



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA  
INSTITUTO DE HORTICULTURA**

**EFFECTO AGRONÓMICO E IMPACTO ECONÓMICO DE FUENTES  
FERTILIZANTES, CONCENTRACIONES NUTRIMENTALES Y  
ACOLCHADO PLÁSTICO SOBRE UN CULTIVO HIDROPÓNICO  
DE JITOMATE**

**TESIS**

Como requisito parcial para obtener el grado de  
**MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**



**Presenta:**

**LUIS ALBERTO ARAGÓN RAMÍREZ**

DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
CARRERAS PROFESIONALES

**Bajo la dirección del Dr. Felipe Sánchez del Castillo**



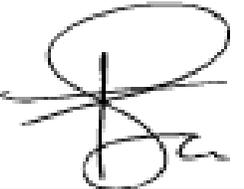
**Instituto de Horticultura**

**Chapingo, Estado de México Junio de 2019**

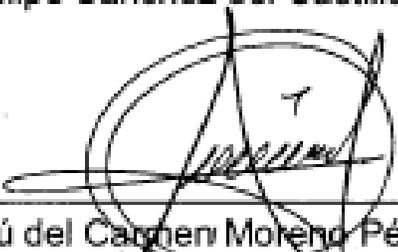
**EFFECTO AGRONÓMICO E IMPACTO ECONÓMICO DE FUENTES  
FERTILIZANTES, CONCENTRACIONES NUTRIMENTALES Y ACOLCHADO  
PLÁSTICO SOBRE UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE JITOMATE**

Tesis realizada por **LUIS ALBERTO ARAGÓN RAMÍREZ**, bajo la dirección del  
Comité Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito  
parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

DIRECTOR: 

Dr. Felipe Sánchez del Castillo

ASESOR: 

MC. Esaú del Carmen Moreno Pérez

ASESOR: 

Dr. Joel Pineda Pineda

ASESOR: 

Dr. Efraín Contreras Magaña

Chapingo, México, Junio de 2019

## CONTENIDO

	Página
LISTA DE CUADROS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	xi
AGRADECIMIENTOS.....	xii
DEDICATORIA.....	xiii
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Objetivo general.....	4
1.2. Objetivos particulares.....	4
1.3. Hipótesis.....	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1. Hidroponía o cultivos sin suelo.....	6
2.1.1. Definición y concepto.....	6
2.1.2. Variantes o modalidades de los sistemas hidropónicos.....	6
2.1.3. Objetivos de la hidroponía.....	7
2.1.4. Condiciones óptimas para la raíz.....	7
2.1.5. Razones para adoptar la tecnología de hidroponía.....	9
2.1.6. Componentes de los sistemas hidropónicos.....	10
2.2. Agricultura protegida.....	10
2.2.1. Concepto.....	10
2.2.2. Importancia a nivel mundial y nacional.....	11
2.3. Producción de jitomate en invernaderos con sistemas hidropónicos.....	12
2.3.1. Producción de jitomate.....	12
2.3.2. Sistema de producción convencional en invernadero.....	13
2.3.3. Sistemas alternativos de producción.....	13
2.4. Sustratos.....	16
2.4.1. Definición y clasificación.....	16
2.4.2. Arena de tezontle como sustrato.....	19
2.4.3. Propiedades físicas y químicas del tezontle.....	19
2.5. Contenedores.....	19
2.5.1. Volumen de contenedor.....	19
2.5.2. Tipos de contenedor.....	20
2.5.3. Características y propiedades de tinas o camas de cultivo... ..	21
2.6. Solución nutritiva.....	22
2.6.1. Definición y concepto.....	22
2.6.2. Factores que influyen en la disponibilidad y absorción de nutrientes.....	22

