concentración de K^+ en la solución nutritiva no propició ganancia en la producción de MSf (Bugarín *et al.*, 2002).

Los resultados para cada etapa fenológica (Cuadro 27), señalan que para esta variable se obtuvieron efectos significativos de los tratamientos en 3 de los 4 cortes de fruto y sólo en el corte 2 (126 ddt) no se encontraron diferencias significativas. También muestran que las mayores producciones de MSf se obtuvieron con los tratamientos que tuvieron de 10 a 12 me L⁻¹ de NO₃⁻, y las menores producciones correspondieron a los tratamientos que tuvieron 6 me me L⁻¹ de NO₃⁻. Estos resultados son similares a los obtenidos por Bar-Tal *et al.* (2001b) en frutos de chile dulce quienes encontraron que la mejor concentración de nitrógeno en la solución nutritiva fue de 9.4 mM L⁻¹.

Cuadro 27. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺, sobre la producción de materia seca del fruto de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Materia seca del fruto (g planta ⁻¹), por etapa fenológica | | | | |
|-------------|--|----------|---------|----------|----------|
| | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 1.0 a [†] | 16.8 bc | 13.1 a | 20.1 abc | 39.2 c |
| 2 | 1.0 a | 11.6 c | 16.3 a | 11.7 bc | 52.9 bc |
| 3 | 0.6 a | 16.8 bc | 19.5 a | 11.0 bc | 74.8 abc |
| 4 | 1.2 a | 25.2 ab | 18.1 a | 27.9 abc | 77.7 abc |
| 5 | 1.2 a | 23.4 abc | 11.4 a | 22.4 abc | 63.9 abc |
| 6 | 1.3 a | 18.9 abc | 12.1 a | 12.3 bc | 70.7 abc |
| 7 | 0.9 a | 19.0 abc | 18.9 a | 31.2 abc | 46.7 bc |
| 8 | 1.4 a | 30.2 a | 23.9 a | 33.2 abc | 64.3 abc |
| 9 | 1.0 a | 20.1 abc | 21.2 a | 37.2 ab | 46.0 bc |
| 10 | 1.6 a | 29.3 ab | 24.9 a | 25.6 abc | 100.1 a |
| 11 | 1.0 a | 23.6 abc | 22.7 a | 47.8 a | 43.4 bc |
| 12 | 1.0 a | 23.0 abc | 22.3 a | 7.0 c | 88.2 ab |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)
FF = Floración-fructificación

Los niveles de H₂PO₄⁻ y K⁺ tuvieron poco efecto, pues la variación de la concentración de NO₃⁻ fue determinante en la respuesta. Estos resultados presentan poca relación con el número de frutos producidos por la planta (Cuadro 19), lo cual parece incongruente pero debe considerarse que los frutos producidos no tienen un tamaño uniforme, pero si tienen estrecha relación con el rendimiento de fruto (Cuadro 47).

Los resultados del efecto del K⁺ sobre la MSf concuerda con los resultados obtenidos en tomate, en las cuales el incremento de potasio en la solución nutritiva no propició

ganancia en la concentración porcentual de MSf (Bugarín, *et al.*, 2002). Pero difieren de la respuesta de chile jalapeño, en el que el incremento en las dosis de fósforo y la interacción de las dosis de fósforo x potasio incrementaron la producción de MSf de chile jalapeño cultivado en suelo vertisol, y la mayor cantidad de MSf se dio en las plantas que recibieron 1000 pm de fósforo y 500 ppm de potasio (Zúñiga, 2003).

La función de respuesta para la producción de MS del fruto de las plantas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la última etapa fenológica (C4, 162ddt) se muestra a continuación:

$$\text{MSf} = 696.777 - 50.842\text{N} + 128.703\text{P} - 153.523\text{K} + 3.167\text{N}^2 + 3.082\text{P}^2 + 12.197\text{K}^2 + 0.937\text{NP} + 0.268\text{NK} - 19.092\text{PK}$$

Donde: MSf es la producción de MS del fruto (g planta^{-1}) en la etapa fenológica C4 (162 ddt); y los demás términos ya fueron definidos. El coeficiente de determinación ($r^2=0.65$) de esta función y su variabilidad ($\text{CV}=24.3\%$) señalan que el modelo obtenido no explica adecuadamente la producción de MSf a la aplicación de soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ .

5.2.3.1.5. Producción de materia seca total de la planta

El valor máximo de la MST producida por planta ($188.7 \text{ g planta}^{-1}$), se obtuvo en las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y el valor mínimo ($98.2 \text{ g planta}^{-1}$) correspondió a las plantas del tratamiento 1 (6, 0.5, 6). El análisis estadístico de esta variable en la etapa fenológica C4 (162 ddt), reportó diferencias altamente significativas, tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0001$) como en el de regresión ($\alpha<0.0001$) a los factores evaluados. La prueba de comparación de medias de tratamientos arrojó los resultados que se presentan en el Cuadro 28, en el cual se puede observar que a los 162 ddt la mayor producción de MST se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7), seguido del tratamiento 12 (8, 1.0, 9) los cuales son estadísticamente diferentes, y de ello se puede deducir que la reducción de la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva propició la reducción de la producción de la MST de las plantas de chile poblano, a pesar del incremento de la concentración de K^+ en la solución nutritiva.

La comparación de medias de tratamiento de cada una de las etapas fenológicas (Cuadro 28) indica que se encontraron efectos significativos en todas las etapas fenológicas a la aplicación de diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- , y K^+ en la solución nutritiva sobre la producción de MST de las plantas de chile poblano. Se puede apreciar que el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) fue el mejor en todas las evaluaciones, en tanto que los tratamientos que contenían 6 me L^{-1} de NO_3^- fueron los que produjeron las menores cantidades de MST, lo cual indica la importancia de que este nutriente se aporte en las concentraciones adecuadas durante el desarrollo del cultivo y es determinante en la producción final de fruto (Cuadro 46).

Cuadro 28. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de materia seca total de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Materia seca total (g planta^{-1}), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|---|-----------|---------|---------|---------|-----------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 1.3 f [†] | 7.7 d | 31.9 b | 47.6 ab | 70.5 ab | 98.20 c |
| 2 | 2.0 bcd | 10.8 abcd | 29.1 b | 61.2 ab | 69.4 ab | 125.9 bc |
| 3 | 1.3 ef | 7.7 d | 31.3 b | 50.1 ab | 51.0 b | 137.3 abc |
| 4 | 2.2 abc | 12.6 ab | 42.8 ab | 61.5 ab | 77.4 ab | 153.6 abc |
| 5 | 1.5 def | 8.3 cd | 37.5 ab | 43.3 b | 60.3 ab | 120.7 bc |
| 6 | 2.4 ab | 12.3 ab | 43.7 ab | 54.3 ab | 64.3 ab | 136.4 abc |
| 7 | 1.4 ef | 8.8 cd | 34.1 b | 59.7 ab | 76.2 ab | 105.6 c |
| 8 | 2.4 ab | 11.6 abc | 50.3 a | 67.6 ab | 85.5 ab | 149.1 abc |
| 9 | 1.9 bcde | 10.0 bcd | 39.0 ab | 61.8 ab | 87.3 ab | 111.8 c |
| 10 | 2.8 a | 13.601a | 51.6 a | 72.0 a | 93.9 a | 188.7 a |
| 11 | 1.8 cdef | 8.8 abc | 41.8 ab | 60.3 ab | 93.0 ab | 114.6 bc |
| 12 | 1.7 def | 9.9 bcd | 42.9 ab | 61.7 ab | 55.7 ab | 169.9 ab |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

Estos resultados presentan un comportamiento similar al obtenido en la producción de MST de plantas de chile jalapeño, las cuales respondieron al incremento de la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva, aunque no a la concentración de potasio (Alonso, 2001). Las plantas de chile dulce incrementaron su producción de MST al aumentar la dosis de nitrógeno de 70 a 210 kg ha^{-1} . También las plantas de salvia presentaron resultados similares ya que la MST se incremento significativamente al incrementar la concentración de la solución nutritiva (Kang y van Iersel, 2004). Pero difieren de la respuesta de las plantas de tomate, en las que las

concentraciones de potasio de 6 y 9 me L⁻¹, en la solución nutritiva, promovieron mejor crecimiento vegetal que con 3 me L⁻¹ de potasio (Bugarín *et al.*, 2002).

La composición mineral y la dosis total de iones en el medio tienen una gran influencia significativa sobre la producción de MST. En plantas de calabaza zucchini, el nitrógeno también fue el nutrimento que mostró mayor efecto positivo sobre la producción de biomasa (Colla *et al.*, 2004a). La MST acumulada en las plantas de chile jalapeño cultivado en suelo vertisol, se incrementó al aumentar las dosis de fósforo y potasio, observándose mayor respuesta al fósforo aplicado (Zúñiga, 2003). También en chile ancho San Luis, las bajas concentraciones de fósforo en la solución nutritiva, propiciaron la reducción de la producción de MST (Davies *et al.*, 1999).

La falta de respuesta a la aplicación de diferentes dosis de fósforo en la solución nutritiva para este cultivo es similar a la respuesta de lechuga y tabaco, y puede deberse a que la mayor parte del fósforo acumulado en el tejido vegetal no está asociado con el crecimiento de la planta, pero es una forma almacenado/metabólico que probablemente esté dominado por fósforo inorgánico y ésteres de fósforo, con un pequeño componente enzimático. Los límites para la acumulación del fósforo estructural, probablemente sea dominado por fosfolípidos (Broadley *et al.*, 2002).

La función de respuesta para el efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺ sobre la producción de MS total de las plantas de chile poblano en la última etapa fenológica, se muestra a continuación:

$$\text{MST} = 995.171 - 57.272\text{N} + 100.866\text{P} - 214.995\text{K} + 3.530\text{N}^2 - 1.521\text{P}^2 + 16.088\text{K}^2 + 3.152\text{NP} + 0.625\text{NK} - 15.077\text{PK}$$

Donde: MST es la producción de MS total (g planta⁻¹) de las plantas de chile poblano en la etapa fenológica C4 (162 ddt); y los demás términos ya fueron definidos. El valor del coeficiente de determinación (r²=0.70) de esta función y su variabilidad (CV=14.5%) permiten concluir que el modelo obtenido explica la producción de MS total de las plantas de chile poblano a la aplicación de soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺.

5.2.3.1.6. Producción de materia seca de la parte aérea

El valor máximo de la producción de la MSa (175.2 g planta⁻¹) se obtuvo en las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7) en tanto que el mínimo (87.0 g planta⁻¹) se produjo en las plantas del tratamiento 1 (6, 0.5, 6). El resultado del análisis estadístico de la respuesta de esta variable arrojó diferencias altamente significativas a los factores evaluados, tanto en el análisis de varianza ($\alpha < 0.0001$) como en el de regresión ($\alpha < 0.0001$).

La comparación de medias de tratamientos (Cuadro 29), señala que la mayor producción de MSa se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7); enseguida se situó el tratamiento 8 (10, 1.5, 8), los cuales fueron estadísticamente diferentes entre sí. Se puede apreciar que en el tratamiento 8 se reduce la concentración de NO₃⁻ y se aumentan las concentraciones de H₂PO₄⁻ y de K⁺, lo cual permitió obtener una buena respuesta en la producción de MSa de las plantas de chile poblano, pero sin superar el efecto de la concentración de NO₃⁻ del tratamiento 10.

Cuadro 29. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺, sobre la producción de materia seca de la parte aérea de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Materia seca de la parte aérea (g planta ⁻¹), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|-----------|---------|---------|---------|------------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 0.7 g [†] | 5.6 d | 27.6 b | 40.7 ab | 61.4 ab | 87.0 d |
| 2 | 1.3 bcd | 7.7 abcde | 25.0 b | 52.6 ab | 59.3 ab | 112.9 bcd |
| 3 | 0.8 fg | 5.1 e | 27.8 b | 44.6 ab | 44.9 b | 126.5 abcd |
| 4 | 1.5 bc | 9.2 ab | 39.2 ab | 53.4 ab | 69.5 ab | 141.5 abc |
| 5 | 0.9 defg | 5.8 cde | 34.0 ab | 36.8 b | 53.3 ab | 111.0 bcd |
| 6 | 1.6 abc | 8.7 abc | 37.8 ab | 46.1 ab | 55.0 ab | 125.9 abcd |
| 7 | 0.8 efg | 6.2 bcde | 30.6 b | 52.0 ab | 68.5 ab | 95.2 cd |
| 8 | 1.6 ab | 8.3 abcd | 45.9 a | 59.1 ab | 76.3 ab | 136.0 abcd |
| 9 | 1.2 bcde | 7.2 bcde | 34.7 ab | 53.9 ab | 79.5 ab | 101.4 cd |
| 10 | 1.9 a | 9.9 a | 46.9 a | 63.3 a | 81.8 ab | 175.2 a |
| 11 | 1.2 cdef | 6.2 bcde | 37.5 ab | 53.9 ab | 84.9 a | 103.2 bcd |
| 12 | 1.0 defg | 6.7 bcde | 37.9 ab | 53.2 ab | 47.2 ab | 154.1 ab |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)
 CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

La prueba de comparación de medias de tratamientos de las diferentes etapas fenológicas (Cuadro 29), arrojó diferencias significativas en todas las etapas fenológicas. El tratamiento 10 (12, 1.0, 7) fue el que produjo la mayor cantidad de MSa durante todo el experimento, excepto en la etapa C3 (144 ddt). También es notorio que las mejores respuestas para esta variable las propiciaron las soluciones nutritivas que contenían niveles de 10 a 12 me L⁻¹ de NO₃⁻ y que las peores respuestas se tuvieron al aplicar soluciones nutritivas conteniendo 6 me L⁻¹ de NO₃⁻. No se encontraron reportes específicos sobre la respuesta de la producción de MSa a la aplicación de nutrimentos para el cultivo de chile o de otras especies.

La función de respuesta para la producción de MS de la parte aérea de las plantas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺, se obtuvo mediante el análisis de regresión y es la que se muestra a continuación:

$$MSa = 904.940 - 56.774N + 108.092P - 193.354K + 3.481N^2 - 0.856P^2 + 14.649K^2 + 2.979NP + 0.624NK - 16.244PK$$

Donde: MSa es la producción de MS (g planta⁻¹) de la parte aérea (hoja+tallo+fruto) de las plantas de chile poblano, y los restantes términos ya se definieron anteriormente. La función de respuesta descrita con anterioridad tiene un coeficiente de determinación alto (r²=0.71) y poca variabilidad (CV=14.8%), lo cual permite asumir que el modelo obtenido explica la producción de MSa de las plantas de chile poblano a la aplicación de soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺.

5.2.3.1.7. Relación de la producción de materia seca de la parte aérea y la raíz

En la última evaluación (C4, 160 ddt), el valor máximo (13.0) de esta variable se obtuvo en las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7), en tanto que el mínimo (8.2) correspondió a las plantas del tratamiento 12 (8, 1.0, 9). Al realizar el análisis estadístico de los resultados de esta variable al final del experimento no se encontraron diferencias significativas en el análisis de varianza, ni en el de regresión a los factores evaluados.

El análisis estadístico de los resultados de las etapas fenológicas del cultivo arrojó diferencias significativas en dos de las seis etapas. En la prueba de comparación de medias (Cuadro 30), se puede observar que en las etapas de crecimiento vegetativo (36 ddt) y tercer corte (C3, 144 ddt) la aplicación de los tratamientos afectó la relación de producción de MSa/MSr. En el primer caso, la mejor respuesta se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7), y en el segundo con el tratamiento 11 (8, 2.0, 7), y se puede deducir que se obtienen buenos resultados de esta variable cuando se incrementan las concentraciones de NO_3^- en la solución nutritiva de 8 a 12 me L^{-1} , lo cual también se aplica para los mejores tratamientos de las otras cuatro etapas, y concuerda con los resultados de producción de MS para cada una de las variables que conforman la base de esta relación.

Para esta variable, no se muestra la función que explica la respuesta de la relación de producción de MSa/MSr de las plantas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno, fósforo y potasio en la última etapa fenológica, debido a que no se tuvieron diferencias significativas de los tratamientos.

Cuadro 30. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la relación de producción de materia seca (MS) de la parte aérea y de la raíz de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Relación de MS de la parte aérea/MS de la raíz, por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|-------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 1.2 b [†] | 2.6 a | 6.8 a | 6.3 a | 7.0 ab | 8.2 a |
| 2 | 1.9 ab | 2.5 a | 6.2 a | 6.1 a | 5.3 b | 9.4 a |
| 3 | 1.6 ab | 2.0 a | 8.6 a | 8.1 a | 7.3 ab | 11.7 a |
| 4 | 1.9 ab | 2.7 a | 10.9 a | 6.1 a | 8.8 ab | 11.9 a |
| 5 | 1.6 ab | 2.4 a | 9.6 a | 5.8 a | 7.6 ab | 11.5 a |
| 6 | 1.9 ab | 2.5 a | 6.5 a | 5.7 a | 5.9 b | 12.0 a |
| 7 | 1.6 ab | 2.5 a | 9.1 a | 6.7 a | 8.9 ab | 9.3 a |
| 8 | 2.0 a | 2.6 a | 10.5 a | 7.1 a | 8.4 ab | 10.6 a |
| 9 | 2.0 a | 2.6 a | 8.2 a | 6.9 a | 10.1 ab | 9.9 a |
| 10 | 2.2 a | 2.7 a | 10.2 a | 7.2 a | 6.9 ab | 13.0 a |
| 11 | 1.8 ab | 2.4 a | 8.8 a | 8.6 a | 10.9 a | 9.1 a |
| 12 | 1.5 ab | 2.0 a | 7.7 a | 6.3 a | 5.7 b | 10.4 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

El chile dulce mantiene una tasa constante de distribución de MSr y el vástago completo tanto en crecimiento no restringido de las raíces como bajo condiciones restrictivas de raíz (Xu *et al.*, 2001a). La relación entre la MSr/MSa es proporcional a la relación entre la actividad específica del vástago y de las raíces. Los factores que propician el incremento de la actividad específica del sistema radical, tales como el aporte adecuado de agua y macronutrientes (especialmente nitrógeno), el aumento del potencial hídrico y una temperatura óptima para el funcionamiento de las raíces reducen la distribución proporcional de MS hacia las raíces (Peil y Gálvez, 2005).

5.2.3.1.8. Relación de la producción de materia seca del tallo y la raíz

El valor máximo (3.6) de la relación de producción de MSt/MSr se observó en las plantas del tratamiento 8 (10, 1.5, 8) y el valor mínimo (2.7) correspondió a las plantas del tratamiento 12 (8, 1.0, 9). Al realizar el análisis estadístico de los resultados de esta variable al final del experimento se encontraron diferencias significativas en el análisis de varianza ($\alpha=0.0119$) y altamente significativas ($\alpha=0.0073$) a los factores evaluados en el análisis de regresión.

Los resultados de la comparación de medias de tratamientos (Cuadro 31), muestran que el mayor valor de la relación de producción de MSt/MSr (3.6) se obtuvo con el tratamiento 8 (10, 1.5, 8) y enseguida se situó el tratamiento 10 (12, 1.0, 7), los cuales fueron estadísticamente diferentes entre sí. Se puede apreciar que en el tratamiento 10 la concentración de NO_3^- es mayor, pero las concentraciones de H_2PO_4^- y de K^+ , son menores, que los del tratamiento 8, lo cual también permitió obtener una buena respuesta en la producción de MSt de las plantas de chile poblano.

En el mismo Cuadro 31 se observa que el análisis estadístico para las diferentes etapas fenológicas solo detectó diferencias estadísticas significativas en la etapa de crecimiento (36 ddt). La mayor relación de producción de MS del tallo y la raíz se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y la menor se registró en las plantas del tratamiento 1 (6, 0.5, 6), en tanto que los resultados de la última evaluación ya fue analizada.