2.6.3. Bases para la formulación de la solución nutritiva.....	23
2.6.4. Formas de suministrar la solución nutritiva con el riego.....	29
2.6.5. Importancia del fertirriego.....	31
2.7. Eficiencia del uso de agua y nutrientes en el sistema hidropónico	31
2.7.1. Conceptualización general del balance de nutrientes.....	31
2.7.2. Nutrientes aportados diario y por ciclo.....	32
2.7.3. Nutrientes absorbidos por la planta, diario y por ciclo.....	33
2.7.4. Nutrientes drenados diario y por ciclo.....	35
2.7.5. Nutrientes retenidos en el sustrato diario y por ciclo.....	37
2.7.6. Evaporación de la solución y nutrientes precipitados.....	38
2.7.7. Acolchado plástico y su efecto en el balance de agua y nutrientes.....	39
2.7.8. Perspectivas de investigación a futuro: ahorro de agua y fertilizantes.....	40
III. EFECTO AGRONÓMICO E IMPACTO ECONÓMICO DE FUENTES FERTILIZANTES, CONCENTRACIONES TRIMENTALES Y ACOLCHADO PLÁSTICO SOBRE UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE JITOMATE.....	42
3.1. Introducción.....	42
3.2. Materiales y métodos.....	44
3.2.1. Establecimiento del experimento.....	44
3.2.2. Tratamientos.....	46
3.2.3. Variables morfológicas.....	53
3.2.4. Variables de peso seco.....	53
3.2.5. Variables de rendimiento y sus componentes.....	54
3.2.6. Uso de acolchado, consumo y ahorro de solución nutritiva...	55
3.2.7. Variables relacionadas con el balance de agua y nutrientes.	55
3.2.8. Eficiencia de absorción de agua y nutrientes.....	57
3.3. Resultados y discusión.....	58
3.3.1. Variables morfológicas.....	58
3.3.2. Variables de peso seco.....	60
3.3.3. Variables de rendimiento y sus componentes.....	63
3.3.4. Uso de acolchado, consumo y ahorro de solución nutritiva...	68
3.3.5. Variables relacionadas con el balance de agua y nutrientes.	71
3.3.5.1. Solución nutritiva y macronutrientes aportados a la planta.....	72
3.3.5.2. Macronutrientes absorbidos por la planta.....	76
3.3.5.3. Macronutrientes lixiviados en los drenajes.....	83
3.3.5.4. Macronutrientes resolubilizados en el sustrato.....	90
3.3.5.5. Balance final del sistema.....	97
3.3.6. Eficiencia de absorción de agua y nutrientes.....	103

3.4. Conclusiones.....	107
3.5. Consideraciones finales.....	109
3.6. Literatura citada.....	111

<b>CUADRO</b>	<b>LISTA DE CUADROS</b>	<b>PÁGINA</b>
Cuadro 1	Porcentajes aproximados en peso seco de los elementos componentes de plantas superiores.....	24
Cuadro 2	Rango aproximado de nutrientes en los tejidos de la planta de jitomate.....	25
Cuadro 3	Nutrientes esenciales y sus funciones principales en las plantas...	25
Cuadro 4	Concentraciones ideales de nutrientes en una solución nutritiva para el cultivo de jitomate en hidroponia.....	33
Cuadro 5	Contenido adecuado de nutrientes en la lámina foliar de jitomate hidropónico.....	33
Cuadro 6	Consumo de agua en planta de jitomate en función de la temperatura del medio radical.....	34
Cuadro 7	Consumo de agua en planta de jitomate en función de época del año.....	34
Cuadro 8	Consumo de agua en planta de jitomate en función del estado fenológico.....	35
Cuadro 9	Absorción promedio diaria de N, P, K y agua en plantas de jitomate en periodo de fructificación cultivado en NFT.....	35
Cuadro 10	Concentración de absorción para tomate en invernadero.....	35
Cuadro 11	Balance de agua, N y P en un cultivo de jitomate cultivado en lana de roca en un sistema abierto.....	36
Cuadro 12	Contenido de iones en el drenaje de un sistema abierto para jitomate cultivado durante la primavera.....	37
Cuadro 13	Propiedades químicas del tezontle rojo.....	38
Cuadro 14	Consumo de fertilizantes ( $\text{g m}^{-2}$ ) en un sistema abierto y cerrado de cultivo de jitomate.....	41
Cuadro 15	Concentraciones y fuentes de nutrientes aplicados durante la fase de semillero.....	45
Cuadro 16	Concentraciones y fuentes de nutrientes aplicados con la solución nutritiva convencional al 100 %.....	48
Cuadro 17	Concentraciones y fuentes de nutrientes aplicados con la solución nutritiva alternativa al 100 %.....	49
Cuadro 18	Concentraciones de las diferentes formulaciones de solución nutritiva, tanto convencional como alternativa, en distintas etapas fenológicas.....	49
Cuadro 19	Concentraciones de nutrientes ( $\text{mg L}^{-1}$ ) aportados por los fertilizantes en las formulaciones de solución nutritiva convencional.....	50
Cuadro 20	Nutrientes aportados por los fertilizantes en la solución alternativa	50
Cuadro 21	Cuadrados medios de tres caracteres morfológicos de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con	59

	distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.....	
Cuadro 22	Comparación de medias de tres caracteres morfológicos de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	59
Cuadro 23	Comparación de medias de tres caracteres morfológicos de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.....	60
Cuadro 24	Cuadrados medios y significancia estadística de las variables del peso seco de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.....	61
Cuadro 25	Comparación de medias de peso seco de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivadas con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	62
Cuadro 26	Comparación de medias de peso seco de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.....	63
Cuadro 27	Cuadrados medios y probabilidad estadística de las variables del rendimiento de la planta de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.....	63
Cuadro 28	Cuadrados medios y significancia estadística de las variables del rendimiento de la planta de jitomate con pudrición basal a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar..	64
Cuadro 29	Comparación de medias del rendimiento de la planta de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	67
Cuadro 30	Comparación de medias del rendimiento de la planta de jitomate con pudrición basal a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	67
Cuadro 31	Comparación de medias de variables de rendimiento de la planta de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.....	68
Cuadro 32	Comparación de medias de variables de rendimiento de la planta de jitomate con pudrición basal a los 130 días después de la siembra cultivado en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.....	68
Cuadro 33	Cuadrados medios y significancia estadística del consumo de solución nutritiva y macronutrientes aportados en el riego de	69

	jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.....	
Cuadro 34	Comparación de medias del consumo de solución nutritiva y macronutrientes aportados en el riego de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	69
Cuadro 35	Comparación de medias de macronutrientes aportados en el riego de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado en condiciones con acolchado plástico y sin acolchar.....	70
Cuadro 36	Macronutrientes aportados por planta (en gramos) durante un ciclo de cultivo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	74
Cuadro 37	Extrapolación de rendimientos, consumo de solución y costos de dos formulaciones de solución nutritiva.....	76
Cuadro 38	Cuadrados medios y significancia estadística de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivado en un ciclo de trasplante a fin de cosecha de 85 días con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar..	77
Cuadro 39	Comparación de medias de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivado en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	79
Cuadro 40	Comparación de medias de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivado en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.....	80
Cuadro 41	Eficiencia de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	81
Cuadro 42	Eficiencia de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.....	83
Cuadro 43	Cuadrados medios y significancia estadística de macronutrientes lixiviados en el drenaje por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar...	84
Cuadro 44	Comparación de medias de macronutrientes lixiviados en el drenaje por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante	84

	a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	
Cuadro 45	Estimación de pérdida de macronutrientes por lixiviación en un cultivo de jitomate cultivado con dos formulaciones de solución nutritiva.....	85
Cuadro 46	Comparación de medias de macronutrientes lixiviados en el drenaje por planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.....	86
Cuadro 47	Porcentaje de pérdida de macronutrientes lixiviados por planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	87
Cuadro 48	Porcentaje de pérdida de macronutrientes lixiviados por planta de jitomate cultivada en un ciclo de cultivo de 85 días de trasplante a fin de cosecha en condiciones de acolchado y sin acolchar.....	88
Cuadro 49	Cuadros medios y significancia estadística de macronutrientes resolubilizados del sustrato calculados por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.....	91
Cuadro 50	Comparación de medias de macronutrientes resolubilizados del sustrato calculadas en gramos por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	92
Cuadro 51	Comparación de medias de macronutrientes resolubilizados en el sustrato calculadas en gramos por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, en dos condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.....	93
Cuadro 52	Cantidades y porcentajes de nutrientes resolubilizados del sustrato calculados por planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva.....	95
Cuadro 53	Extrapolación y comparación de las cantidades de nutrientes que fueron resolubilizados en el sustrato de un cultivo de jitomate con dos formulaciones.....	96
Cuadro 54	Cantidades y porcentajes de nutrientes resolubilizados en el sustrato calculados por planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.....	97

Cuadro 55	Cantidad de macronutrientes aportados en 69 L de agua de riego para una planta de jitomate durante un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha.....	98
Cuadro 56	Balance final de macronutrientes en un sistema de cultivo de jitomate durante un ciclo de cultivo de 85 días de trasplante a fin de cosecha cultivado con la formulación de solución nutritiva convencional al 80 %.....	99
Cuadro 57	Gramos necesarios de macronutrientes absorbidos por las plantas de jitomate para producir 1 kg de fruto de acuerdo con varios autores.....	104
Cuadro 58	Eficiencia de absorción de agua, nutrientes y eficiencia en el uso de agua para producir 1 kg de fruto de jitomate en un sistema cultivado con la formulación de solución nutritiva convencional al 80 % en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.....	106