Cuadro 31. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la relación de producción de materia seca del tallo y de la raíz de plantas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Relación de MS del tallo/MS de la raíz, por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|-------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 0.5 b [†] | 1.2 a | 1.5 a | 2.6 a | 2.8 a | 2.7 b |
| 2 | 0.8 ab | 1.2 a | 1.6 a | 2.5 a | 2.7 a | 2.9 ab |
| 3 | 0.7 ab | 1.0 a | 1.7 a | 2.7 a | 3.1 a | 3.1 ab |
| 4 | 0.9 ab | 1.3 a | 2.1 a | 2.5 a | 3.0 a | 3.3 ab |
| 5 | 0.7 ab | 1.1 a | 1.7 a | 2.3 a | 2.5 a | 3.1 ab |
| 6 | 0.8 ab | 1.2 a | 1.9 a | 2.5 a | 2.6 a | 3.1 ab |
| 7 | 0.7 ab | 1.2 a | 1.9 a | 2.7 a | 2.8 a | 3.1 ab |
| 8 | 0.8 ab | 1.2 a | 2.0 a | 2.6 a | 2.9 a | 3.6 a |
| 9 | 0.8 ab | 1.3 a | 2.0 a | 2.5 a | 3.0 a | 3.3 ab |
| 10 | 1.0 a | 1.3 a | 2.0 a | 2.7 a | 2.9 a | 3.4 ab |
| 11 | 0.8 ab | 1.1 a | 1.8 a | 2.9 a | 2.8 a | 3.4 ab |
| 12 | 0.6 ab | 1.0 a | 1.7 a | 2.3 a | 2.7 a | 2.7 b |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

La composición mineral y la dosis total de iones en el medio tiene gran influencia significativa sobre el peso seco de la relación tallo:raíz. En plantas de calabaza zucchini (Colla *et al.*, 2004a) y chile dulce (Bar-Tal *et al.*, 2001b), el nitrógeno fue el nutrimento que mostró el mayor impacto positivo sobre la producción del peso seco de la relación tallo:raíz. El menor crecimiento vegetal con base al peso seco de la relación tallo:raíz se obtuvo en los tratamientos con alta proporción de PO_4^{3-} (Colla *et al.*, 2004a). Las plantas de caléndula también mostraron un mayor peso seco de la relación tallo:raíz con altas dosis de fósforo en la solución nutritiva (Borch *et al.*, 2003). Contrario a lo anterior, en plantas de chile ancho San Luis, las bajas concentraciones de fósforo en la solución nutritiva, propiciaron la reducción de la producción de MS de la relación tallo:raíz (Davies *et al.*, 1999).

La función de respuesta obtenida para la relación de producción de MSt/MSr de las plantas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ para la etapa de 162 ddt, es la que se presenta a continuación:

$$\text{RTR} = - 8.174 - 0.031\text{N} + 0.885\text{P} + 3.003\text{K} - 0.004\text{N}^2 - 0.164\text{P}^2 - 0.206\text{K}^2 + 0.061\text{NP} + 0.012\text{NK} - 0.110\text{PK}$$

Donde: RTR es la relación de producción de MSt/MSr, y los restantes términos de la función de respuesta fueron definidos con anterioridad. La función de respuesta obtenida tiene un coeficiente de determinación bajo ($r^2=0.58$) y aunque su variabilidad es baja ($CV=9.0\%$), no explica el comportamiento de esta variable a la aplicación de soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ .

5.2.3.2. Resumen del análisis de la producción de materia seca

El crecimiento de las plantas de chile poblano en función de su producción de materia seca fue motivo de este apartado y también se incluyó un componente del rendimiento que es la producción de MSf, el cual se analizará en conjunto y por separado.

La producción de MSh tuvo respuesta significativa en cinco de las seis etapas fenológicas; la MSt tuvo diferencias significativas en tres de las seis etapas; y la MSr y la MSf mostraron significancia en cuatro de las seis, y, finalmente, la producción de materia seca de toda la planta presentó respuesta en todas las etapas fenológicas. En todas la etapas mencionadas, el incremento de las concentraciones de NO_3^- en la solución nutritiva propiciaron el incremento de dichas variables, lo cual indica que este nutrimento es el principal responsable del crecimiento de la planta de chile poblano. Por otro lado, las concentraciones de H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva también tuvieron efecto sobre la producción de MS tal como lo indican los resultados de los análisis estadísticos, aunque la tendencia de las mismas no fue uniforme. En todos los casos, el mejor tratamiento fue el 10 (12, 1.0, 7) equivalente a la solución universal Steiner.

Los resultados obtenidos refuerzan la decisión de no rechazar la hipótesis con relación al nitrógeno, ya que su aplicación incrementó el crecimiento (producción de MS) de las plantas de chile poblano en diferentes etapas fenológicas; sin embargo, los efectos del H_2PO_4^- y del K^+ no fueron concluyentes sobre estas variables, por lo que la hipótesis solo se puede aceptar parcialmente.

La producción de MSf mostró significancia en cuatro de las seis etapas fenológicas y se incrementó al aumentar el nivel de NO_3^- en la solución nutritiva, de tal manera que este nutrimento tuvo un efecto importante sobre el rendimiento de fruto, mientras que la aplicación de H_2PO_4^- y K^+ no mostró un efecto tan marcado sobre esta variable. Con esto se reafirma el no rechazo de la segunda hipótesis con relación al efecto del nitrógeno, pero con reservas para H_2PO_4^- y K^+ .

5.2.4. Concentración nutrimental en las hojas

La interpretación de los resultados del análisis foliar se realizaron con base en los intervalos de suficiencia para el cultivo de chile sugeridos por Mills y Jones (1996), considerando dos valores, en función de la edad de la planta: para los muestreos realizados a los 18, 36, 54 y 72 ddt se emplearon los intervalos de suficiencia para plantas en crecimiento y para los restantes los reportados como intervalos de suficiencia para plantas en fructificación (Cuadro 32). Cabe señalar que estos valores no fueron determinados para el cultivo de chile poblano, sino para chile bell; sin embargo, ante la falta de reportes específicos para este tipo de chile, se tomaron como base para la interpretación de los resultados.

Cuadro 32. Niveles de suficiencia de algunos nutrimentos para plantas de chile en etapas de crecimiento y fructificación (Mills y Jones, 1996).

| Nutrimento | Plantas en crecimiento (porcentaje) | Plantas en fructificación (porcentaje) |
|------------|--|---|
| Nitrógeno | 4.00 a 6.00 | 3.50 a 5.00 |
| Fósforo | 0.35 a 1.00 | 0.22 a 0.70 |
| Potasio | 4.00 a 6.00 | 3.50 a 4.50 |

La definición absoluta de la cantidad de cada nutrimento individual que es óptima para asegurar el crecimiento y desarrollo de la planta, es difícil. De hecho, el contenido nutrimental en el tejido vegetal varía con la especie, cultivar, estado de desarrollo, parte de la planta, y composición (relación entre nutrimentos y forma química) de la solución nutritiva (Santamaría *et al.*, 2004). El requerimiento mineral de un cultivo es difícil de determinar, y la interpretación de la composición química foliar no es fácil (García *et al.*, 2004).

La concentración de nutrimentos puede ser completamente diluida y aún soportar el crecimiento rápido, tanto como si la razón de nutrimentos está bien relacionada con los requerimientos del cultivo (Gent, 2004).

5.2.4.1. Concentración promedio de nutrimentos en las hojas

Los resultados del análisis foliar para nitrógeno, mostraron que en la etapa de crecimiento, sólo a los 18 ddt se encontró una concentración mayor al 4.0%, dentro del intervalo de suficiencia aunque muy cercano al valor mínimo. Se observó una tendencia a la reducción entre los 18 y 54 ddt y luego un ligero ascenso a los 72 ddt. A pesar de ello no se observaron síntomas de deficiencia, pero es posible que en esta etapa la “deficiencia de nitrógeno” causara algún efecto negativo sobre el crecimiento de la planta, aunque no fuera visible. También es probable que en esta etapa las concentraciones reportadas fueran las adecuadas para el chile poblano puesto que el crecimiento de las plantas aparentemente no se vió afectado por la “deficiencia de nitrógeno”. Para la etapa de fructificación, los valores de la concentración de nitrógeno en todos los muestreos se encuentran dentro del intervalo de suficiencia (3.50%), lo cual indica que en esta etapa no se tuvieron deficiencias de este nutrimento por lo que no fue limitante en el desarrollo del cultivo (Cuadro 33).

Los resultados para fósforo muestran que solo en uno de los cuatro muestreos (72 ddt) de la etapa de crecimiento, las hojas presentaron una concentración por debajo del intervalo de suficiencia, lo cual pudo deberse a que en esta etapa la planta estaba en la etapa de llenado de fruto y era este órgano el de mayor demanda y no la acumulación en las hojas. Posteriormente, entre los 90 y los 162 ddt, las concentraciones de fósforo en la hoja se situaron dentro del intervalo de suficiencia (0.22 a 0.70%) y aunque no tuvieron tendencia al incremento o disminución se asume que en la etapa de producción no tuvo efecto negativo sobre el desarrollo de las plantas evaluadas (Cuadro 33).

La concentración de potasio en las hojas de las plantas de chile durante el crecimiento siempre estuvo por debajo del intervalo de suficiencia, por lo que es muy probable que se tuviera un efecto negativo sobre el crecimiento de las plantas. A pesar de las bajas concentraciones detectadas no se apreciaron síntomas visuales de deficiencia de este nutriente y tampoco algún síntoma de crecimiento anormal, por lo que también es posible que el requerimiento de potasio para el chile poblano sea bajo, por lo que su concentración en las soluciones nutritivas fue adecuada. Xu *et al.* (2002) indicaron que las plantas de chile dulce alimentadas con NO_3^- alcanzaron su máximo rendimiento con tan solo 2.5 mM de potasio en la solución nutritiva. Además, en plantas de lechuga se observó que el suministro de un bajo nivel de nitrógeno en la solución nutritiva redujo la concentración de NO_3^- en el tejido, pero sin afectar la tasa de crecimiento (Gent, 2003).

Se observó una fuerte disminución de la concentración del potasio en las hojas entre los 18 y 36 ddt y posteriormente una ligera tendencia al incremento hasta los 72 ddt. En la etapa de fructificación, también se observó una fuerte reducción entre los 90 y 108 ddt hasta niveles muy bajos, pero posteriormente los niveles se incrementaron hasta situarse por encima del nivel de suficiencia mínimo (3.5%) en los tres últimos muestreos (Cuadro 33). A pesar de las bajas concentraciones de potasio durante el inicio de la etapa de fructificación, tampoco se apreciaron síntomas visuales de deficiencia en las hojas ni en los frutos cosechados. Al estar situado por debajo del nivel de suficiencia a los 90 y 108 ddt, se puede inferir un efecto detrimental sobre el crecimiento y la producción y calidad del fruto, principalmente con relación a la calidad del mismo dado que esta es una de las principales funciones del potasio en la planta, sobre todo en el caso de las hortalizas (Adams, 1994; Baghour *et al.*, 2001; Domínguez, 1993).

Cuadro 33. Valor promedio de la concentración (porcentaje) de tres nutrientes en hojas de las plantas de chile poblano de diferente edad.

| Nutriente | Plantas en crecimiento (ddt) | | | | Plantas en producción (ddt) | | | | |
|-----------|------------------------------|------|------|------|-----------------------------|------|------|------|------|
| | 18 | 36 | 54 | 72 | 90 | 108 | 126 | 144 | 162 |
| Nitrógeno | 4.17 | 3.53 | 3.00 | 3.63 | 3.89 | 3.68 | 4.20 | 4.26 | 3.93 |
| Fósforo | 0.82 | 0.51 | 0.37 | 0.32 | 0.39 | 0.36 | 0.48 | 0.42 | 0.36 |
| Potasio | 3.84 | 2.72 | 2.74 | 2.80 | 2.26 | 2.29 | 3.60 | 3.52 | 3.58 |

El comportamiento de la concentración nutrimental en las hojas de chile poblano, es una evidencia de que la nutrición del cultivo se mantuvo bajo un régimen adecuado de suficiencia durante todo el ciclo, lo que pudo lograrse debido al método de aplicación de las soluciones nutritivas, permitiendo obtener una alta uniformidad de aplicación en tiempo y espacio. El resultado fue un buen crecimiento y desarrollo de las plantas de chile poblano, el cual, como ya se mencionó, superó la altura y vigor promedio de las plantas que se obtienen al cultivar este híbrido de chile poblano, y que también se reflejó en la producción de fruto como se verá más adelante.

5.2.4.2. Análisis estadístico de la concentración de nutrimentos en las hojas

Los resultados del análisis foliar se sometieron al análisis de varianza y de regresión al igual que todas las variables evaluadas. Los resultados indican que no se obtuvieron respuestas significativas del efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva sobre la concentración foliar de nitrógeno y potasio en la última etapa (C4, 162 ddt).

La concentración nutrimental en las hojas del cultivo es un parámetro relativo, ya que las plantas sólo absorben las cantidades requeridas para su crecimiento y desarrollo normal y que, en este caso, la falta de diferencia estadística significativa sólo puede ser un indicador de que todas las plantas tuvieron el abastecimiento nutrimental necesario para realizar sus funciones y que no se obtuvo una mayor concentración pues no se presentaron absorciones de lujo debido a que las soluciones nutritivas estuvieron bien balanceadas y manejadas con la cantidad y frecuencia de aplicación adecuadas, permitiendo que el cultivo siempre estuviera bajo condiciones óptimas de nutrición debido sobre todo a la forma de aplicación de las soluciones nutritivas.

Al realizar el análisis estadístico para cada etapa fenológica del cultivo, se detectaron respuestas significativas de la concentración foliar de dichos nutrimentos, a la aplicación de diferentes dosis en la solución nutritiva, en algunas etapas fenológicas. Los resultados de la comparación de medias de tratamientos por nutrimento y por etapa fenológica se presentan en los Cuadros del 34 al 36.

5.2.4.2.1. Concentración foliar de nitrógeno

El análisis estadístico de los resultados del análisis foliar para cada etapa fenológica, indica que la aplicación de los tratamientos no tuvo efecto significativo sobre la concentración de nitrógeno en hojas de chile poblano. En la etapa C3 (144 ddt) se encontró la mayor concentración de nitrógeno en las hojas (4.76%) en el tratamiento 9 (8, 1.0, 7). Sin embargo, durante todo el ciclo de cultivo la concentración foliar de este nutrimento estuvo regida por las concentraciones de 8 a 10 me L⁻¹ de NO₃⁻ en la solución nutritiva, pues las mayores concentraciones siempre correspondieron a los tratamientos con dichos niveles, y que las concentraciones de H₂PO₄⁻ y K⁺ en las soluciones nutritivas no parecieron tener efecto sobre esta variable. La falta de efecto significativo se puede interpretar como un efecto de la necesidad de la planta por el NO₃⁻ ya que al estar siempre disponible en la solución nutritiva, nunca tuvo deficiencia del mismo y que debido a eso el crecimiento y producción de fruto fue aceptable en la mayoría de los tratamientos evaluados, ya que durante la etapa de producción las plantas de todos los tratamientos reportaron concentraciones foliares de nitrógeno que se ubicaron dentro del intervalo de suficiencia (datos no reportados).

El tamaño, vigor y producción que alcanzaron las plantas también fue un indicador de que durante la etapa de crecimiento y floración-fructificación las concentraciones de nitrógeno en las hojas fueron suficientes para este tipo de chile, aunque los niveles de suficiencia sugeridos por Mills y Jones (1996) indiquen lo contrario; esto se puede interpretar como que los niveles de suficiencia de nitrógeno para el cultivo de chile poblano son menores, y que la concentración foliar de nitrógeno para el diagnóstico en este tipo de chile se puede ubicar entre 3 y 4% para estas etapas fenológicas.

La concentración de nitrógeno en las hojas de chile jalapeño se incrementó linealmente al incrementar la tasa de nitrógeno arriba de 15 mM y luego se estabilizó (Johnson y Decoteau, 1996). El contenido de nitrógeno en las hojas de chile dulce se incrementó al aumentar tanto la concentración de nitrógeno como la de potasio en la solución nutritiva (Xu *et al.*, 2001b; Xu *et al.*, 2002). El incremento de la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva propició el aumento de su concentración en hojas

de chile dulce (Bar-Tal *et al.*, 2001a), chile serrano (Alonso, 2001), calabaza zucchini (Colla *et al.*, 2004a) y lechuga (Gent, 2003). Asimismo, la concentración de NO_3^- en el tejido se redujo por el tratamiento con bajo nivel de nitrógeno en la solución nutritiva sin afectar la tasa de crecimiento (Gent, 2003). El efecto positivo del nitrógeno puede deberse a que el incremento de su concentración en la solución nutritiva aumenta la eficiencia de absorción de las raíces, como lo reportaron Conversa *et al.* (2004). Sin embargo, cuando se hacen aplicaciones de potasio sin suficiente nitrógeno (Mills y Jones, 1996) o cuando la relación potasio:nitrógeno es mayor a 1 (Khosla y Papadopoulos, 2001) la concentración del nitrógeno en las hojas tiende a reducirse (Davies *et al.*, 1999)

La falta de respuesta a las aplicaciones de potasio y nitrógeno, no coinciden con los reportes de otros autores. Las dosis de potasio afectaron la concentración foliar de nitrógeno, con la mayor concentración en la dosis de 50 kg ha^{-1} de potasio en chile serrano (Alonso, 2001). En plantas de tomate, la aplicación de potasio incrementó la concentración de nitrógeno en las hojas (Gent, 2004). Davies *et al.* (1999), reportaron que el incremento de las dosis de fósforo en la solución nutritiva dieron por resultado la reducción de la concentración de nitrógeno en las hojas de chile ancho San Luis y Júpiter, lo cual no concuerda exactamente con lo encontrado en nuestro estudio.

5.2.4.2.2. Concentración foliar de fósforo

Los resultados del análisis estadístico para el efecto de la aplicación de diferentes niveles de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en las soluciones nutritivas sobre la concentración de fósforo en el tejido foliar para cada etapa fenológica (Cuadro 34), indican que la aplicación de los tratamientos tuvo efecto significativo en las primeras cuatro etapas fenológicas del cultivo, y en los dos últimos cortes no se presentaron diferencias significativas. En la etapa de crecimiento vegetativo (36 ddt) se encontró la mayor concentración de fósforo en las hojas (0.70%) de las plantas del tratamiento 7 (6, 1.5, 8), en tanto que la menor concentración (0.24%) se presentó en la etapa de floración-fructificación (54 ddt) y correspondió al tratamiento 10 (12, 1.0, 7).

Para este nutrimento también se aprecia que durante todo el ciclo de cultivo la concentración foliar de fósforo estuvo determinada por la concentración de H_2PO_4^- en la solución nutritiva aplicada, y que las mayores concentraciones se obtuvieron cuando las concentraciones de H_2PO_4^- en la solución nutritiva varió entre 1.5 y 2.0 me L^{-1} , mientras que las menores concentraciones foliares se tuvieron en los tratamientos que recibieron soluciones nutritivas con concentraciones de 0.5 y 1.0 me L^{-1} de H_2PO_4^- , independientemente de las concentraciones de NO_3^- y K^+ .

La aplicación de altas tasas de nitrógeno en la solución nutritiva redujo la concentración de fósforo en las hojas de chile dulce, debido a que se favoreció la absorción y traslocación de fósforo orgánico hasta los frutos; mientras que la fertilización con potasio no afectó significativamente la concentración foliar de fósforo en las hojas del mismo cultivo (Baghour *et al.*, 2001). El incremento de 0.5 a 2.5 mM de potasio en la solución nutritiva aumentó la concentración foliar de fósforo en chile dulce (Xu *et al.*, 2002). Los tratamientos de nitrógeno y potasio no tuvieron efecto significativo sobre la concentración foliar de fósforo en chile serrano (Alonso, 2001). En chile ancho San Luis y Júpiter el incremento de la concentración de fósforo en la solución nutritiva, aumentó la concentración foliar de fósforo (Davies *et al.*, 1999).