<b>FIGURA</b>	<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>PÁGINA</b>
Figura 1	Esquema que muestra una fracción de cama con cuatro hileras de plantas de jitomate creciendo a la misma altura (dosel uniforme)....	14
Figura 2	Esquema que muestra hileras de plantas a diferente altura formando un dosel en forma de escalera (dosel escaleriforme).....	15
Figura 3	Tinas de lámina galvanizada rellenas con tezontle.....	46
Figura 4	Tinas con acolchado plástico y sin acolchar.....	48
Figura 5	Sistema de riego por goteo utilizado a base de cintilla.....	51
Figura 6	Distribución en porcentaje del peso seco a los 130 días después de la siembra en los órganos de la planta de jitomate.....	62
Figura 7	Consumo medio de solución nutritiva de una planta de jitomate en condiciones de acolchado y sin acolchado plástico.....	71
Figura 8	Aporte medio de solución nutritiva en una planta de jitomate cultivada con la formulación convencional al 100 % en condición sin acolchar.....	73
Figura 9	Aporte medio de macronutrientes por semana en una planta de jitomate cultivada con la formulación convencional al 100 % en condición sin acolchar.....	74
Figura 10	Solución nutritiva drenada promedio semanal por planta de jitomate cultivada con la formulación convencional al 100 % en condición acolchada y sin acolchar.....	89
Figura 11	Nutrientes lixiviados promedio semanal por planta de jitomate cultivada con la formulación convencional al 100 % en condición sin acolchar.....	89
Figura 12	Variación del pH y CE de la solución nutritiva drenada en plantas de jitomate cultivadas con la formulación convencional al 100 % en condición sin acolchar.....	90

## **AGRADECIMIENTOS**

A la noble Universidad Autónoma Chapingo, al Posgrado del Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia y a la coordinación del Posgrado, por el apoyo brindado y por todas las facilidades otorgadas durante mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por haber apoyado la continuación de mis estudios de posgrado, así como el apoyo brindado para la estancia académica.

A mi director de tesis el Dr. Felipe Sánchez del Castillo, por su apoyo para la realización de este trabajo, por su tiempo otorgado para las revisiones, por su paciencia, sus sugerencias, sus consejos y su gran experiencia que ayudaron a culminar este trabajo.

A mis asesores el Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, al Dr. Joel Pineda Pineda y al Dr. Efraín Contreras Magaña, por sus valiosas recomendaciones, sugerencias, revisiones, correcciones y por todo el tiempo y apoyo brindado para llevar a cabo este trabajo.

A mis profesores del posgrado, por su entusiasmo brindado durante las clases, por transmitir su conocimiento con gran vocación y por complementar mi formación.

A mis compañeros y buenos amigos que hice en Chapingo; Mario Ruíz, Héctor Delín, Plácido Ángel, Ismael Hernández y Gevri Juárez, de quienes aprendí mucho sobre este mundo tan maravilloso de la agricultura.

A Marco Alfaro, Alán Cabañas, Brandon Piña y a cada una de las personas que me tendieron la mano y contribuyeron a la realización de este trabajo.

Muchas gracias.

## DEDICATORIA

*A mis padres Martha y Alfredo por brindarme su apoyo incondicional en todo momento.*

*A mis hermanos Benny, Edna y Bryan por todas las risas y los buenos momentos.*

*A mis sobrinos Frída y Emilio.*

*A Viri por todo su apoyo, cariño, consejos y por todas las vivencias durante esta nueva aventura.*

*Los amo.*

*Luis Alberto Aragón Ramírez*

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

Nombre: Luis Alberto Aragón Ramírez  
Fecha de nacimiento: 30 de agosto de 1989  
Lugar de nacimiento: Ciudad de México, México  
Profesión: Biólogo

### **Desarrollo académico**

Licenciatura  
2008 - 2015  
Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Maestría  
2017 - 2019  
Maestría en Ciencias en Horticultura. Instituto de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo.

### **Desarrollo profesional**

Educador ambiental  
en el CEA  
Ecoguardas, 2016  
Impartición de pláticas, talleres de reciclado, medio ambiente y huertos urbanos.

Estancia académica,  
2018  
Apoyo a la investigación en cultivos bajo invernadero, Universidad de Almería (UAL), España.

Curso de cultivo sin  
suelo, 2018  
Formación complementaria en el curso de verano Study Abroad, Horticultura Protegida Sostenible: Sistemas de Cultivo sin Suelo e Hidroponía impartido en la Universidad de Almería (UAL), España.