Cuadro 34. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la concentración de fósforo en hojas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Concentración de fósforo en la hoja (porcentaje), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|--------|---------|----------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 0.51 abc [†] | 0.33 b | 0.33 b | 0.45 abc | 0.36 a | 0.32 a |
| 2 | 0.43 c | 0.27 b | 0.26 b | 0.34 bc | 0.36 a | 0.31 a |
| 3 | 0.66 ab | 0.51 a | 0.51 ab | 0.64 a | 0.50 a | 0.35 a |
| 4 | 0.42 c | 0.36 b | 0.38 ab | 0.54 abc | 0.46 a | 0.41 a |
| 5 | 0.49 bc | 0.33 b | 0.36 ab | 0.52 abc | 0.49 a | 0.29 a |
| 6 | 0.40 c | 0.24 b | 0.26 b | 0.41 abc | 0.26 a | 0.29 a |
| 7 | 0.70 a | 0.52 a | 0.63 a | 0.44 abc | 0.45 a | 0.47 a |
| 8 | 0.47 bc | 0.36 b | 0.43 ab | 0.48 abc | 0.40 a | 0.41 a |
| 9 | 0.52 abc | 0.35 b | 0.50 ab | 0.56 abc | 0.38 a | 0.44 a |
| 10 | 0.36 c | 0.24 b | 0.26 b | 0.44 abc | 0.41 a | 0.33 a |
| 11 | 0.66 ab | 0.60 a | 0.42 ab | 0.63 ab | 0.50 a | 0.42 a |
| 12 | 0.55 abc | 0.36 b | 0.38 ab | 0.33 c | 0.46 a | 0.36 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)
 CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

Los reportes de la respuesta de plantas de lechuga a las aplicaciones de fósforo sobre su concentración foliar son contradictorias. Gent (2003), indicó que la reducción del suministro de fósforo en la solución nutritiva no afectó la concentración foliar de fósforo, mientras que Broadley *et al.* (2002) reportaron efectos a la aplicación de fósforo sobre el contenido de fósforo en el tejido foliar, alcanzando incluso niveles de exceso (1%) debido al abundante suministro de fósforo. En las plantas de berenjena, se reportó nula dependencia entre nitrógeno y fósforo (Zipelevish *et al.*, 2000).

5.2.4.2.3. Concentración foliar de potasio

Los resultados de la comparación de medias de tratamientos para el efecto de la aplicación de diferentes niveles de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en las soluciones nutritivas sobre la concentración de potasio en el tejido foliar para cada etapa fenológica (Cuadro 35), indican que la aplicación de los tratamientos solo tuvo efecto significativo en la etapa de floración-fructificación (54 ddt), en tanto que en las otras etapas no se presentaron diferencias significativas. En esta etapa, la mayor concentración de potasio en la hoja (4.09%) se encontró en las plantas del tratamiento 12 (8, 1.0, 9), en tanto que la menor concentración (2.33%) correspondió a las plantas del tratamiento 4 (10, 1.5, 6). No se aprecia una relación directa entre la concentración de K^+ en la solución nutritiva y su concentración foliar, pues se obtuvo lo mismo con los niveles bajos (6 me L^{-1}) y alto (9 me L^{-1}). Tampoco se observó tendencia alguna con la concentración de NO_3^- y H_2PO_4^- en la solución nutritiva, y esto pudo deberse a un efecto antagónico con el calcio, lo cual explicaría las bajas concentraciones detectadas a lo largo del ciclo vegetativo. Cabe señalar que las concentraciones de Ca^{2+} en todas las soluciones nutritivas aplicadas (Cuadro 5) fluctuaron entre 8 y 9 me L^{-1} , lo cual lo situó como un nutriente con alta concentración en todos los tratamientos; esta alta concentración pudo dar lugar a una mayor absorción de Ca^{2+} por las plantas de chile.

Los niveles de nitrógeno y potasio están estrechamente relacionados en la mayoría de las plantas. La fuente de nitrógeno tiene relación con la acumulación de potasio, y el incremento de nitrógeno aumenta la acumulación de potasio (Mills y Jones, 1996).

En chile dulce el incremento de la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva propició el aumento de la concentración de potasio tanto en hojas jóvenes como en las viejas (Bar-Tal *et al.*, 2001a). En plantas de chile serrano, los tratamientos de nitrógeno no afectaron la concentración foliar de potasio (Alonso, 2001).

Cuadro 35. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la concentración de potasio en hojas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Concentración de potasio en la hoja (porcentaje), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 2.28 a [†] | 2.61 ab | 2.24 a | 3.81 a | 3.38 a | 3.34 a |
| 2 | 2.92 a | 2.75 ab | 2.51 a | 4.21 a | 3.73 a | 3.74 a |
| 3 | 2.66 a | 2.72 ab | 2.39 a | 3.29 a | 3.07 a | 3.64 a |
| 4 | 2.23 a | 2.33 b | 2.40 a | 3.26 a | 3.56 a | 3.48 a |
| 5 | 2.59 a | 2.77 ab | 2.24 a | 3.67 a | 3.68 a | 3.63 a |
| 6 | 2.84 a | 2.81 ab | 2.40 a | 4.02 a | 3.65 a | 4.00 a |
| 7 | 3.09 a | 2.84 ab | 2.38 a | 3.76 a | 3.64 a | 3.14 a |
| 8 | 2.48 a | 2.78 ab | 1.97 a | 3.08 a | 3.12 a | 3.59 a |
| 9 | 2.64 a | 2.92 ab | 1.84 a | 3.70 a | 4.09 a | 3.30 a |
| 10 | 3.14 a | 2.63 ab | 2.17 a | 3.76 a | 3.20 a | 3.80 a |
| 11 | 2.78 a | 2.71 ab | 2.35 a | 3.37 a | 3.77 a | 3.51 a |
| 12 | 2.97 a | 2.98 a | 2.20 a | 3.70 a | 3.30 a | 3.80 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

En cuanto al efecto de la concentración de potasio en la solución nutritiva, las dosis de potasio incrementaron su concentración foliar en chile serrano (Alonso, 2001), chile dulce (Xu *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2001a), chile jalapeño (Johnson y Decoteau, 1996), tomate (Bugarín *et al.*, 2002; Gent, 2004; Kang y van Iersel, 2004; Khosla y Papadopoulos, 2001), y calabaza zucchini (Colla *et al.*, 2004a).

5.2.4.3. Análisis de la concentración nutrimental en las hojas de chile poblano

La concentración nutrimental en las hojas del cultivo es un parámetro relativo, dado que las plantas sólo absorben las cantidades requeridas para su crecimiento y desarrollo normal y que la falta de diferencia estadística significativa sólo es un indicador de que todas las plantas tenían el abastecimiento nutrimental necesario para realizar sus funciones y que no se tuvo una mayor concentración pues no se tuvieron absorciones de lujo debido a que las soluciones nutritivas estuvieron bien

balanceadas y manejadas con la adecuada cantidad y frecuencia de aplicación, permitiendo que el cultivo siempre estuviera bajo condiciones adecuadas de nutrición debido sobre todo a la particularidad del sistema de hidroponía utilizado.

Las concentraciones foliares de nitrógeno y potasio solo presentaron efecto significativo a la aplicación de diferentes niveles de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en una etapa fenológica (C3 en el caso del nitrógeno; y FF para el potasio), mientras que las concentraciones de fósforo en las hojas mostraron efecto significativo en 4 de las 6 etapas fenológicas (CV, FF, C1, y C2). Aunque, por lo general, el incremento de la concentración del nutrimento en la solución nutritiva propicia un aumento en la concentración del mismo nutrimento en la hoja, la concentración está determinada en gran medida por la producción de materia seca. En este caso la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en las hojas de chile poblano, por sí solas, no parecen tener efecto alguno sobre el crecimiento y la producción de fruto.

5.2.5. Acumulación de nutrimentos en las hojas de chile poblano

El carácter relativo de los contenidos nutrimentales referidos anteriormente, hizo necesaria la determinación de las cantidades de nutrimentos acumuladas (g planta^{-1}) en el tejido de las hojas de chile poblano evaluadas. Para obtener la cantidad acumulada de nutrimento en cada evaluación, se tomó el valor de la MSh producida y se multiplicó por la concentración correspondiente de cada uno de los nutrimentos determinados en el análisis químico (Cuadro 36).

5.2.5.1. Acumulación media de nutrimentos en las hojas de chile poblano

La acumulación de nitrógeno en las hojas de las plantas de chile presentó una tendencia al incremento relacionada directamente con la producción de MSh la cual fue lenta en la etapa de crecimiento y rápida en la etapa de producción. El comportamiento de la acumulación de fósforo en las hojas presentó la misma tendencia que el del nitrógeno dado que también depende de la producción de MSh. Sin embargo, en este caso el incremento fue mucho menor sobre todo en la etapa de

crecimiento. La acumulación de potasio en las hojas de chile poblano siguió la misma tendencia a la del nitrógeno aunque con cantidades sensiblemente menores debido a los niveles de “insuficiencia” que se presentaron para este nutrimento.

Cuadro 36. Valor promedio de la cantidad (g planta⁻¹) acumulada de nutrimentos en hojas de las plantas de chile poblano en función de la edad de la planta.

| Tratamiento | Edad de las plantas (días después del transplante) | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 18 | 36 | 54 | 72 | 90 | 108 | 126 | 144 | 162 |
| Nitrógeno | 0.013 | 0.024 | 0.079 | 0.163 | 0.238 | 0.312 | 0.537 | 0.716 | 0.855 |
| Fósforo | 0.002 | 0.003 | 0.009 | 0.014 | 0.023 | 0.030 | 0.062 | 0.069 | 0.079 |
| Potasio | 0.012 | 0.019 | 0.071 | 0.125 | 0.139 | 0.194 | 0.465 | 0.578 | 0.786 |

5.2.5.2. Análisis estadístico de la acumulación de nutrimentos en las hojas

Los datos de la acumulación de nutrimentos, obtenidos a partir de los datos de la producción de MSh y de la concentración foliar, fueron sometidos al análisis de varianza y de regresión al igual que todas las variables evaluadas. Se obtuvieron diferencias significativas para la acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en el tejido foliar, por lo que en ellas se realizó el ajuste de los modelos que explican dichas respuestas.

5.2.5.2.1. Cantidad de nitrógeno acumulada en la hoja

El análisis de los resultados de la última evaluación (C4, 162 ddt) muestra que el valor máximo de nitrógeno acumulado (1.238 g planta⁻¹) se encontró en las hojas de las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y el valor mínimo (0.642 g planta⁻¹) correspondió a las plantas del tratamiento 3 (6, 1.5, 6). El análisis estadístico de la acumulación de nitrógeno en las hojas de chile poblano al final del experimento (162 ddt), indicó que tanto en el análisis de varianza como en el de regresión se encontraron diferencias altamente significativas ($\alpha < 0.0001$) entre los tratamientos aplicados, lo cual indica que la aplicación de diferentes niveles de NO₃⁻, H₂PO₄⁻, y K⁺ tuvo efecto significativo sobre la acumulación de nitrógeno en las hojas de chile poblano y que las mejores respuestas se obtuvieron con niveles de 10 a 12 me L⁻¹ de NO₃⁻ sin importar los niveles de H₂PO₄⁻, y K⁺ en la solución nutritiva.

En la última evaluación del experimento (162 ddt), la mayor acumulación de nitrógeno en las hojas de chile poblano ($1.238 \text{ g planta}^{-1}$) se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7), enseguida se situó el tratamiento 6 (10, 0.5, 8) y en tercer lugar el tratamiento 8 (10, 1.5, 8); estos dos últimos fueron estadísticamente iguales entre sí y diferentes del tratamiento 10. Con esta información se puede deducir que la diferencia estuvo determinada por la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva, pues al aumentar la concentración de NO_3^- , se incrementó la acumulación de nitrógeno en la hoja, debido a un efecto directo de la mayor disponibilidad de nitrógeno para la planta.

El análisis estadístico para cada etapa fenológica, reportó diferencias significativas en 4 de las 6 etapas. Los resultados de la prueba de comparación de medias por etapa fenológica (Cuadro 37), muestran que el mejor tratamiento fue el 10 (12, 1.0, 7). Los resultados permiten deducir que las concentraciones de 10 a 12 me L^{-1} de NO_3^- en la solución nutritiva favorecieron la mayor acumulación de nitrógeno en las hojas de chile poblano y las concentraciones de 6 me L^{-1} NO_3^- fueron las que indujeron la menor acumulación. Además, se aprecia que no se tuvieron efectos marcados de las concentraciones de H_2PO_4^- , y K^+ en la solución nutritiva. Estos resultados concuerdan con lo reportado para plantas de chile serrano en las cuales la acumulación de nitrógeno aumentó al incrementarse la aplicación de nitrógeno (Mata, 2001).

Cuadro 37. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la acumulación de nitrógeno en hojas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Acumulación de nitrógeno (mg planta^{-1}), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 14 f [†] | 59.4 cd | 176.1 c | 507 a | 558 a | 653 c |
| 2 | 29 bc | 96 ab | 259 abc | 660 a | 858 a | 902 bc |
| 3 | 16 ef | 55 cd | 198 bc | 456 a | 612 a | 642 c |
| 4 | 30 bc | 106 a | 263 abc | 673 a | 774 a | 897 bc |
| 5 | 18 def | 60 cd | 185 c | 457 a | 559 a | 673 c |
| 6 | 32 b | 89 abcd | 289 ab | 598 a | 796 a | 993 ab |
| 7 | 18 def | 71 bcd | 182 c | 529 a | 594 a | 701 bc |
| 8 | 33 ab | 90 abc | 290 ab | 516 a | 655 a | 990 ab |
| 9 | 24 cde | 78 abcd | 242 abc | 515 a | 891 a | 896 bc |
| 10 | 40 a | 109 a | 308 a | 574 a | 928 a | 1238 a |
| 11 | 24 cd | 59 cd | 224 abc | 539 a | 649 a | 832 bc |
| 12 | 22 def | 71 bcd | 239 abc | 421 a | 714 a | 849 bc |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)
 CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

En plantas de chile dulce se encontró que aunque la cantidad total de nitrógeno suministrado durante toda la estación fue la misma en los tratamientos 3-6-9, 6-6-6, y 9-6-3 (mM), el incremento gradual de la concentración total de nitrógeno en las tres etapas de crecimiento (3-6-9 mM) aumentó significativamente la absorción total de nitrógeno en ambas estaciones (Xu *et al.*, 2001b). Las plantas tienen uno o más sistemas de absorción que son específicos para nitrato. En general, la absorción de nitrato está controlada por el requerimiento para el crecimiento de la planta, antes que ser limitada por la afinidad del sistema de transporte para la absorción (Samuelson *et al.*, 1995, citados por Gent, 2003); además de que la concentración de potasio en la solución nutritiva afectó la absorción de nitrógeno (Xu *et al.*, 2002)

La función de respuesta obtenida para la acumulación de nitrógeno en las hojas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , en la última etapa fenológica (162 ddt), se presenta a continuación:

$$\text{NA} = - 1.0938 - 0.0164\text{N} + 0.1392\text{P} + 0.4303\text{K} + 0.0030\text{N}^2 - 0.0827\text{P}^2 - 0.0322\text{K}^2 - 0.0032\text{NP} + 0.0065\text{NK} + 0.1003\text{PK}$$

Donde: NA es la cantidad de nitrógeno acumulada en las hojas de las plantas de chile poblano (g planta^{-1}), y los restantes términos de la función de respuesta ya se definieron. La función de respuesta tiene un coeficiente de determinación alto ($r^2=0.77$) y baja variabilidad ($\text{CV}=12.0\%$), lo que permite asumir que el modelo explica la respuesta de la acumulación de nitrógeno en las hojas de chile poblano, a la aplicación de diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva.

5.2.5.2.2. Cantidad de fósforo acumulada en la hoja

En la última evaluación (162 ddt), el valor máximo de fósforo acumulado en las hojas ($0.102 \text{ g planta}^{-1}$) correspondió a las plantas del tratamiento 8 (10, 1.5, 8) y el valor mínimo ($0.051 \text{ g planta}^{-1}$) se encontró en las hojas de las plantas del tratamiento 5 (6, 0.5, 8). El análisis estadístico para esta variable también reportó diferencias altamente significativas, tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0033$) como en el de regresión

($\alpha=0.0011$), entre los tratamientos evaluados. Los resultados de la prueba de comparación de medias de tratamientos (Cuadro 38), confirman que la mayor acumulación de fósforo se obtuvo con el tratamiento 8 (10, 1.5, 8), enseguida se situó el tratamiento 4 (10, 1.5, 6); ambos tratamientos fueron estadísticamente iguales. Para este caso, la concentración de NO_3^- determinó en buena medida la acumulación foliar de fósforo, ya que los niveles de 8 a 12 me L^{-1} , permitieron acumular la mayor cantidad de fósforo en las hojas y el nivel de 6 me L^{-1} arrojó los menores resultados. Asimismo, las concentraciones de 1.5 a 2.0 me L^{-1} de H_2PO_4^- en la solución nutritiva favorecieron la acumulación de fósforo en las hojas de chile poblano, de tal manera que la combinación de los niveles de estos factores fueron determinantes en los resultados.

Cuadro 38. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la acumulación de fósforo en hojas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Acumulación de fósforo (mg planta^{-1}), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|----------|---------|---------|---------|---------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 2.1 b [†] | 6.7 c | 15.3 a | 52.3 a | 55.7 a | 56.5 ab |
| 2 | 3.3 ab | 8.1 bc | 16.0 a | 50.8 a | 69.6 a | 66.3 ab |
| 3 | 3.1 ab | 9.9 abc | 25.3 a | 65.4 a | 71.7 a | 63.7 ab |
| 4 | 3.3 ab | 12.1 ab | 24.2 a | 82.0 a | 80.6 a | 100.5 a |
| 5 | 2.6 b | 6.6 c | 16.9 a | 54.6 a | 61.3 a | 51.2 b |
| 6 | 3.6 ab | 7.3 c | 20.5 a | 57.0 a | 48.5 a | 60.2 ab |
| 7 | 3.4 ab | 12.0 ab | 31.5 a | 56.4 a | 68.6 a | 80.2 ab |
| 8 | 4.4 a | 10.3 abc | 29.7 a | 63.6 a | 62.2 a | 102.0 a |
| 9 | 3.7 ab | 9.2 abc | 31.0 a | 74.3 a | 68.9 a | 93.7 ab |
| 10 | 3.8 ab | 8.3 bc | 21.5 a | 64.4 a | 86.8 a | 96.4 ab |
| 11 | 4.5 a | 12.9 a | 25.4 a | 81.9 a | 75.6 a | 87.6 ab |
| 12 | 3.2 ab | 9.2 abc | 24.6 a | 38.0 a | 81.1 a | 86.2 ab |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

El análisis estadístico por etapa fenológica reportó diferencias significativas en las etapas de crecimiento vegetativo y de floración-fructificación. Los resultados de la prueba de comparación de medias por etapa fenológica (Cuadro 38), muestran que en las etapas de crecimiento (CV, 36 ddt), floración-fructificación (FF, 54 ddt) y último corte (C4, 162 ddt) las concentraciones de 8 a 10 me L^{-1} de NO_3^- en la solución nutritiva favorecieron la mayor acumulación de fósforo en las hojas de chile poblano y las concentraciones de 6 me L^{-1} de NO_3^- indujeron la menor acumulación. Además, se

puede apreciar que no se tuvieron efectos marcados de las concentraciones de K^+ y $H_2PO_4^-$ en la solución nutritiva sobre la acumulación de fósforo en las hojas.

Los resultados obtenidos son contrarios a los reportados por Baghour *et al.* (2001) quienes en plantas de chile dulce encontraron que la presencia concurrente de nitrógeno y potasio suprimen la acumulación de fósforo, incrementando su transporte por el xilema; las altas concentraciones de nitrógeno (24 g N m^{-2}) propiciaron un efecto depresivo sobre la absorción y transporte de fósforo. Además, la concentración de potasio en la solución nutritiva no influencia las tasas de absorción del fósforo. También en plantas de chile dulce, se encontró que la concentración de potasio en la solución nutritiva afectó su absorción (Xu *et al.*, 2002)

La función de respuesta para la acumulación de fósforo en las hojas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , $H_2PO_4^-$ y K^+ en la última etapa (C4, 162 ddt), es la siguiente:

$$PA = - 0.19856 + 0.02551N + 0.01033P + 0.04007K - 0.00115N^2 - 0.03584P^2 - 0.00270K^2 + 0.00497NP - 0.00098NK + 0.00732PK$$

Donde: PA es la cantidad de fósforo acumulada en las hojas de las plantas de chile poblano (g planta^{-1}), y los restantes términos de la función de respuesta ya han sido definidos anteriormente. La función de respuesta tiene un bajo coeficiente de determinación ($r^2=0.61$) y una alta variabilidad ($CV=20.4\%$), lo cual permite asumir que el modelo obtenido no explica en buena medida la respuesta de la acumulación de fósforo en las hojas de las plantas de chile poblano, a la aplicación de soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de NO_3^- , $H_2PO_4^-$ y K^+ .

5.2.5.2.3. Cantidad de potasio acumulada en la hoja

El análisis estadístico de los resultados de la última fase detectó diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados, tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0014$), como en el de regresión ($\alpha=0.0005$). Los resultados de la prueba de medias de tratamientos (Cuadro 39), indican que para la etapa C4 (162

ddt) la mayor acumulación de potasio en las hojas de chile poblano ($1.120 \text{ g planta}^{-1}$) se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7), seguido del tratamiento 12 (8, 1.0, y 9) el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento 10. De estos resultados se puede deducir que la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva tiene un efecto directamente proporcional sobre la acumulación de potasio en las hojas, pues al aumentar la concentración de NO_3^- , se incrementa la cantidad de potasio acumulado en la hoja, y al reducirlo de 12 a 8 me L^{-1} se reduce la acumulación del potasio a pesar de incrementar la concentración de K^+ en la solución nutritiva.

Cuadro 39. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la acumulación de potasio en hojas de chile poblano de diferente edad.

| Tratamiento | Acumulación de potasio (mg planta^{-1}), por etapa fenológica | | | | | |
|-------------|--|----------|----------|----------|---------|----------|
| | CV | FF | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 9.4 e [†] | 53.0 c | 104.4 b | 428.7 ab | 523.9 a | 591.0 b |
| 2 | 22.0 bc | 81.9 abc | 167.5 ab | 617.2 a | 725.6 a | 895.8 ab |
| 3 | 12.3 de | 52.5 c | 120.0 ab | 338.4 b | 442.4 a | 649.8 b |
| 4 | 17.6 cd | 80.8 abc | 154.7 ab | 490.6 ab | 477.0 a | 868.5 ab |
| 5 | 14.0 de | 54.8 bc | 103.6 b | 379.4 b | 469.3 a | 633.1 b |
| 6 | 25.7 b | 86.7 ab | 196.7 a | 556.2 ab | 650.3 a | 905.5 ab |
| 7 | 15.1 de | 66.8 abc | 117.5 ab | 456.6 ab | 558.1 a | 532.2 b |
| 8 | 23.6 bc | 78.8 abc | 136.2 ab | 411.8 ab | 497.9 a | 881.9 ab |
| 9 | 18.7 cd | 75.8 abc | 112.2 ab | 493.6 ab | 753.0 a | 705.9 ab |
| 10 | 33.3 a | 88.3 a | 167.3 ab | 549.0 ab | 673.4 a | 1120.5 a |
| 11 | 19.0 bcd | 60.0 abc | 141.1 ab | 436.1 ab | 590.2 a | 734.3 ab |
| 12 | 17.2 cd | 75.4 abc | 144.5 ab | 420.8 ab | 573.8 a | 908.7 ab |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

CV = Crecimiento vegetativo. FF = Floración-fructificación

Los resultados de la prueba de comparación de medias por etapa fenológica (Cuadro 39) indican que se encontraron efectos significativos en otras cuatro etapas de la aplicación de diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- , y K^+ en la solución nutritiva sobre la acumulación de potasio en las hojas de las plantas de chile poblano. Se aprecia que el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) fue el mejor en la mitad de las evaluaciones. También se observa que los mejores resultados se obtuvieron con los tratamientos que incluyeron concentraciones de 10 a 12 me L^{-1} de NO_3^- , en tanto que los tratamientos que contenían 6 me L^{-1} de NO_3^- fueron los que produjeron las menores acumulaciones de potasio en las hojas, lo cual indica que es importante el aporte de este nutrimento en las concentraciones adecuadas durante el desarrollo del cultivo y

es determinante en la producción de fruto (Cuadro 46). También es notorio que los otros dos factores estudiados no tuvieron efectos importantes sobre esta variable.

El incremento de nitrógeno, por lo general, aumenta la acumulación de potasio en la planta. Por otro lado, el potasio también influencia la absorción y utilización de las dos formas de nitrógeno (Mills y Jones, 1996). En concordancia con lo anterior, en plantas de chile dulce se ha reportado alta absorción de potasio, en presencia de altos niveles de nitrógeno, además de que la concentración de K^+ en la solución nutritiva afectó su absorción (Xu *et al.*, 2002). Las plantas de chile jalapeño acumularon más potasio al incrementar su tasa en la solución nutritiva, sin reducción del crecimiento (Johnson y Decoteau, 1996). No obstante, también se ha reportado que la concentración de potasio en la solución nutritiva no influencia su tasa de absorción por las plantas de chile dulce y que el tratamiento con 4 mg K m^{-2} fue el mejor (Baghour *et al.*, 2001).

La absorción de potasio por las plantas está determinada por su concentración en la solución del suelo y por la capacidad de absorción radical. La tasa de absorción aumenta con la concentración en la solución; sin embargo, existe una velocidad máxima de absorción en la cual un aumento en la concentración no genera un incremento en la velocidad de absorción (Borges *et al.*, 2006).

La función de respuesta que explica la respuesta de la acumulación de potasio en las hojas de las plantas de chile poblano a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , se presenta a continuación:

$$KA = 3.06109 - 0.07847N + 0.20329P - 0.70828K + 0.00700N^2 + 0.03560P^2 + 0.04996K^2 - 0.00109NP + 0.00616NK - 0.03900PK$$

Donde: KA es la cantidad de potasio acumulada (g planta^{-1}) en hojas de chile poblano, y los restantes términos de la función de respuesta ya han sido definidos anteriormente. Esta función de respuesta con un coeficiente de determinación bajo ($r^2=0.64$) y baja variabilidad ($CV=10.1\%$), no permite explicar satisfactoriamente la respuesta de la acumulación de potasio en las hojas de chile poblano, a la aplicación de soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ .

5.2.5.3. Análisis de la acumulación de nutrimentos en las hojas

El crecimiento y producción de las plantas de chile poblano están influenciados por la absorción y la acumulación de nutrimentos en la planta y sus componentes, algunos de los cuales tienen efectos directos sobre el rendimiento y la calidad de los frutos, objetivo final de la producción de esta especie.

La acumulación de nitrógeno en las hojas del cultivo mostró efecto significativo en las etapas de CV, FF, C1 y C4; en tanto que la acumulación de fósforo fue significativa en las etapas CV, FF y C4. El efecto en las dos primeras etapas indica que estos nutrimentos se encontraban en niveles suficientes para el adecuado crecimiento, floración y fructificación de la planta, así como del llenado de los primeros frutos; el efecto en la última etapa podría indicar la preparación de la planta para un llenado de fruto fuerte dado que las plantas presentaban mucho fruto pequeño en esa etapa. La acumulación de potasio, mostró efectos significativos en cinco de las seis etapas fenológicas (CV, FF, C1, C2 y C4) y en este caso puede interpretarse como un efecto directo de la concentración de la solución nutritiva y una necesidad dependiente del requerimiento de la planta en cada etapa fenológica. En todas las etapas mencionadas, el incremento de la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva propició el aumento de las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio en la hoja, lo cual indica que este nutrimento es el principal responsable de la acumulación nutrimental de la planta de chile poblano. Las concentraciones de H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva también tuvieron efecto sobre la acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio, tal como lo indican los resultados de los análisis de regresión, aunque la tendencia de las mismas no fue uniforme. En todos los casos, el mejor tratamiento también fue el 10 (12, 1.0, 7).

Los resultados obtenidos permiten aceptar la tercera hipótesis, ya que la dinámica de acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio, del chile poblano, varió en función de la etapa fenológica y determinó el nivel de rendimiento obtenido como se podrá observar en el apartado correspondiente.

5.2.7. Producción de fruto de chile poblano

La cosecha estuvo formada por cuatro cortes de fruto. Los frutos cosechados se clasificaron dependiendo de su longitud y peso (Cuadro 7). Las clases fueron: primera, segunda, tercera y rezaga. Además, se calcularon dos clases más: comercial (primera + segunda + tercera) y total (comercial + rezaga). Los resultados de las seis clases se sometieron al análisis estadístico por cada corte, y se reportan en el apartado correspondiente; también se sumó la producción de los cuatro cortes y se analizó de la misma manera para determinar el efecto de los factores evaluados.

5.2.7.1. Producción media de fruto de chile poblano

En el Cuadro 40 se presenta la producción media de frutos de chile poblano y en el Cuadro 41 el porcentaje medio para cada clase dentro de cada uno de los cuatro cortes realizados. El fruto de primera clase fue el de mayor producción en los tres primeros cortes, en los cuales también se obtuvo la mayoría del fruto de esta calidad, aunque su cantidad se redujo paulatinamente del primero (83.6% del total del corte) al último corte (20.0% del total del corte), comportamiento que es normal para este cultivo. Al sumar la producción obtenida en los cuatro cortes, el fruto de primera calidad representó el 43.5% de la producción total de fruto de chile y el 48.4% de la producción comercial, porcentajes que se consideran adecuados para este cultivo.

Al fruto de segunda clase le correspondió la segunda posición en cuanto a producción en todos los cortes, excepto el cuarto corte en el cual en la mayoría de los tratamientos se obtuvo mayor cantidad de frutos de segunda que de primera. La cantidad de frutos de segunda clase se incrementó de manera importante entre el primer (15.6% del total del corte) y el tercer corte (43.4% del total del corte) con una fuerte reducción en el cuarto corte (28.4% del total de corte). El fruto de segunda clase representó el 28.4% de la producción total de fruto de los cuatro cortes y el 31.6% de la producción comercial de fruto para este cultivo, lo cual se considera adecuado, ya que, en conjunto con el fruto de primera calidad, conformaron el 71.9% de la producción total y el 80.0% de la producción comercial.

Cuadro 40. Producción media de fruto de chile poblano obtenida en cuatro cortes.

| Clase de fruto | Producción de fruto de chile poblano (g planta ⁻¹) | | | | |
|----------------|--|---------|---------|---------|-----------|
| | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 | Suma |
| Primera | 164.740 | 129.100 | 99.894 | 119.364 | 513.098 |
| Segunda | 30.770 | 33.920 | 91.983 | 178.417 | 335.090 |
| Tercera | 0.430 | 9.513 | 19.517 | 182.767 | 212.227 |
| Rezaga | 1.139 | 1.180 | 0.402 | 115.272 | 117.993 |
| Comercial | 195.940 | 172.533 | 211.394 | 480.548 | 1,060.415 |
| Total | 197.079 | 173.713 | 211.796 | 595.820 | 1,178.408 |

El fruto de tercera clase fue el de menor producción en todos los tratamientos y su mayor producción se tuvo en el cuarto corte, lo cual se debió a que muchos frutos incluidos en esta clase eran frutos en crecimiento que tenían las características de tercera pero que aún no estaban maduros, por lo que se incluyeron en esta clase, pues no se consideró pertinente clasificarlos como frutos de rezaga, debido a que la cosecha final no representó el final del ciclo del cultivo sino que fue el final del experimento. En promedio, el fruto de tercera clase representó el 18.0% de la producción total de fruto de chile y el 20.0% de la producción comercial.

Cuadro 41. Porcentaje medio del fruto de chile poblano obtenida en cuatro cortes.

| Clase de fruto | Porcentaje de fruto de chile poblano con relación al total del corte | | | | |
|----------------|--|---------|---------|---------|--------|
| | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 | Suma |
| Primera | 83.60 | 74.32 | 47.16 | 20.03 | 43.54 |
| Segunda | 15.61 | 19.53 | 43.43 | 29.94 | 28.44 |
| Tercera | 0.22 | 5.47 | 9.21 | 30.68 | 18.01 |
| Rezaga | 0.57 | 0.68 | 0.20 | 19.35 | 10.01 |
| Comercial | 99.43 | 99.32 | 99.80 | 80.65 | 89.99 |
| Total | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

La producción de fruto de rezaga siempre fue una cantidad muy baja en cada corte. La cantidad de fruto de rezaga obtenida en el cuarto corte no refleja en sí la cantidad de fruto de mala calidad que produjo la planta, ya que en este caso se clasificó como rezaga todo el fruto que no reunía las características mínimas requeridas para su comercialización, la mayor parte del cual fue fruto pequeño aún en crecimiento el cual no llegó a maduración debido a que en este momento se decidió dar por concluido el experimento. Lo anterior quiere decir que el rendimiento total del cultivo pudo ser mayor al reportado en este experimento. En promedio, el fruto de rezaga representó menos del 10.0% de la producción total de fruto de chile.

La producción comercial promedio de fruto se considera buena; además, por razones de tipo práctico, no se llegó al final del ciclo vegetativo por lo que el potencial de producción es aún mayor, lo que hace muy prometedor este cultivo. Se aprecia que en el tercer corte se obtuvo un alto porcentaje de la producción comercial con respecto a los otros tres cortes, lo cual puede considerarse como el punto máximo de producción después del cual se presenta siempre una reducción gradual, de tal forma que se puede inferir que pudieron obtenerse al menos seis cortes. La producción total de fruto también fue buena si tomamos en cuenta las mismas consideraciones realizadas para la producción de fruto comercial.

5.2.7.2. Análisis estadístico de la producción de fruto

5.2.7.2.1. Producción de fruto de primera clase

Se realizaron los análisis de varianza y de regresión para cada uno de los cuatro cortes realizados. Para esta clase de frutos se encontraron diferencias significativas, en el análisis de varianza ($\alpha=0.0521$) y en el de regresión ($\alpha=0.0174$), en el tercer corte.

En el Cuadro 42 se presentan los resultados de la prueba de medias de tratamientos para cada uno de los cuatro cortes. Se observa que en el corte 3 (144 ddt), la mayor producción de fruto de chile poblano de primera clase ($267.2 \text{ g planta}^{-1}$) se obtuvo con el tratamiento 11 (8, 2.0, 7), enseguida se situó el tratamiento 8 (10, 1.5, 8); el cual es estadísticamente diferente al tratamiento 11. En este caso no es posible hacer una deducción confiable, dado que los niveles de los tres nutrimentos son diferentes en los dos tratamientos, y que la mayor cantidad de fruto se obtuvo al reducir la concentración de NO_3^- y de K^+ en conjunto con el incremento del nivel de H_2PO_4^- en la solución nutritiva. Este comportamiento pudo deberse a que sólo se trata de una respuesta parcial y no de la producción total de esta clase de fruto.

Cuadro 42. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de frutos de primera clase de plantas de chile poblano.

| Tratamiento | Producción de fruto de primera clase (g planta^{-1}) | | | |
|-------------|---|---------|----------|---------|
| | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 132.7 a [†] | 62.8 a | 51.0 ab | 94.1 a |
| 2 | 129.2 a | 108.5 a | 93.5 ab | 126.2 a |
| 3 | 123.7 a | 117.5 a | 54.2 ab | 137.0 a |
| 4 | 179.3 a | 138.3 a | 151.6 ab | 114.3 a |
| 5 | 175.7 a | 78.2 a | 61.8 ab | 173.7 a |
| 6 | 167.2 a | 109.0 a | 0.0 c | 146.4 a |
| 7 | 148.8 a | 149.3 a | 136.4 ab | 132.9 a |
| 8 | 158.0 a | 156.0 a | 187.2 ab | 97.8 a |
| 9 | 148.5 a | 148.3 a | 97.5 ab | 77.2 a |
| 10 | 226.0 a | 205.2 a | 69.2 ab | 208.2 a |
| 11 | 202.3 a | 148.3 a | 267.2 a | 67.9 a |
| 12 | 183.5 a | 128.3 a | 29.1 b | 56.6 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$)

La función de respuesta obtenida presenta un bajo coeficiente de determinación ($r^2=0.50$) y un coeficiente de variación muy alto ($\text{CV}=87.5\%$), lo cual pudo deberse a que se tuvo una alta varianza entre los tratamientos del tercer corte, pues el valor máximo fue de $267.2 \text{ g planta}^{-1}$, y el más bajo fue de $0.0 \text{ g planta}^{-1}$, por lo anterior no se realizó su interpretación.

5.2.7.2.2. Producción de fruto de segunda clase

Los resultados de los análisis de varianza y de regresión para la producción de fruto de segunda clase de cada uno de los cuatro cortes realizados, indican que se encontraron diferencias estadísticas significativas en los cortes 1 y 3. En el corte 1 (90 ddt) se encontraron diferencias significativas ($\alpha=0.0767$), pero en el análisis de regresión no se encontraron diferencias significativas ($\alpha=0.2649$). En el corte 3 (144 ddt) se encontraron diferencias significativas tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0334$) como en el de regresión ($\alpha=0.0661$).

En el Cuadro 43 se presentan los resultados de la prueba de medias de tratamientos de la producción de fruto de segunda clase, para cada uno de los cuatro cortes. Se observa que en el primer corte, la mayor producción de fruto de segunda clase (101.3

g planta⁻¹) se obtuvo con el tratamiento 8 (10, 1.5, 8) y en segundo lugar fue para el tratamiento 4 (10, 1.5, 6), el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento 8. De la diferencia entre estos dos tratamientos se puede deducir que la reducción de la producción de fruto se debió a la reducción de la concentración de K⁺ en la solución nutritiva de 8 a 6 me L⁻¹. La función de respuesta obtenida mediante el análisis de regresión no explica la respuesta obtenida (r²=0.32) y además el coeficiente de variación fue muy alto (CV=118%) debido a la alta varianza observada entre los tratamientos y las repeticiones del experimento.

En el caso del corte 3 (144 ddt), la mayor producción de fruto de segunda clase (170.2 g planta⁻¹) correspondió a las plantas del tratamiento 9 (8, 1.0, 7), seguido del tratamiento 1 (6, 0.5, 6), el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento 9. Se pudo observar que en este caso la mayor producción de fruto de segunda clase se debió al incremento de la concentración de los tres nutrientes en la solución nutritiva. En este caso, la función de respuesta obtenida tampoco explica confiablemente la respuesta obtenida, debido al bajo valor del coeficiente de determinación (r²=0.42) y alto coeficiente de variación (CV=57.8%), por las mismas razones que en el corte 1.

Cuadro 43. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺, sobre la producción de frutos de segunda clase de plantas de chile poblano.

| Tratamiento | Producción de fruto de segunda clase (g planta ⁻¹) | | | |
|-------------|--|---------|----------|---------|
| | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 26.8 ab [†] | 68.3 a | 131.5 ab | 103.4 a |
| 2 | 12.5 ab | 70.7 a | 40.6 ab | 204.6 a |
| 3 | 30.2 ab | 58.3 a | 46.5 ab | 227.3 a |
| 4 | 60.2 ab | 33.3 a | 90.7 ab | 221.3 a |
| 5 | 11.7 ab | 13.2 a | 117.1 ab | 192.7 a |
| 6 | 27.1 ab | 12.8 a | 87.2 ab | 247.7 a |
| 7 | 24.0 ab | 13.2 a | 124.7 ab | 73.6 a |
| 8 | 101.3 a | 39.2 a | 61.5 ab | 108.4 a |
| 9 | 23.8 ab | 0.0 a | 170.2 a | 123.6 a |
| 10 | 40.0 ab | 0.0 a | 99.9 ab | 260.6 a |
| 11 | 0.0 b | 36.7 a | 121.7 ab | 135.7 a |
| 12 | 11.7 ab | 61.3 a | 12.2 b | 242.2 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$).

5.2.7.2.3. Producción de fruto de tercera clase

Los resultados de los análisis de varianza y de regresión para la producción de fruto de tercera clase, de cada uno de los cuatro cortes realizados, no reportaron diferencias significativas entre los factores estudiados en ninguno de los cortes.

5.2.7.2.4. Producción de fruto de rezaga

Al realizar los análisis de varianza y de regresión para la producción de fruto de rezaga de cada uno de los cortes, tampoco se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los factores estudiados en ninguno de los cuatro cortes.

5.2.7.2.5. Producción de fruto comercial

El análisis estadístico de la producción de fruto comercial para cada uno de los cuatro cortes realizados, reportó diferencias estadísticas significativas en los cortes 1, 3 y 4. Para el primer corte (C1, 90 ddt) se encontraron diferencias significativas ($\alpha=0.0134$) en el análisis de varianza y altamente significativas ($\alpha=0.0040$) en el de regresión. En el tercer corte (C3, 144 ddt) se encontraron diferencias altamente significativas tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0095$), como en el de regresión ($\alpha=0.0035$). En el cuarto corte (C4, 162 ddt) también se encontraron diferencias significativas tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0448$) como en el de regresión ($\alpha=0.0145$).

La prueba de comparación de medias de tratamientos de la producción de fruto comercial, para cada uno de los cuatro cortes (Cuadro 44), indicó que en el corte 1 (90 ddt), la mayor producción de fruto comercial de chile poblano ($266.0 \text{ g planta}^{-1}$) se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, y 7) y el segundo lugar lo ocupó el tratamiento 8 (10, 1.5, 8), el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento 10. La diferencia entre estos tratamientos permite deducir que se tuvo un incremento de la producción de fruto comercial al incrementar la concentración de NO_3^- (de 10 a 12 me L^{-1}) en la solución nutritiva a pesar de la reducción de las concentraciones de H_2PO_4^- y K^+ . Para este corte, la función de respuesta obtenida es la que se presenta a continuación:

$$\text{PFCC1} = 322.064 - 84.225\text{N} - 72.607\text{P} + 25.763\text{K} + 3.421\text{N}^2 - 0.720\text{P}^2 - 1.401\text{K}^2 + 22.633\text{NP} + 2.371\text{NK} - 10.900\text{PK}$$

Donde: PFCC1 es la producción de fruto comercial de chile poblano (g planta^{-1}) en el primer corte (90 ddt), y los demás términos de la función de respuesta ya han sido definidos. Esta función de respuesta no explica el efecto la respuesta de la producción de fruto en el primer corte a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , debido al bajo coeficiente de determinación ($r^2=0.56$) y su alta variabilidad ($\text{CV}=20.1\%$).

Cuadro 44. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción de fruto comercial de plantas de chile poblano.

| Tratamiento | Producción de fruto comercial (g planta^{-1}) | | | |
|-------------|--|---------|----------|---------|
| | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 159.5 ab [†] | 131.2 a | 201.6 ab | 312.4 a |
| 2 | 141.7 b | 199.3 a | 134.2 ab | 510.7 a |
| 3 | 153.8 ab | 175.8 a | 100.7 b | 532.7 a |
| 4 | 239.5 ab | 171.7 a | 265.0 ab | 555.4 a |
| 5 | 187.3 ab | 91.3 a | 178.9 ab | 469.9 a |
| 6 | 201.4 ab | 129.7 a | 99.4 b | 637.6 a |
| 7 | 172.8 ab | 171.3 a | 282.8 ab | 350.4 a |
| 8 | 259.3 ab | 205.2 a | 285.1 ab | 439.5 a |
| 9 | 172.3 ab | 191.0 a | 329.7 ab | 348.2 a |
| 10 | 266.0 a | 215.7 a | 189.9 ab | 750.0 a |
| 11 | 202.3 ab | 195.2 a | 410.1 a | 317.7 a |
| 12 | 195.2 ab | 189.7 a | 59.2 b | 541.4 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$).

Para el corte 3 (144 ddt), la mayor producción de fruto de clase comercial ($410.1 \text{ g planta}^{-1}$) correspondió a las plantas del tratamiento 11 (8, 2.0, 7), seguido del tratamiento 9 (8, 1.0, 7), el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento 11. En este caso, la mayor producción de fruto de chile poblano de clase comercial se debió al incremento de la concentración de H_2PO_4^- (de 1.0 a 2.0 me L^{-1}), manteniendo las concentraciones de NO_3^- y K^+ , en la solución nutritiva. La función de respuesta obtenida para este corte, fue la siguiente:

$$\text{PFCC3} = -4223.179 + 190.679\text{N} - 670.483\text{P} + 1138.367\text{K} - 9.434\text{N}^2 - 5.767\text{P}^2 - 78.221\text{K}^2 + 39.192\text{NP} - 10.875\text{NK} + 64.950\text{PK}$$

Donde: PFCC3 es la producción de fruto comercial de chile poblano (g planta^{-1}) en el corte 3 (144 ddt), y los demás términos de la función de respuesta ya han sido definidos. El bajo coeficiente de determinación ($r^2=0.57$) y su alta variabilidad ($\text{CV}=48.1\%$), indican que la confiabilidad de la misma es baja

Al analizar los resultados del corte C4 (162 ddt), en el Cuadro 44 se observa que la mayor producción de fruto de clase comercial ($750.0 \text{ g planta}^{-1}$) correspondió a las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7), seguido del tratamiento 6 (10, 0.5, 8), el cual fue estadísticamente igual al tratamiento 10. A pesar de la significancia encontrada, en el Cuadro 44 se observa que no se encontraron diferencias estadísticas significativas al realizar la prueba de comparación de medias.

La función de respuesta para la producción de fruto comercial en el cuarto corte es la siguiente:

$$\text{PFCC4} = 2593.198 - 240.503N + 1285.147P - 575.699K + 17.853N^2 - 14.038P^2 + 50.003K^2 - 31.767NP + 2.237NK - 145.633PK$$

Donde: PFCC4 es la producción de fruto comercial de chile poblano (g planta^{-1}) en el corte 4 (162 ddt), y los demás términos de la función de respuesta ya se definieron. La función de respuesta obtenida no permite explicar la respuesta de esta variable debido al bajo coeficiente de determinación ($r^2=0.51$) y la alta variabilidad ($\text{CV}=31.2\%$).

5.2.7.2.6. Producción de fruto total

En el análisis estadístico de esta variable se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los factores estudiados sobre la producción total de fruto en los cortes 1, 3 y 4, en tanto que en el corte 2 no se encontraron diferencias significativas.

En el corte 1 (90 ddt) se encontraron diferencias significativas ($\alpha=0.0157$) en el análisis de varianza, y altamente significativas ($\alpha=0.0045$) en el análisis de regresión.

En el corte 3 se encontraron diferencias altamente significativas tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0090$) como en el de regresión ($\alpha=0.0033$). En el corte 4 también se encontraron diferencias altamente significativas en el análisis de varianza ($\alpha=0.0009$) y en el de regresión ($\alpha=0.0002$).

Al realizar la prueba de comparación de medias de tratamientos de la producción total de fruto, para cada uno de los cuatro cortes se obtuvieron los resultados que se presentan en el Cuadro 45. Se observa que en el corte 1 (90 ddt), la mayor producción de fruto total (266.0 g planta⁻¹) se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y el segundo lugar lo ocupó el tratamiento 8 (10, 1.5, 8), el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento 10. De la diferencia entre estos tratamientos se deduce que se obtuvo un incremento de la producción de fruto total al incrementar la concentración de NO₃⁻ (de 10 a 12 me L⁻¹) en la solución nutritiva a pesar de la reducción de las concentraciones de H₂PO₄⁻ y K⁺. Para este corte, la función de respuesta obtenida es la que se presenta a continuación:

$$\text{PFTC1} = 202.347 - 75.017N - 53.907P + 57.780K + 2.854N^2 - 9.787P^2 - 3.667K^2 + 22.633NP + 2.371NK - 10.900PK$$

Donde: PFTC1 es la producción de fruto total de chile poblano (g planta⁻¹) en el primer corte, y los demás términos de la función de respuesta ya han sido definidos. La función de respuesta tuvo un coeficiente de determinación bajo ($r^2=0.56$) y una alta variabilidad (CV=20.1%), lo cual no permite explicar la respuesta de la producción de fruto total en el Corte 1 a la aplicación de diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺.

La mayor producción de fruto total (410.1 g planta⁻¹) del corte 3 (144 ddt), correspondió a las plantas del tratamiento 11 (8, 2.0, 7), seguido del tratamiento 9 (8, 1.0, 7), el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento 11. La mayor producción de fruto de chile poblano del tratamiento 11 se debió al incremento de la concentración de 1 a 2 me L⁻¹ de H₂PO₄⁻, ya que las concentraciones de NO₃⁻ y K⁺, en la solución nutritiva, se mantuvieron iguales. La función de respuesta obtenida en el análisis de regresión para este corte es la siguiente:

$$\text{PFTC3} = -4309.419 + 195.879\text{N} - 659.923\text{P} + 1156.447\text{K} - 9.7534\text{N}^2 - 10.887\text{P}^2 - 79.501\text{K}^2 + 39.192\text{NP} - 10.875\text{NK} + 64.950\text{PK}$$

Donde: PFTC3 es la producción de fruto total de chile poblano (g planta^{-1}) en el corte 3, y los demás términos de la función de respuesta ya han sido definidos. Esta función de respuesta tuvo un coeficiente de determinación bajo ($r^2=0.57$) y una variabilidad muy alta ($\text{CV}=48.0\%$), por lo que no explica la respuesta de la producción de fruto total en el Corte 3 a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ .

Cuadro 45. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la producción total de fruto de plantas de chile poblano.

| Tratamiento | Producción total de fruto (g planta^{-1}) | | | |
|-------------|--|---------|----------|-----------|
| | Corte 1 | Corte 2 | Corte 3 | Corte 4 |
| 1 | 164.7 ab [†] | 131.2 a | 201.6 ab | 393.1 b |
| 2 | 141.7 b | 199.3 a | 134.2 ab | 646.8 ab |
| 3 | 153.8 ab | 179.2 a | 100.7 b | 686.3 ab |
| 4 | 239.5 ab | 171.7 a | 265.0 ab | 737.1 ab |
| 5 | 187.3 ab | 91.3 a | 178.9 ab | 511.0 ab |
| 6 | 201.4 ab | 129.7 a | 99.4 b | 754.6 ab |
| 7 | 172.8 ab | 171.3 a | 282.8 ab | 423.9 b |
| 8 | 259.3 ab | 205.2 a | 285.1 ab | 551.9 ab |
| 9 | 180.8 ab | 191.0 a | 334.5 ab | 414.1 b |
| 10 | 266.0 a | 226.5 a | 189.9 ab | 908.9 a |
| 11 | 202.3 ab | 195.2 a | 410.1 a | 372.7 b |
| 12 | 195.2 ab | 189.7 a | 59.2 b | 748.7 a b |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$).

En el análisis de los resultados del corte 4 (162 ddt), se observó que la mayor producción de fruto total ($908.9 \text{ g planta}^{-1}$) correspondió a las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7), seguido del tratamiento 6 (10, 0.5, 8), el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento 10 (Cuadro 45). Esta diferencia estuvo determinada por el incremento de la concentración de NO_3^- (de 10 a 12 me L^{-1}) y de H_2PO_4^- (de 0.5 a 1.0 me L^{-1}), a pesar de que la concentración de K^+ se redujo (de 8 a 7 me L^{-1}), en la solución nutritiva. La función de respuesta obtenida en el análisis de regresión, para este corte, tuvo un coeficiente de determinación bajo ($r^2=0.67$), y una variabilidad media ($\text{CV}=23.1\%$), lo cual sugiere una baja confiabilidad. Dicha función de respuesta es la siguiente;

$$\text{PFTC4} = 5079.320 - 276.825N + 1640.653P - 1270.340K + 20.548N^2 - 61.857P^2 + 98.273K^2 - 39.817NP + 4.196NK - 168.283PK$$

Donde: PFTC4 es la producción de fruto total de chile poblano (g planta^{-1}) en el corte 4, y los demás términos de la función de respuesta ya han sido definidos.

5.2.7.2.7. Producción acumulada de fruto

Los resultados de la producción obtenida en cada uno de los cortes, se sumaron para obtener la producción acumulada de fruto para cada una de las clases evaluadas, así como el rendimiento comercial y el total. La producción acumulada de fruto de cada una de las clases evaluadas se analizó estadísticamente de la misma manera que se hizo con todas las variables. Los resultados del análisis estadístico reportaron diferencias significativas para la producción de fruto de primera clase, comercial y total, mientras que para los frutos de segunda, tercera y rezaga no se detectaron diferencias significativas. Posteriormente, se realizó la prueba de comparación de medias de tratamientos para todas las variables evaluadas (Cuadro 46).

La mayor cantidad de fruto de primera clase ($708.6 \text{ g planta}^{-1}$) se obtuvo en el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y representó el 50% del rendimiento comercial para este tratamiento, en tanto que el menor rendimiento de primera clase ($340.6 \text{ g planta}^{-1}$) se obtuvo en el tratamiento 1 (6, 0.5, 6) y fue equivalente al 42% del rendimiento comercial. En el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas ($\alpha=0.0185$) y altamente significativas ($\alpha=0.0050$) en el análisis de regresión. En el Cuadro 46 se observa que la mayor producción de fruto de primera clase de chile poblano se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7), seguido del tratamiento 11 (8, 2.0, 7) los cuales fueron estadísticamente diferentes entre sí. De estos resultados se deduce que la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva tuvo un efecto directamente proporcional sobre la producción de fruto de primera clase, pues al aumentar la concentración de NO_3^- de 8 a 12 me L^{-1} , se incrementó la producción de esta clase de fruto, mientras que la reducción de la dosis de H_2PO_4^- (de 2.0 a 1.0 me L^{-1}) no tuvo efecto negativo sobre esta variable.

La función de respuesta obtenida en el análisis de regresión, para el fruto de primera clase, tuvo un coeficiente de determinación bajo ($r^2=0.55$), y un coeficiente de variación medio ($CV=22.6\%$), por lo que la confiabilidad es baja. Dicha función de respuesta es la siguiente:

$$\text{PAFP} = -1896.722 - 42.119N - 252.485P + 686.645K + 10.844N^2 + 91.737P^2 - 36.349K^2 + 16.362NP - 18.835NK + 8.658PK$$

Donde: PAFP es la producción acumulada de fruto de primera clase de chile poblano (g planta^{-1}), y los demás términos de la función de respuesta ya han sido definidos.

La mayor producción acumulada de fruto de segunda clase ($405.5 \text{ g planta}^{-1}$) se tuvo en el tratamiento 4 (10, 1.5, 6) y fue equivalente al 33% del rendimiento comercial de ese tratamiento, mientras que la menor producción de fruto de segunda clase ($235.5 \text{ g planta}^{-1}$) correspondió al tratamiento 7 (6, 1.5, 8) y en este caso fue equivalente al 24% del rendimiento comercial. Como se mencionó anteriormente no se encontraron diferencias estadísticas significativas en el análisis estadístico de esta variable.

En el caso de la producción acumulada de fruto de tercera clase, el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) fue el que reportó la mayor producción ($312.5 \text{ g planta}^{-1}$) y fue equivalente al 22% del rendimiento comercial del mismo, en tanto que la menor producción de fruto de tercera clase ($103.6 \text{ g planta}^{-1}$) correspondió al tratamiento 5 (6, 0.5, 8) y representó el 11% del rendimiento comercial del mencionado tratamiento. Tampoco se encontraron diferencias estadísticas significativas en el análisis estadístico de esta clase de fruto.

El fruto de rezaga fue la clase de menor producción; el tratamiento 12 (8, 1.0, 9) fue en el que se obtuvo la mayor cantidad ($207.3 \text{ g planta}^{-1}$) la cual fue equivalente al 17.4% de la producción total de fruto para este tratamiento, y el tratamiento 5 (6, 0.5, 8) reportó la menor cantidad de fruto de rezaga ($41.1 \text{ g planta}^{-1}$), equivalente al 4.2% de la producción total de fruto de este tratamiento. Al igual que en los dos casos anteriores, no se encontraron diferencias significativas al realizar el análisis estadístico.

La mayor cantidad acumulada de fruto de clase comercial (1,421.6 g planta⁻¹) se obtuvo en el tratamiento 10 (12, 1.0, 7) y fue el 89.30% de la producción total acumulada de fruto para este tratamiento, en tanto que la menor producción de fruto comercial (804.7 g planta⁻¹) se obtuvo en el tratamiento 1 (6, 0.5, 6) y fue equivalente al 90.3% de la producción total acumulada de fruto para ese tratamiento. Tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0054$) como en el de regresión ($\alpha=0.0012$) se encontraron diferencias altamente significativas.

Cuadro 46. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺, sobre el rendimiento total acumulado de fruto (g planta⁻¹) de plantas de chile poblano.

| Trat. | Primera | Segunda | Tercera | Rezaga | Comercial | Total |
|-------|----------------------|---------|---------|---------|-----------|------------|
| 1 | 340.6 b [†] | 330.0 a | 134.1 a | 85.9 a | 804.7 b | 890.6 d |
| 2 | 457.4 ab | 328.4 a | 200.1 a | 136.1 a | 985.9 ab | 1122.0 bcd |
| 3 | 432.4 ab | 362.3 a | 171.7 a | 156.9 a | 966.4 b | 1123.3 bcd |
| 4 | 583.5 ab | 405.5 a | 242.6 a | 181.7 a | 1231.6 ab | 1413.3 ab |
| 5 | 489.4 ab | 334.7 a | 103.6 a | 41.1 a | 927.7 b | 968.8 cd |
| 6 | 424.6 ab | 374.8 a | 268.9 a | 117.0 a | 1068.3 ab | 1185.3 bcd |
| 7 | 567.4 ab | 235.5 a | 174.4 a | 73.5 a | 977.3 ab | 1050.8 cd |
| 8 | 599.0 ab | 310.4 a | 279.9 a | 112.4 a | 1189.3 ab | 1301.7 abc |
| 9 | 471.5 ab | 317.6 a | 252.8 a | 79.2 a | 1041.9 ab | 1121.1 bcd |
| 10 | 708.6 a | 400.5 a | 312.5 a | 169.7 a | 1421.6 a | 1591.3 a |
| 11 | 685.7 ab | 294.1 a | 145.6 a | 55.0 a | 1125.4 ab | 1180.4 bcd |
| 12 | 397.5 ab | 327.4 a | 260.5 a | 207.3 a | 985.4 ab | 1192.7 bcd |

Trat.=Tratamiento. [†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha\leq 0.05$)

La prueba de comparación de medias indicó que la mayor producción de fruto de clase comercial de chile poblano se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7), seguido del tratamiento 4 (10, 1.5, 6) los cuales fueron estadísticamente diferentes entre sí. Se observa que el incremento de la concentración de NO₃⁻ (de 10 a 12 me L⁻¹) y de K⁺ (de 6 a 7 me L⁻¹) en la solución nutritiva, propició el aumento de la producción comercial acumulada de fruto, aún con la reducción de la concentración de H₂PO₄⁻ (de 1.5 a 1.0 me L⁻¹) en la solución nutritiva. La función de respuesta para la producción acumulada de fruto de clase comercial es la siguiente:

$$\text{PAFC} = -942.839 - 102.073\text{N} + 516.898\text{P} + 499.678\text{K} + 10.850\text{N}^2 - 65.930\text{P}^2 - 26.532\text{K}^2 + 20.454\text{NP} - 5.756\text{NK} - 56.958\text{PK}$$

Donde: PAFC es la producción acumulada de fruto de clase comercial de chile poblano (g planta^{-1}), y los demás términos de la función de respuesta ya han sido definidos. Dicha función de respuesta tuvo un coeficiente de determinación bajo ($r^2=0.61$), y a pesar de su poca variabilidad ($\text{CV}=13.7\%$), no explica la respuesta de la producción acumulada de fruto de clase comercial a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ .

Finalmente, para la producción total acumulada de fruto de chile poblano, la mayor cantidad ($1,591.3 \text{ g planta}^{-1}$) se obtuvo en el tratamiento 10 (12, 1.0, 7), en tanto que la menor producción total de fruto ($890.6 \text{ g planta}^{-1}$) se obtuvo con el tratamiento 1 (6, 0.5, 6). Tanto en el análisis de varianza ($\alpha < 0.0001$) como en el de regresión ($\alpha < 0.0001$) se encontraron diferencias altamente significativas. Al realizar la prueba de comparación de medias se observó que la mayor producción de fruto de clase comercial de chile poblano se obtuvo con el tratamiento 10 (12, 1.0, 7), seguido del tratamiento 4 (10, 1.5, 6), siendo estadísticamente diferentes entre sí. La respuesta observada es similar a la obtenida para la producción de fruto de calidad comercial, y de igual manera se puede observar que el incremento de la concentración de NO_3^- (de 10 a 12 me L^{-1}) y de K^+ (de 6 a 7 me L^{-1}) en la solución nutritiva, propició el aumento de la producción total de fruto acumulada, aún con la reducción de la concentración de H_2PO_4^- (de 1.5 a 1.0 me L^{-1}) en la solución nutritiva.

La función que explica la respuesta de la producción acumulada total de fruto a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , tuvo un coeficiente de determinación alto ($r^2=0.77$), y un coeficiente de variación bajo ($\text{CV}=9.8\%$), por lo que la confiabilidad de la misma se considera buena. Dicha función de respuesta es la siguiente:

$$\text{PAFT} = 1349.451 - 136.070N + 915.332P - 146.366K + 13.347N^2 - 129.435P^2 + 18.233K^2 + 11.987NP - 3.589NK - 80.442PK$$

Donde: PAFT es la producción acumulada total de fruto de chile poblano (g planta^{-1}), y los demás términos de la función de respuesta ya han sido definidos.

Los resultados obtenidos permitieron estimar el rendimiento obtenido por unidad de superficie para cada uno de los tratamientos aplicados; para ello se multiplicaron los datos del Cuadro 46 por una densidad de población de 40,000 plantas ha⁻¹. Los rendimientos estimados (Cuadro 47) son excelentes si los comparamos con el rendimiento medio nacional para este tipo de chile que es menor a los 20 Mg ha⁻¹.

Cuadro 47. Rendimiento acumulado de fruto (Mg ha⁻¹) de plantas de chile poblano, tratadas con diferentes dosis de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺.

| Tratamiento | Primera | Segunda | Tercera | Rezaga | Comercial | Total |
|-------------|---------|---------|---------|--------|-----------|--------|
| 1 | 13.625 | 13.201 | 5.365 | 3.436 | 32.188 | 35.624 |
| 2 | 18.297 | 13.137 | 8.003 | 5.443 | 39.436 | 44.879 |
| 3 | 17.293 | 14.493 | 6.869 | 6.277 | 38.520 | 44.799 |
| 4 | 23.345 | 16.219 | 9.701 | 7.267 | 49.264 | 56.529 |
| 5 | 19.575 | 13.383 | 4.143 | 1.643 | 37.096 | 38.740 |
| 6 | 16.981 | 14.992 | 10.755 | 4.681 | 42.724 | 47.404 |
| 7 | 22.697 | 9.420 | 6.979 | 2.941 | 39.096 | 42.037 |
| 8 | 23.960 | 12.416 | 11.196 | 4.496 | 47.568 | 52.061 |
| 9 | 18.860 | 12.703 | 10.113 | 3.171 | 41.648 | 44.816 |
| 10 | 28.344 | 16.020 | 12.500 | 6.789 | 56.864 | 63.652 |
| 11 | 27.429 | 11.763 | 5.823 | 2.201 | 45.008 | 47.209 |
| 12 | 15.903 | 13.096 | 10.423 | 8.292 | 39.420 | 47.712 |

La respuesta del rendimiento comercial y total de fruto a las concentraciones de NO₃⁻ y K⁺ en la solución nutritiva, coincide con los reportes en los que la concentración de nitrógeno y potasio en la solución nutritiva afectaron significativamente el rendimiento total de fruto de chile dulce (Xu *et al.*, 2002), y que el rendimiento comercial tuvo una respuesta lineal y positiva a la fertilización con potasio, con los mayores volúmenes en el tratamiento con 12 g m⁻² y los más bajos en los que tenían 4 g m⁻² (Baghour *et al.*, 2001); el peso del fruto de chile jalapeño por planta se incrementó linealmente con el incremento de las tasas de potasio (Johnson y Decoteau, 1996). Sin embargo, con altas tensiones de humedad en el suelo, no se tuvo respuesta del rendimiento de fruto a las concentraciones de nitrógeno y potasio en la solución nutritiva (Alonso, 2001).

Sin embargo, el rendimiento de fruto parece estar más influenciado por la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva, ya que para chile dulce el mayor rendimiento total de fruto se obtuvo incrementando gradualmente el suministro de nitrógeno (3-6-9, mM) (Xu *et al.*, 2001b) y los mayores rendimientos se alcanzaron

con 6 y 12 g m⁻² de nitrógeno, lo cual pudo deberse a la mayor absorción y traslocación del fósforo orgánico hasta los frutos en esos tratamientos (Baghour *et al.*, 2001). También Kirnak *et al.* (2003) reportaron que el rendimiento total y comercial de chile dulce se incrementó al aumentar las dosis de nitrógeno de 70 a 210 kg ha⁻¹.

El chile Tabasco, desarrollado en el campo, incrementó su rendimiento al aumentar el nitrógeno aplicado al suelo de 0 a 112 kg ha⁻¹ (Sundstrom, 1984). Schon *et al.* (1994), encontraron que las plantas de chile desarrolladas en lana de roca con 12.5 mM L⁻¹ de nitrógeno produjeron más fruto que las plantas que recibieron 8.6 mM L⁻¹ de nitrógeno. También el rendimiento de fruto de calabaza zucchini de los tratamientos aniónicos y catiónicos fueron afectados significativamente por las proporciones, dosis de nutrimento y su interacción. El rendimiento de fruto fue más alto con alta proporción de NO₃⁻, y más bajo con altas proporciones de SO₄²⁻, PO₄³⁻, y Cl⁻. La composición óptima en la nutrición total mostró que este cultivo requiere altas tasas de NO₃⁻, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ (80% del total de nutrimentos) para producir el máximo rendimiento de fruto (Colla *et al.*, 2004b)

Las plantas de chile jalapeño requirieron 15 mM de nitrógeno y al menos 3 mM de potasio para la producción óptima de frutos, aunque la producción óptima se puede dar en un amplio intervalo (7.5 a 22.5 mM) de concentraciones de nitrógeno (Johnson y Decoteau, 1996). La concentración óptima de nitrógeno para la producción del máximo rendimiento de alta calidad de chile dulce fue de 8.2 mM L⁻¹ (Bar-Tal *et al.*, 2001b) y para el rendimiento máximo fue de 9.4 mMol L⁻¹ (Bar-Tal *et al.*, 2001a).

En este estudio, el efecto del potasio sobre el rendimiento parece ser mínimo y estuvo correlacionado con las dosis de NO₃⁻ en la solución nutritiva, ya que su requerimiento es relativamente bajo. Para chile dulce el requerimiento de potasio es el mayor entre los cuatro cationes nutrimentos mayores para el alto rendimiento y las plantas tratadas sólo con NO₃⁻ alcanzaron su máximo rendimiento a 2.5 mM de potasio (Xu *et al.*, 2002). Mientras que en chile jalapeño la tasa óptima de potasio para el rendimiento de fruto fue de 6 mM (Johnson y Decoteau, 1996).

En tomate, el suministro de potasio no tuvo efecto significativo sobre el rendimiento, pero la tendencia fue de mayor producción con alto potasio pero bajo suministro de nitrógeno, por lo que el suministro de potasio puede ser más crítico para la producción de fruto que para el crecimiento vegetativo (Gent, 2004); también el rendimiento de frutos rojos se incrementó linealmente con la concentración de potasio en la solución nutritiva, pero la mayor concentración de potasio en la solución nutritiva, no afectó el rendimiento de fruto (Bugarín *et al.*, 2002)

La concentración de fósforo en la solución nutritiva no tuvo efecto significativo sobre el rendimiento de fruto en este estudio, aunque existen reportes que indican que en chile dulce el rendimiento total de fruto estuvo relacionado significativamente a diferentes concentraciones de fósforo en la planta (Xu *et al.*, 2002), mientras que en berenjena, el incremento de la concentración de fósforo de 18 a 54 g m⁻³, aumentó significativamente el rendimiento (Zipelevish *et al.*, 2000). La falta de respuesta del chile poblano puede ser un indicador de un bajo requerimiento de este cultivo por este nutrimento. Sin embargo, las plantas en hidroponía tradicionalmente son cultivadas con excesivos niveles de fósforo, lo cual puede producir efectos detrimentales sobre el desarrollo y rendimiento de las plantas, por lo que hay que tener mucho cuidado en el manejo de este nutrimento en las soluciones nutritivas.

5.2.7.2.8. Análisis de la producción de fruto

En este estudio, la aplicación de diferentes concentraciones de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y K⁺ en la solución nutritiva tuvo efecto significativo sobre el rendimiento final de fruto. En todos los tratamientos se obtuvieron altos rendimientos, muy superiores al rendimiento medio nacional de este cultivo que es inferior a los 15 Mg ha⁻¹. El menor rendimiento total (35.6 Mg ha⁻¹) se obtuvo en el tratamiento 1 (6, 0.5, 6) y el máximo rendimiento total (63.6 Mg ha⁻¹) correspondió al tratamiento 12 (12, 1.0, 7) y representa más de cuatro veces el rendimiento medio reportado para chile poblano. Estas diferencias son muy importantes cuando se consideran los beneficios económicos que pueden representar para los productores de chile poblano.

Con base en estos resultados y considerando los mejores rendimientos obtenidos, se concluye que se pueden obtener altos rendimientos de chile poblano con soluciones nutritivas que contengan de 8 a 12 me L⁻¹ de NO₃⁻, 0.5 a 1.0 me L⁻¹ de H₂PO₄⁻ y 6 a 7 me L⁻¹ de K⁺, de tal manera que la concentración de estos nutrimentos en la solución nutritiva podrá definirse con base en aspectos técnicos y económicos sin afectar en gran medida el rendimiento esperado. Sin embargo, el mayor rendimiento de fruto se obtendrá con una solución nutritiva que contenga 12 me L⁻¹ de NO₃⁻, 1.0 me L⁻¹ de H₂PO₄⁻ y 7 me L⁻¹ de K⁺, la cual corresponde a la solución nutritiva universal Steiner.

La aplicación diferencial de NO₃⁻ fue el que tuvo el mayor efecto sobre la mayoría de las variables evaluadas de tal manera que el rendimiento máximo obtenido fue el resultado de la mayor altura, diámetro de tallo, número de hojas, número de ramas, número de frutos, área foliar, lecturas SPAD, producción de materia seca y acumulación de nutrimentos en las plantas del tratamiento 10 (12, 1.0, 7). El efecto del H₂PO₄⁻ fue poco notorio y de hecho tuvo efecto positivo y negativo sobre las variables evaluadas; su requerimiento para este cultivo es bajo, como lo indican los datos de su acumulación en la planta. En cuanto al K⁺, también su efecto sobre el rendimiento y las demás variables evaluadas fue mínimo y estuvo correlacionado con las dosis de NO₃⁻. También su efecto fue positivo y negativo, pero su requerimiento fue muy alto, ya que las relaciones nitrógeno:potasio acumuladas en las hojas variaron entre 1.0 y 1.3 durante la mayor parte del ciclo de cultivo y se incrementaron hasta 1.8 entre los 90 y 108 ddt, lo cual parece indicar que no tuvo efecto sobre la calidad del fruto.

En general, los resultados obtenidos permiten aceptar la segunda hipótesis planteada en el presente estudio, del efecto sobre el rendimiento, y principalmente en el caso del nitrógeno, dado que su incremento en la solución nutritiva propició el aumento del rendimiento de fruto. Mientras que para fósforo y potasio se puede aceptar parcialmente e indicar que el efecto de la aplicación en la solución nutritiva ocasiona incrementos o reducciones del rendimiento, en función de la concentración de los otros nutrimentos.

5.2.8. Calidad del fruto de chile poblano

5.2.8.1. Tamaño y peso del fruto

Los resultados de la producción de cada corte permitieron obtener la producción acumulada de fruto para cada una de las clases evaluadas, así como el rendimiento comercial y total, a partir de los cuales se generaron las producciones acumuladas por clase para cada tratamiento (Cuadro 46). Con los datos de producción obtenidos para cada unidad experimental, se determinó el porcentaje que representó cada una de las clases de fruto evaluadas con relación a la producción total la cual fue considerada como el 100%. Los resultados así obtenidos fueron sometidos al análisis estadístico de la misma manera que se hizo con todos los resultados anteriores. El análisis estadístico indicó que no se encontraron diferencias significativas para ninguna de las clases de fruto. Posteriormente, se realizó la prueba de comparación de medias de tratamientos (Cuadro 48).

Cuadro 48. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre el porcentaje de diferentes clases de fruto de chile poblano.

| Tratamiento | Primera | Segunda | Tercera | Rezaga | Comercial | Total |
|-------------|---------------------|---------|---------|--------|-----------|-------|
| 1 | 37.9 a [†] | 37.1 a | 15.3 a | 9.7 a | 90.3 a | 100 a |
| 2 | 40.5 a | 28.8 a | 18.0 a | 12.7 a | 87.3 a | 100 a |
| 3 | 38.9 a | 32.1 a | 15.4 a | 13.9 a | 86.1 a | 100 a |
| 4 | 41.3 a | 28.7 a | 17.2 a | 12.8 a | 86.6 a | 100 a |
| 5 | 50.1 a | 34.9 a | 10.7 a | 4.4 a | 95.6 a | 100 a |
| 6 | 35.9 a | 31.8 a | 22.6 a | 9.8 a | 90.2 a | 100 a |
| 7 | 54.4 a | 22.4 a | 16.4 a | 6.9 a | 93.1 a | 100 a |
| 8 | 46.2 a | 24.1 a | 21.1 a | 8.6 a | 91.4 a | 100 a |
| 9 | 43.4 a | 28.2 a | 21.7 a | 6.9 a | 93.1 a | 100 a |
| 10 | 44.1 a | 25.2 a | 19.7 a | 10.8 a | 89.2 a | 100 a |
| 11 | 58.6 a | 24.7 a | 12.2 a | 4.6 a | 95.4 a | 100 a |
| 12 | 33.2 a | 27.9 a | 21.1 a | 17.8 a | 82.2 a | 100 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$).

Los resultados de la transformación de los datos de producción de fruto confirman que el fruto de primera clase representó el mayor porcentaje de la producción total, siendo superior al 40% del total en la mayoría de los tratamientos y además, junto con el fruto de segunda clase, formaron en promedio más del 70% de la producción del

fruto en la mayoría de los tratamientos. También es importante señalar que el fruto comercial fue en promedio el 90% de la producción total, lo cual es un porcentaje excelente para fines de producción comercial.

La falta de respuesta significativa del tamaño de fruto (clase) a la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , es un indicador de que ninguno de estos nutrimentos es determinante para la calidad del fruto, aunque también puede interpretarse como que todas las soluciones nutritivas tuvieron los niveles mínimos necesarios para manifestar las características genéticas de la planta relacionadas con la proporción de frutos de diferentes tamaños que puede producir.

Estos resultados coinciden con el reporte de Flores, *et al.* (2004) en el cual los tratamientos de K^+ no tuvieron efecto sobre la calidad nutricional de chile, pero que también señalan que un suministro incrementado de Ca^{2+} y NO_3^- en el medio de cultivo constituye una práctica usual para mejorar los atributos nutricionales del chile así como su calidad comercial. Con relación al efecto del nitrógeno, Kirnak *et al.* (2003) reportaron que el tamaño del fruto de chile dulce se incrementó al aumentar las dosis de nitrógeno de 70 a 210 kg ha^{-1} , y en plantas de tomate el nitrógeno suplemental en forma de $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ incrementó el tamaño del fruto; sin embargo, el peso por fruto decreció en los tratamientos con alto nitrógeno, particularmente en combinación con alto potasio (Gent, 2004). Además, la interdependencia de nitrógeno y potasio se refleja también en el tamaño del fruto de tomate, pues las plantas con relación potasio:nitrógeno 1:1 tuvieron el mayor peso de fruto # 2 en los primeros tres racimos, indicando que el nitrógeno tuvo gran influencia sobre la calidad del fruto (Khosla y Papadopoulos, 2001).

Por otro lado, también se ha reportado que incrementos de la concentración de potasio en la solución nutritiva de 6 me L^{-1} , no incrementaron la calidad del fruto, lo cual implica que se debe hacer un manejo racional de los fertilizantes potásicos para no exceder las dosis puesto que no reportan beneficio alguno para la producción y calidad del fruto (Bugarín *et al.*, 2002).

También se han reportado efectos del incremento de la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva sobre la calidad del fruto. Schon *et al.* (1994), encontraron que las plantas de chile desarrolladas en lana de roca que recibieron 12.5 mM L⁻¹ de nitrógeno produjeron significativamente mayor peso total del fruto que las que recibieron 8.6 mM L⁻¹. En tanto, para chile dulce, el aumento de la concentración de nitrógeno en la solución de 0.25 a 7 mM L⁻¹ propició el incremento del rendimiento de alta calidad en 350%; y el aumento, de 7 a 14 mM L⁻¹ redujo el rendimiento de alta calidad en 32%. La concentración óptima de nitrógeno para la producción del máximo rendimiento de alta calidad fue de 8.2 mM L⁻¹ (Bar-Tal *et al.*, 2001b) y para el rendimiento máximo fue de 9.4 mMol L⁻¹ (Bar-Tal *et al.*, 2001a)., por lo que la calidad del fruto de chile está influenciada por la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva.

Es importante señalar que es necesario el suministro continuo de nutrimentos durante el crecimiento de los frutos para asegurar el rendimiento y la calidad del fruto. (Zipelevish *et al.*, 2000).

5.2.8.2. Contenido de capsaicina del fruto

La pungencia (picante) de los chiles picantes es una característica importante de mercadeo y está determinada por la producción de capsaicinoides en el fruto. La capsaicina es uno de los compuestos conocidos más pungentes, siendo detectable por el paladar en diluciones tan pequeñas como 15 mg L⁻¹ (Johnson y Dicoteau, 1996).

Para el presente trabajo, una vez calculados los contenidos de capsaicina a partir de la curva de calibración y aplicando la fórmula descrita en el apartado de materiales y métodos, se obtuvieron las concentraciones de capsaicina (mg g⁻¹) con base al peso fresco del fruto analizado. Estas concentraciones también fueron ajustadas en base al peso seco de los frutos utilizados, para tener las concentraciones en una forma comparativa, ya que el contenido de humedad de los frutos no fue uniforme.

Los resultados finales de concentración de capsaicina fueron sometidos al análisis estadístico para determinar el efecto de los tratamientos aplicados sobre esta variable de calidad del fruto. Para el caso del fruto fresco, tanto en el análisis de varianza ($\alpha=0.0014$) como en el de regresión ($\alpha=0.0047$) se obtuvieron diferencias altamente significativas del efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva sobre la concentración de capsaicina en el fruto. Por otro lado, para los datos transformados a peso seco no se encontraron diferencias significativas en el análisis estadístico.

Si consideramos que los datos de concentración de capsaicina en ambos casos provienen de la misma muestra es importante aclarar las diferencias de los resultados del análisis estadístico. Las diferencias encontradas al analizar las concentraciones con base en el peso fresco se deben al contenido de humedad de los frutos al momento del análisis, de ahí que no son confiables, dado que se parte de un peso de muestra diferente y no son comparables. El peso seco, por el contrario, permite uniformizar estos resultados por lo que son más confiables y permiten concluir que la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva no tuvo efecto significativo sobre la concentración de capsaicina en el fruto de chile poblano.

La comparación de medias de tratamientos para peso fresco y seco (Cuadro 49), indica que la concentración de capsaicina en el fruto aumentó ligeramente al incrementar el nivel de NO_3^- en la solución nutritiva y disminuyó ligeramente al aumentar las concentraciones de H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva. Velasco (1999), coincide en reportar que el aumento de NO_3^- en la solución nutritiva no tuvo efecto sobre la concentración de capsaicina, mientras que el suministro creciente de H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva disminuyó la concentración de capsaicina en frutos de chile jalapeño. M. Ríos (1969) también encontró que el aumento de la concentración de K^+ en la solución nutritiva redujo la concentración de capsaicina. Johnson y Dicoteau (1996), reportaron que al aumentar la concentración de nitrógeno de 1 a 15 mM L^{-1} , se incrementó la concentración de capsaicina en el fruto de chile jalapeño c.v. Jalapa, pero no encontraron efectos de la aplicación de diferentes dosis de potasio en la solución nutritiva sobre la concentración de capsaicina.

Cuadro 49. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ , sobre la concentración de capsaicina en frutos de chile poblano.

| Número de tratamiento | Nutrimento (me L^{-1}) | | | Concentración de capsaicina (mg g^{-1}) | |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------|--|-----------|
| | NO_3^- | H_2PO_4^- | K^+ | Peso fresco | Peso seco |
| 1 | 6 | 0.5 | 6 | 0.254 ab [†] | 2.685 a |
| 2 | 10 | 0.5 | 6 | 0.196 b | 2.402 a |
| 3 | 6 | 1.5 | 6 | 0.255 ab | 2.345 a |
| 4 | 10 | 1.5 | 6 | 0.263 ab | 2.505 a |
| 5 | 6 | 0.5 | 8 | 0.263 ab | 2.107 a |
| 6 | 10 | 0.5 | 8 | 0.318 a | 3.147 a |
| 7 | 6 | 1.5 | 8 | 0.267 ab | 2.266 a |
| 8 | 10 | 1.5 | 8 | 0.270 ab | 2.280 a |
| 9 | 8 | 1.0 | 7 | 0.246 ab | 2.160 a |
| 10 | 12 | 1.0 | 7 | 0.322 a | 2.828 a |
| 11 | 8 | 2.0 | 7 | 0.319 a | 2.780 a |
| 12 | 8 | 1.0 | 9 | 0.230 b | 2.308 a |

[†] Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales ($\alpha \leq 0.05$).

Las concentraciones de capsaicina obtenidas para chile poblano se consideran medias, lo cual implica que los frutos cosechados fueron picosos, y similares a las reportadas por Ríos (1969) para este mismo tipo de chile (0.200 a 0.260 mg g^{-1}). También son equivalentes a las reportadas por Velasco (1999) para chile jalapeño M (0.270 a 0.360 mg g^{-1}). Mientras que Cázares *et al.* (2005) encontraron concentraciones de capsaicina que fluctuaron entre 0.075 a 0.358 mg g^{-1} para distintos tipos de chiles picantes del estado de Yucatán. Esto es un indicador de que el material genético determina en gran medida el contenido de capsaicina, aunque la fertilización es importante.

5.2.8.3. Análisis de la calidad del fruto

La aplicación de diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva no tuvo efecto significativo sobre el tamaño del fruto, ni sobre el contenido de capsaicina. En todos los tratamientos se obtuvieron altos porcentajes de frutos de primera y segunda clases, los cuales son los de mayor precio en el mercado. La distribución del tamaño de los frutos esté determinada genéticamente en su mayor parte, pero es posible que las prácticas de manejo que determinan el vigor y tamaño de la planta también tenga una participación sobre la calidad del fruto.

La falta de efecto significativo de la nutrición sobre la calidad del fruto pudo deberse a que en todos los tratamientos se tuvo un buen abasto de nutrimentos, lo cual se reflejó en los rendimientos obtenidos. Por lo anterior, la segunda hipótesis se rechaza en cuanto al tamaño del fruto, ya que la aplicación de diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva no afectó el tamaño del fruto de chile poblano.

Los resultados de la concentración de capsaicina, también nos llevan a rechazar la segunda hipótesis, pues la aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva no incrementó la concentración de capsaicina de los frutos de chile poblano.

6. CONCLUSIONES

6.1. Producción de plántulas de chile poblano

El incremento de la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva redujo el valor de las lecturas SPAD y la MS de la raíz, e incrementó la relación MS aérea/raíz y la eficiencia de absorción de la raíz, pero no afectó el crecimiento de las plántulas.

El incremento de la concentración de H_2PO_4^- en la solución nutritiva no tuvo efecto sobre el crecimiento, producción de MS y concentración nutrimental de las plántulas.

El incremento de la concentración de K^+ en la solución nutritiva aumentó la acumulación de nitrógeno y potasio en las hojas, así como la eficiencia de absorción de la raíz, pero no afectó el crecimiento y la producción de MS de las plántulas.

Las plántulas de mejor calidad se obtuvieron con la aplicación de una solución nutritiva con **6 me L⁻¹ de NO_3^- , 0.5 me L⁻¹ de H_2PO_4^- y 7 me L⁻¹ de K^+** , por lo que esta solución se recomienda, con los demás componentes y características de la solución universal Steiner, para la producción comercial de plántulas de chile poblano, .

6.2. Fenología, crecimiento y producción de fruto

La aplicación de diferentes dosis de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ no tuvo efecto sobre el inicio y la duración de la etapas fenológicas, pero la información obtenida puede aplicarse en el manejo de las plantaciones comerciales del cultivo de chile poblano.

El incremento de la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva tuvo un efecto positivo sobre todas las variables morfológicas de crecimiento, y propició el aumento de la producción de materia seca total y de los órganos de la planta, en al menos una etapa fenológica. Mientras que el incremento de las concentraciones de H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva tuvieron poco o nulo efecto sobre las mismas variables.

El aumento de la concentración de NO_3^- en la solución nutritiva también incrementó la concentración y acumulación foliar de nitrógeno, fósforo y potasio, al menos en una etapa fenológica; mientras que al aumentar la concentración de H_2PO_4^- se incrementó la concentración y acumulación foliar de fósforo; y la aplicación de diferentes dosis de K^+ favoreció el incremento y acumulación foliar tanto de potasio como de nitrógeno, manifestándose una relación de sinergismo entre estos dos nutrientes.

La aplicación de diferentes concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- y K^+ en la solución nutritiva no afectaron la calidad del fruto (tamaño y contenido de capsaicina), lo cual indica que estas características son afectadas principalmente por la información genética cuando las plantas se desarrollan sin restricción nutrimental.

El tratamiento 10 fue el que tuvo mayor efecto sobre todas las variables evaluadas y produjo el mayor rendimiento, el cual fue el resultado de la mayor altura, diámetro de tallo, número de hojas, ramas y frutos, área foliar, lecturas SPAD, producción de MS y acumulación foliar de nutrientes en las plantas. Por lo tanto, para obtener el rendimiento máximo de fruto comercial y total de chile poblano se recomienda usar una solución nutritiva con **12 me L⁻¹ de NO_3^- , 1.0 me L⁻¹ de H_2PO_4^- y 7 me L⁻¹ de K^+** , con los demás componentes y características de la solución universal Steiner.

Los resultados obtenidos en esta investigación indican que la producción de chile poblano puede incrementarse sustancialmente y ser más rentable, ya que el rendimiento más bajo (35.6 Mg ha⁻¹) supera por más del doble el rendimiento medio nacional. Además, el rendimiento más alto (63.6 Mg ha⁻¹), así como el tamaño de los frutos obtenidos, permiten su competitividad comercial tanto a nivel nacional como internacional, mejorando la perspectiva económica de la producción de este cultivo.

El diseño San Cristóbal permite realizar experimentos de fertilización con tres factores y cuatro niveles de cada uno, con un número de combinaciones de tratamientos (12) muy práctico y económico. Además, el análisis estadístico del modelo se simplifica con el uso del SAS y proporciona resultados que se pueden interpretar con cierta facilidad y tomar decisiones sobre los factores y niveles experimentales estudiados.

7. LITERATURA CITADA

- Adams, P. 1994. Nutrition of greenhouses vegetables in NFT and hydroponics systems. *Acta Horticulturae* 361: 245 – 257.
- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, Edo. de México. pp. 37-59.
- Aloni, B., T. Pashkar, and L. Karni. 1991. Nitrogen supply influences carbohydrate partitioning of pepper seedlings and transplant development. *Journal of American Society and Horticultural Science* 116: 995-999.
- Aloni, B., L. Karni, I. Rylski, and Z. Zaidman. 1994. The effect of nitrogen fertilization and shading on the incidence of “colour spots” in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) fruit. *Journal of Horticultural Science* 69: 767-773.
- Alonso B., M. 2001. Tensión de humedad del suelo, nutrición nitrogenada y potásica, sobre el crecimiento, rendimiento y calidad del chile jalapeño *Capsicum annuum* L. en fertirriego. Tesis de Doctor en Ciencias. Especialidad en Hidrociencias. IRENAT. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México
- Archer, J. 1988. Crop nutrition and fertilizers use. Ed. Farming Press LTD., London, Great Britain. p. 24.
- Arellano G., M. y M. A. Gutiérrez C. 2003. Efecto de la nutrición vegetal en el peso y número de frutos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). En: Resúmenes del X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. UACH- Depto. de Fitotecnia. 20 al 24 de octubre de 2003. Chapingo, Edo. de México. pág. 13.
- Armenta B., A. D. 1998. Relaciones óptimas de aniones y de cationes en la solución nutritiva en riego por goteo para la producción de tomate. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 128 p.
- ASERCA. 1998. Chile verde: una hortaliza de México para el mundo. *Claridades Agropecuarias*. 56: 1-17. Abril. México, D. F.
- Baghour, M., E. Sánchez, J. M. Ruiz, and L. Romero. 2001. Metabolism and efficiency of phosphorus utilization during senescence in pepper plants: response to nitrogenous and potassium fertilization. *Journal of Plant Nutrition* 24: 1731–1743.
- Bajaj, K. L., K. Gurdeep, and B. S. Sooch. 1980. Varietal variation in some important chemical constituents on chili (*Capsicum annuum* L.) fruits. *Vegetable Science* 7: 48-54.

- Bar-Tal, A., B. Aloni, L. Karni, J. Oserovitz, A. Hazan, M. Itach, S. Gantz, A. Avidan, I. Posalski, N. Tratkovski, and R. Rosenberg. 2001a. Nitrogen nutrition greenhouse pepper. I. Effects of nitrogen concentration and $\text{NO}_3\text{:NH}_4$ ratio on yield, fruit shape, and the incidence of blossom-end rot in relation to plant mineral composition. *HortScience* 36: 1244-1251.
- Bar-Tal, A., B. Aloni, L. Karni, and R. Rosenberg. 2001b. Nitrogen nutrition greenhouse pepper. II. Effects of nitrogen concentration and $\text{NO}_3\text{:NH}_4$ ratio on growth, transpiration, and nutrient uptake. *HortScience* 36: 1252-1259.
- Bar-Yosef, B. 1999. Advances in fertigation. *Advances in Agronomy* 65: 1-77.
- Bonneville, M. C. and J. W. Fyles. 2006. Assessing variations in SPAD 502 chlorophyll meter measurements and their relationships with nutrient content of trembling aspen foliage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37: 525 – 539.
- Borch, K., C. Millar, K.M. Brown, and J.P. Lynch. 2003. Improved drought tolerance in marigold by manipulation of root growth with buffered-phosphorus nutrition. *HortScience* 38: 212-216.
- Borges G., L., J. Chuc P., A. Escamilla B., y F. Medina L. 2006. Cinética de la absorción de potasio por las raíces de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agrociencia* 40: 431 - 440.
- Bosland, P.W. 1992. Chiles: a diverse crop. *HortTechnology* 2: 6-10.
- Broadley, M. R., A. Burns, and I. G. Burns. 2002. Relationships between phosphorus forms and plant growth. *Journal of Plant Nutrition* 25: 1075 – 1088.
- Bugarín M., R., A. Galvis S., P. Sánchez G., y D. García P. 2002. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra* 20: 391-399.
- Burgueño, H. 1999. La fertigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Vol. 2. 4ª. Ed. Culiacán, Sin. 69 pág.
- Castelli, F. R., R. Contillo, y F. Miceli. 1996. Non destructive determination of leaf chlorophyll content in four crop species. *Journal of Agronomy and Crop Science* 177: 275 – 283.
- Castro B., R., P. Sánchez G., A. Galvis S., A. Peña L., y M. Sandoval V. 2003. Demanda de nitrógeno en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). En: Resúmenes del X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. UACH- Depto. De Fitotecnia. 20 al 24 de octubre de 2003. Chapingo, Edo. de México. pág. 130.

- Cázares S., E., P. Ramírez V., F. Castillo G., R. M. Soto H., M. T. Rodríguez G., y J. L. Chávez S. 2005. Capsaicinoides y preferencia de uso en diferentes morfotipos de chile (*Capsicum annuum* L.) del centro-oriente de Yucatán. *Agrociencia* 39: 627-638.
- Chang, S. X and D.J. Robison 2003. Nondestructive and rapid estimation of hardwood foliar nitrogen status using the SPAD-502 chlorophyll meter. *Forestry and Ecology Management* 181: 331-338.
- Chartzoulakis, K. and N. Drosos. 1997. Water requirements of greenhouse grown pepper under drip irrigation. *Acta Horticulturae* 449: 175-198.
- Ching, A. 2000. The effect of transplant container cell shape on vegetative growth and root yield of sweet potato. *Acta Horticulturae* 516: 163-167.
- Clark, A. G. 1992. Drip irrigation management for vegetable production. *Horticultural Technology* 2: 32-37.
- Coffey, D. L. 1983. Vegetable crop fertilization for high yields and quality. *Better Crops with Plant Food* (67): 20-21.
- Colla, G., Y. Roupael, A. L. Molle, F. Saccardo, A. Graifenberg, and L. Giustiniani. 2004a. Influences of mineral nutrition on growth and elemental composition of hydroponically grown zucchini plants. *Acta Horticulturae* 644: 399-407.
- Colla, G, S. Fanasca, A.L. Molle, and F. Saccardo. 2004b. Use of hydroponic culture to assess the mineral nutrition of zucchini squash. *Acta Horticulturae* 644: 457-462.
- Davies, F. T., S. A. Duray, L. Phavaphutanon, and, R. S. Stahl. 1999. Influence of phosphorus on gas exchange and plant growth of two morphologically distinct types of *Capsicum annuum*. *Photosynthetica* 36: 99–106.
- Debaeke, P, P. Rouet, and E. Justes. 2006. Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: Application to durum wheat. *Journal of Plant Nutrition* 29: 75-92.
- Delfine, S., F. Loreto, M. Centritto, G. Santarelli, and A. Alvino. 1999. Effects of water stress on the yield and photosynthesis of field-grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Acta Horticulturae* 537: 223-229.
- Delgado M., A., A. Lara H., A. D. Armenta B., J. J. Avelar M., P. Preciado M., y J. Llamas L. 2003. Dosis de nitrógeno en el crecimiento y calidad de plántulas de chile. En: Resúmenes del X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. UACH- Depto. De Fitotecnia. 20 al 24 de octubre de 2003. Chapingo, Edo. de México. pág. 46.

- Domínguez A., B. A., C. Villar M., M. A. Tiscareño I., y G. Flores T. 2001. Control de maleza postemergente en el cultivo de tomate, en San Luis de la Paz, Gto. Horticultura Mexicana Vol. 8: 33.
- Domínguez V., A. 1993. Fertirrigación. Ed. Mundi prensa. Madrid, España. 217 p.
- Doncheva, S., V. Vassileva, G. Ignatov, S. Pandev, R. Dris, and R. Niskanen. 2001. Influence of nitrogen deficiency on photosynthesis and chloroplast ultrastructure of pepper plants. Agricultural Food Science in Finland 10: 59–64.
- Dufault, R. H. 1987. Use of slow-release nitrogen and phosphorus fertilizers in celery transplant production. HortScience 22: 1268-1270.
- FAOSTAT. 2006. FAO statistical databases. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
<http://faostat.fao.org/>
- Fox, R. H., W. P. Piekielek, and K. E. Macneal. 2001. Comparison of late-season diagnostic tests for predicting nitrogen status of corn. Agronomy Journal. 93: 590–597.
- Fujiwake, H., T. Suzuki, and K. Uwai. 1980. Intracellular localization of capsaicin and its analogues in *Capsicum* fruit II: the vacuole as the intracellular accumulation site of capsaicinoid in the protoplast of *Capsicum* fruit. Plant and Cell Physiology 21: 1023-1030.
- García G., H. S., J. Ortega M., E. García R., C. Martínez M., y C. I. Beristáin G. 1995. La capsaicina, el principio pungente del chile; su naturaleza, absorción, metabolismo y efectos farmacológicos. Ciencia 46: 84-102.
- García H., J. L., R. D. Valdez C., B. Murillo A., A. Nieto G., L. F. Beltrán M. R. Magallanes Q., and E. Troyo D. 2004. Compositional nutrient diagnosis and main nutrient interactions in yellow pepper grown on desert calcareous soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 167: 509-515.
- Gent M., P. N. 2003. Solution electrical conductivity and ratio of nitrate to other nutrients affect accumulation of nitrate in hydroponic lettuce. Hortscience 38: 222–227.
- Gent M., P. N. 2004. Effect of nitrogen and potassium supply on yield and tissue composition of greenhouse tomato. Acta Horticulturae 644: 369-375.
- Hartz, T. K., C. Giannini, E. M. Miyao, and J. G. Valencia. 2002. Divergent transplant production practices produce comparable growth, yield, and quality of processing tomatoes. HortScience 37: 296 – 299.

- Hayes, J. E., Y. G. Zhu, T. Mimura, and R. J. Reid. 2004. An assessment of the usefulness of solution culture in screening for phosphorus efficiency in wheat. *Plant and Soil* 261: 91–97.
- Hernández, T., R. Martínez E., A. Galvis S., y R. Bugarin M. 2003. La demanda nutrimental del chile (*Capsicum annuum* L.). En: Resúmenes del X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. UACH- Depto. de Fitotecnia. 20 al 24 de octubre de 2003. Chapingo, Edo. de México. pág. 89.
- Huang, J. S., P. V. Nelson, D. A. Bailey, W. C. Fonteno, and N. C. Mingis. 2002. Assessment of the need for nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur preplant nutrients for plug seedling growth. *HortScience* 37: 529–533.
- Jensen, M. H. and W. L. Collins. 1985. Hydroponic vegetable production. *Horticultural Reviews* 7: 483-558.
- Jia, L., X. Chen, F. Zhang, A. Buerkert, and V. Römheld. 2004. Use of digital camera to assess nitrogen status of winter wheat in the northern China Plain. *Journal of Plant Nutrition* 27: 441-450.
- Johnson Ch., D. and D. R. Decoteau. 1996. Nitrogen and potassium fertility affects jalapeño pepper plant growth, pod yield and pungency. *HortScience* 3: 1119-1123.
- Jones, J. B. Jr., B. Wolf, and H. A. Mills. 1991. *Plant analysis handbook*. Micro-Macro Publishing Inc. Athens, Georgia. 212 p.
- Kang, J. G. and M.W. van Iersel. 2004. Nutrient solution concentration affects shoot:root ratio, leaf area ratio, and growth of subirrigated salvia (*Salvia splendens*). *HortScience* 39: 49-54.
- Khosla, S. and A. P. Papadopoulos. 2001. Influence of K:N ratio and EC on tomato plant raising. *Acta Horticulturae* 548: 149-156.
- Kirnak, H., C. Kaya, D. Higgs, and I. Tas. 2003. Responses of drip irrigated bell pepper to water stress and different nitrogen levels with or without mulch cover. *Journal of Plant Nutrition* 26: 263-277.
- Li, Y. C., A. K. Alva, D. V. Calvert, and M. A. Zhang. 1998. A rapid nondestructive technique to predict leaf nitrogen status of grapefruit tree with various nitrogen fertilization practices. *HortTechnology* 8: 81-86.
- Liptay, A., C. S. Tan, T. J. Jewett, C. Drury, and I. van Wesenbeeck. 1997. Effect of fertigation on processing tomato production in two sandy loam soils. *Acta Horticulturae* 449: 349-353.
- López F., M. C. 2001. Qué significa para México la ley de inocuidad alimentaria. En: Simposio de Inocuidad Alimentaria. *Horticultura Mexicana* 8: 35-36.

- Madeira, A. C. and A. de Varennes. 2005. Use of chlorophyll meter to assess the effect of nitrogen on sweet pepper development and growth. *Journal of Plant Nutrition* 28: 1133–1144.
- Maroto B., I. V. 2002. *Horticultura herbácea especial*. 5ª. edición. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. pp. 456–479.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. 2nd. edition. Institute of Plant Nutrition. Academic Press. London, Harcourt Brace & Company, Publisher. New York, USA. 889 p.
- Martínez G., A. y M. A. Martínez D. 1996. *Diseño de experimentos con fertilizantes*. Publicación especial 5. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, Edo. de México. 155 p.
- Maruo, T., M. Takagaki, and Y. Shinohara. 2004. Critical nutrient concentrations for absorption of some vegetables. *Acta Horticulturae* 644: 493-499.
- Mata V., H. 2001. *Requerimientos nutricionales del chile serrano (Capsicum annum L.) con fertigación y acolchado plástico*. Tesis de Doctor en Ciencias. Especialidad en Edafología. IRENAT. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México.
- Melton, R. R. and R. J. Dufault. 1991. Nitrogen, phosphorus, and potassium fertility regimes affect tomato transplant growth. *HortScience* 26: 141-142.
- Mengel, K. and E. A. Kirkby. 1981. *Principles of plant nutrition*. 2nd. edition. International Potash Institute. Bern, Switzerland. 573 p.
- Miller, C. H., R. E. McCollum, and S. Claimon. 1979. Relationships between growth of bell peppers (*Capsicum annum L.*) and nutrient accumulation during ontogeny in field environments. *Journal of American Soil Science* 104: 852-857.
- Mills, H. A. and J. B. Jones Jr. 1996. *Plant Analysis Handbook II*. MicroMacro Publishing, Inc. Athens, Georgia, USA.
- Mugnai, S., P. Vernieri, and F. Tognoni. 2000. Container volume effects on morphology and physiology of tomato seedlings. *Acta Horticulturae* 516: 49-56.
- Nijensohn, L. 1981. *Fertilización en el riego localizado*. En: *Avances en la microirrigación*. IV Seminario Latinoamericano de riego por goteo. Barquisimeto, Venezuela.
- Ortiz S., C.A. 1987. *Agroclimatología cuantitativa con aplicación en la república mexicana*. 3ª edición. Depto. de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. 327 p.

- Paschold, J. P. and H. Zengerle. 1990. Sweet pepper production in a closed system in mound culture with special consideration to irrigation scheduling. *Acta Horticulturae* 278: 329-333.
- Peil, R. M. y J. L. Gálvez. 2005. Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de hortalizas de fruto cultivadas en invernadero. *Revista Brasileira Agrociencia* 11: 5–11.
- Piekielek, W. P., R.H. Fox, J. D. Toth, and K. E. MacNeal. 1995. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agronomy Journal* 87: 403-408.
- Pozo C., O. 2000. Programa nacional de chile. SAGARPA. INIFAP. CIR Noreste. s/p.
- Quiñónez P., F. y M. Luján F. 2002. Differential response of jalapeño genotypes to the damage for pepper weevil (*Anthonomus eugenii* Cano). In: Proceedings of 16th International Pepper Conference. November 10-12. Tampico, Méx. pág. 44.
- Riga, P. and M. Anza. 2003. Effect of magnesium deficiency on pepper growth parameters: implications for determination of magnesium-critical value. *Journal of Plant Nutrition* 26:1581-1593.
- Ríos M., V. M. 1969. Capsaicina en frutos del género *Capsicum*. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. IPN. México, D. F.
- Rivas A., S. N., J. N. Uribe S., J. V. Gamero S., M. E. García S., y L. Reséndiz R. 2002. Pepper production system (*Capsicum annum* L.) in Durango, Méx. In: Proceedings of 16th International Pepper Conference. November 10-12. Tampico, Méx. pág. 50.
- Rodríguez M., M.N., G. Alcántar G., A. Aguilar S., J. D. Etchevers B., y J. A. Santizo R. 1998. Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra* 16: 135-141.
- Rojas, B.A. 1979. Análisis estadístico del diseño “San Cristóbal” con tres factores. SARH. INIA. Temas didácticos No. 7. México, D.F. 17 p.
- SAGARPA, 2003. Sistema Agropecuario de Consulta (SIACON). www.siap.gob.mx/
- Sakata Seeds. 2004. “Caballero” chile híbrido de tipo poblano. Características y cultivo. Folleto técnico. Sakata Seeds. México.
- Sandoval V., M, C.W. Wood, and E.A. Guertal. 2002. Tomato leaf chlorophyll meter readings as affected by variety, nitrogen form, and nighttime nutrient solution strength. *Journal of Plant Nutrition* 25: 2129-2142.

- Santamaría, P, V. Valenzano, F. Serio, and A. Elia. 2004. Growth and nutrient composition of cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants grown in a closed soilless system. *Acta Horticulturae* 659: 629-633.
- Schon, M. K., M. P. Compton, E. Bell, and I. Burns. 1994. Nitrogen concentrations affect pepper yield and leachate nitrate-nitrogen from rockwool culture. *HortScience* 29: 1139-1142.
- Schwarz, D. 2004. Roots-connecting the growing media with growing success. *Acta Horticulturae* 644: 327–336.
- Sexton, P. and J. Carroll. 2002. Comparison of SPAD chlorophyll meter readings vs. petiole nitrate concentration in sugarbeet. *Journal of Plant Nutrition* 25: 1975-1986.
- Soundy, P., D.J. Cantliffe, G.J. Hochmuth, and P.J. Stoffella. 2001a. Nutrient requirements for lettuce transplants using a floatation irrigation system. I. Phosphorus. *HortScience* 36: 1066-1070.
- Soundy, P., D.J. Cantliffe, G.J. Hochmuth, and P.J. Stoffella. 2001b. Nutrient requirements for lettuce transplants using a floatation irrigation system. II. Potassium. *HortScience* 36: 1071-1074.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15: 134-154.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. ISOSC. Proceedings of 36th. International Congress on Soilless Culture. The Netherlands. pp. 633-650.
- Sundstrom, F. J., C. H. Thomas, R. L. Edwards, and G. R. Baskin. 1984. Influence of N and spacing on mechanically harvested Tabasco pepper. *Journal of American Society of Horticultural Science* 109: 642–645.
- Swiader, J. M. and A. Moore. 2002. SPAD-chlorophyll response to nitrogen fertilization and evaluation of nitrogen status in dryland and irrigated pumpkins. *Journal of Plant Nutrition* 25: 1089-1100.
- Tremblay, N., S. Yelle, and A. Gosselin. 1987. Effects of CO₂ enrichment, nitrogen and phosphorus fertilization on growth and yield of celery transplants. *HortScience* 22: 875-876.
- Tun D., J. C. 1999. Requerimientos de nitrógeno, fósforo y potasio, para chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Horticultura Mexicana* 7: 101.
- Tun D., J. C. 2000. Aplicación de fertilizantes a través del agua de riego, a hortalizas y frutales, mediante sistemas de riego presurizado. Informe Final. C.E. Zona Henequenera. CIR Sureste. INIFAP. SAGAR. Sin publicar. 101 p.

- Tun D., J. C. 2001. Chile habanero: características y tecnología de producción. Folleto Técnico. C.E. Zona Henequenera. CIR Sureste. INIFAP. SAGARPA. 74 p.
- Tun D., J. C. 2003. Requerimientos de nitrógeno, fósforo y potasio, para melón reticulado (*Cucumis melo* L.). En: Resúmenes del X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. UACH- Depto. de Fitotecnia. 20 al 24 de octubre. Chapingo, Edo. de México. pág. 108.
- Urrieta V., J. A. 2006. Absorción de nitrógeno en plantas expuestas a soluciones con NH_4^+ y NO_3^- excluyentes. Tesis de Maestro en Ciencias. Especialidad de Edafología. IRENAT. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 112 p.
- Vázquez R., M. D., M, Arellano G., y M. A. Gutiérrez C. 2003. Efecto de la nutrición vegetal en el peso y número de frutos de chile caribe (*Capsicum annuum* L.). En: Resúmenes del X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. UACH- Depto. de Fitotecnia. 20 al 24 de octubre. Chapingo, Edo. de México. pág. 14.
- Velasco V., V. A. 1999. Influencia del N, P, K y Si en la tolerancia al virus jaspeado del tabaco en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.). Tesis de Doctor en Ciencias. Especialidad de Edafología. IRENAT. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. De México.
- Villa C., M., A. L. Ulery, E. A. Catalán V., and M. D. Remmenga. 2003. Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of chile pepper plants. Soil Science Society of American Journal 67:1781-1789.
- Wang, Q., J. Chen, and Y. Li. 2004. Nondestructive and rapid estimation of leaf chlorophyll and nitrogen status of peace lily using a chlorophyll meter. Journal of Plant Nutrition 27: 557-569.
- Weston, L.A. and B. H. Zandstra. 1989. Trasplant age and nitrogen and phosphorus nutrition effects on growth and yield of tomatoes. HortScience 24: 88-89.
- Xu, G., S. Wolf, and U. Kafkafi. 2001a. Interactive effect of nutrient concentration and container volume on flowering, fruiting, and nutrient uptake of sweet pepper. Journal of Plant Nutrition 24: 479-501.
- Xu, G., S. Wolf, and U. Kafkafi. 2001b. Effect of varying nitrogen form and concentration during growing season on sweet pepper flowering and fruit yield. Journal of Plant Nutrition 24: 1099-1116.
- Xu, G., S. Wolf, and U. Kafkafi. 2002. Ammonium on potassium interaction in sweet pepper. Journal of Plant Nutrition 25: 719-734.
- Yadava, U.L. 1986. A rapid and nondestructive method to determine chlorophyll in intact leaves. HortScience 21: 1449-1450.

- Yamamoto, A., T. Nakamura, J. J. Adu-Gyamfi, and Saigusa. 2002. Relationship between chlorophyll content in leaves of sorghum and pigeonpea determined by extraction method and by chlorophyll meter (SPAD-502). *Journal of Plant Nutrition* 25: 2295-2301.
- Zewdie, Y. and P. W. Bosland. 2000. Pungency of chile (*Capsicum annuum* L.) fruit affected by node position. *HortScience* 35: 1174.
- Zipelevish, E., A. Grinberge, S. Amar, Y. Gilbo, and U. Kafkafi. 2000. Eggplant dry matter composition fruit yield and quality as affected by phosphate and total salinity caused by potassium fertilizers in the irrigation solution. *Journal of Plant Nutrition* 23: 431-442.
- Zúñiga E., L. 2003. Producción de chile jalapeño en un suelo vertisol mediante la técnica de fertigación (riego por microgoteo). Tesis de Doctor en Ciencias. Especialidad de Edafología. IRENAT. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Edo. de México. 171 p.
- Zúñiga E., L., J. Martínez H., G. Baca C., A. Martínez G., J. J. Tirado T., y J. Kohashi S. 2003. Producción de chile pimiento en dos sistemas de riego bajo condiciones hidropónicas. *Agrociencia* 38: 207-218.

APÉNDICE

Cuadro A1. Programa del SAS empleado para el análisis estadístico del factorial 3 x 2 x 2, para la variable Lecturas SPAD de las hojas de plántulas de chile poblano.

```
DATA SPAD;
INPUT TRAT REP N P K SPAD;
CARDS;
1.0 1.0 6.0 0.5 5.0 42.700
1.0 1.0 6.0 0.5 5.0 41.900
1.0 3.0 6.0 0.5 5.0 41.900
2.0 1.0 9.0 0.5 5.0 40.200
.
.
10.0 1.0 6.0 1.0 7.0 43.500
10.0 2.0 6.0 1.0 7.0 43.900
.
.
12.0 2.0 12.0 1.0 7.0 40.000
12.0 3.0 12.0 1.0 7.0 41.900
PROC PRINT; PROC ANOVA; CLASSES N P K;
MODEL SPAD= N P K N*P N*K P*K N*P*K;
MEANS N P K N*P N*K P*K N*P*K/tukey; RUN;
```

Cuadro A2. Análisis de varianza del factorial 3 x 2 x 2, para la variable Lecturas SPAD de las hojas de plántulas de chile poblano.

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Valor F | Pr > F |
|--------------|--------------------|-------------------|------------------|---------|--------|
| Tratamientos | 11 | 58.78667 | 5.34424 | 3.87** | 0.0027 |
| <i>N</i> | 2 | 33.94500 | 16.9725 | 12.30** | 0.0002 |
| <i>P</i> | 1 | 3.484444 | 3.48444 | 2.53ns | 0.1251 |
| <i>K</i> | 1 | 1.067778 | 1.06777 | 0.77ns | 0.3877 |
| <i>N*P</i> | 2 | 1.557222 | 1.55722 | 0.56ns | 0.5761 |
| <i>N*K</i> | 2 | 3.570555 | 1.78528 | 1.29ns | 0.2926 |
| <i>P*K</i> | 1 | 8.410000 | 8.41000 | 6.10* | 0.0211 |
| <i>N*P*K</i> | 2 | 6.751667 | 3.37583 | 2.45ns | 0.1079 |
| Error | 24 | 33.11333 | 1.37972 | | |
| Total | 35 | 91.90000 | | | |
| R2 = 0.64 | CV = 2.90% | Media = 40.5 | | | |

Cuadro A3. Procedimiento empleado para la determinación del contenido de capsaicina en frutos de chile poblano (Ríos, 1969).

En el laboratorio, de las muestra de fruto de cada unidad experimental se escogió el fruto más grande y maduro y de cada fruto se obtuvo una muestra de 10 g de peso fresco mediante un corte transversal del tercio superior del fruto, y la fracción restante del fruto se pesó de nuevo, se colocó en bolsa de papel y se metió a la estufa a 65°C para su secado y posterior determinación de peso seco. La muestra empleada para la extracción incluyó parte de los tejidos de la placenta, mesocarpio, endocarpio, pericarpio y semillas de los frutos seleccionados. Se colocaron los 10 g de fruto fresco finamente picado en cartuchos de extracción Whatman de 22 mm de diámetro por 80 mm de largo, los cuales se refrigeraron a 5°C hasta el momento de la determinación.

Para la extracción, los cartuchos se introdujeron en el equipo soxhlet en el que se agregaron 80 mL de alcohol isopropílico grado reactivo y se realizó la destilación a reflujo a 75°C durante 2 h. Los extractos obtenidos, de color verde claro, se colocaron en frascos de vidrio de 90 mL y se enfriaron a temperatura ambiente. La purificación se realizó aplicando 2 g de carbón vegetal activado Merck a los extractos, se agitaron por 5 minutos en agitador de vaivén y luego se filtraron a través de papel Whatman No. 42, agregando 30 mL de alcohol isopropílico para lavar el carbón activado. Finalmente, los extractos se aforaron a 125 mL con alcohol isopropílico.

Para la cuantificación de la capsaicina, los extractos se diluyeron a razón de 10 mL de alícuota y se aforaron a 20 mL con alcohol isopropílico, finalmente se leyeron en un espectrofotómetro ThermoSpectronic Modelo Genesys 6 a una longitud de onda de 281 nm. Los cálculos se realizaron con la siguiente fórmula:

$$\text{Capsaicina (mg mL}^{-1}\text{)} = \text{mg mL}^{-1} \text{ CC} \times \text{Dm} \times \text{Dv}$$

Donde: $\text{mg mL}^{-1} \text{ CC}$ = lectura en la curva de calibración

Dm = Dilución de masa, volumen de extractante g^{-1} de muestra

Dv = Dilución de volumen, volumen de la alícuota aforo de alícuota $^{-1}$.

Cuadro A4. Programa del SAS empleado para el análisis estadístico del diseño San Cristóbal, para la variable Producción de fruto total.

```
DATA FRUTO TOTAL;
INPUT TRAT REP N P K TOTAL;
N2=N*N; P2=P*P; K2=K*K; NP=N*P; NK=N*K; PK=P*K;
CARDS;
1 1 6.0 0.5 6.0 838.1
1 2 6.0 0.5 6.0 851.2
1 3 6.0 0.5 6.0 982.5
2 1 10.0 0.5 6.0 1100.4
.
.
.
12 2 8.0 1.0 9.0 1081.4
12 3 8.0 1.0 9.0 1171.0
PROC PRINT; PROC ANOVA; CLASSES TRAT;
MODEL TOTAL=TRAT; MEANS TRAT/TUKEY;
PROC GLM; MODEL TOTAL=N P K N2 P2 K2 NP NK PK; RUN;
```

Cuadro A5. Resultados del análisis de varianza y de regresión del diseño San Cristóbal, para la variable Producción de fruto total.

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Valor F | Pr > F |
|-------------------|--------------------|-------------------|---|---------|---------|
| Tratamientos | 11 | 1182440.4 | 107494.6 | 7.63** | <0.0001 |
| <i>Modelo</i> | 9 | 1174206.5 | 130467.4 | 9.80** | <0.0001 |
| <i>Desviación</i> | 2 | 8233.9670 | 4116.983 | 0.29ns | |
| Error | 24 | 337982.48 | 14082.60 | | |
| Total | 35 | 1520422.9 | | | |
| R2 = 0.77 | | CV = 9.79% | Media = 1178.047 g planta ⁻¹ | | |

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados Tipo I | Cuadrados medios | Valor F | Pr > F |
|----------------|--------------------|--------------------------|------------------|---------|----------|
| N | 1 | 850205.91 | 850205.91 | 63.85 | < 0.0001 |
| P | 1 | 154901.78 | 154901.78 | 11.63 | 0.0021 |
| K | 1 | 1074.1220 | 1074.1220 | 0.08 | 0.7786 |
| N ² | 1 | 82166.566 | 82166.566 | 6.17 | 0.0198 |
| P ² | 1 | 35878.170 | 35878.170 | 2.69 | 0.1127 |
| K ² | 1 | 6468.9896 | 6468.9896 | 0.49 | 0.4920 |
| NP | 1 | 3448.8037 | 3448.8037 | 0.26 | 0.6151 |
| NK | 1 | 1236.9704 | 1236.9704 | 0.09 | 0.7630 |
| PK | 1 | 38825.170 | 38825.170 | 2.92 | 0.0996 |