## RESUMEN

### **Efecto agronómico e impacto económico de fuentes fertilizantes, concentraciones nutrimentales y acolchado plástico sobre un cultivo hidropónico de jitomate**

El costo de los fertilizantes altamente solubles se ha incrementado en México en los últimos años impactando los costos de producción de cultivos hidropónicos y en suelo bajo invernadero. El objetivo del presente estudio fue evaluar la posibilidad de reducir los costos al preparar soluciones nutritivas mediante fuentes fertilizantes alternativas más económicas, al reducir la concentración de nutrientes en un 20 %, y/o usando acolchado plástico. Se estableció un ciclo de cultivo de jitomate 'El Cid' de 85 días de trasplante a fin de cosecha despuntado a tres racimos por planta en alta densidad. Se probaron dos formulaciones de solución nutritiva a tres concentraciones con y sin acolchado plástico. Se evaluaron variables de crecimiento y rendimiento, así como la eficiencia en el uso de agua y nutrientes (N, P, K, Ca y Mg). Se empleó un diseño de bloques completos al azar con un arreglo en parcelas divididas. Los tratamientos cultivados con las formulaciones convencionales tuvieron mayor rendimiento que los cultivados con formulaciones alternativas (2.12 y 1.62 kg planta<sup>-1</sup>, respectivamente) debido a la incidencia de pudrición basal en los frutos. La formulación al 80 % rindió lo mismo estadísticamente que al 100 % (2.11 y 2.03 kg planta<sup>-1</sup>, respectivamente). El uso de acolchado plástico propició un 6 % de ahorro en el consumo de agua y nutrientes, en cuanto a su eficiencia resultó que, para producir 1 kg de fruto por planta se necesitaron 32 L de agua, 1.58 g de N, 0.73 g de P, 2.93 g de K, 1.42 g de Ca y 0.57 g de Mg. La formulación convencional al 80 % resultó la mejor para el productor debido al ahorro económico.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicum* L., cultivo sin suelo, solución nutritiva, eficiencia en el uso de agua y nutrientes.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo  
Autor: Luis Alberto Aragón Ramírez  
Director de Tesis: Dr. Felipe Sánchez del Castillo

## ABSTRACT

### **Agronomic effect and economic impact of fertilizers, nutrimental concentrations and plastic mulch in a hydroponic tomato crop**

The cost of high soluble fertilizers has raised in Mexico in the last years impacting the cost production of the hydroponically crops and in soil under greenhouse conditions. The central aim was to evaluate the possibility of reducing costs to prepare nutritional solutions through cheaper alternative fertilizers, reducing its concentrations in a 20 % or using plastic mulch. A cycle of “El Cid” tomato of 85 days after transplantation was established to be harvested in high density, each plant was cut two leaves above the third cluster. Two nutrient solutions with three concentrations with and without plastic mulch were tested. Growth and yield as well as the use of water and nutrient efficiency (N, P, K, Ca and Mg) were studied. A randomized complete block design was used with an arrangement in divided plots. The treatments cultivated with conventional formulations had a higher yield than treatments cultivated with alternative formulations (2.12 and 1.62 kg plant<sup>-1</sup>, respectively) because of blossom end rot incidence in their fruits. The formulation at 80 % yielded statistically the same as than 100 % (2.11 and 2.03 kg plant<sup>-1</sup>, respectively). The use of plastic mulch resulted in a 6 % of saving in water and nutrient consumption. The efficiency of water and nutrients was that, to produce 1 kg of fruit per plant, 32 L of water, 1.58 g of N, 0.73 g of P, 2.93 g of K, 1.42 g of Ca and 0.57 g of Mg were needed. The conventional formulation at 80 % proved to be the best for the producer because of economical saving.

**Keywords:** *Solanum lycopersicum* L., soilless culture, nutritive solution, efficiency of water and nutrients.

Master of Horticultural Science thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Luis Alberto Aragón Ramírez Luis Alberto

Thesis director de Tesis: Dr. Felipe Sánchez del Castillo

## I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El uso de invernaderos que permiten un alto grado de control de las condiciones del ambiente, en conjunto con sistemas hidropónicos que mantienen las condiciones más adecuadas para el funcionamiento óptimo de la raíz, representan las tecnologías agrícolas más avanzadas e intensivas que existen a nivel comercial, con rendimientos por unidad de superficie que pueden llegar a ser hasta 1000 % mayores que en cultivos convencionales en suelo a cielo abierto. Gracias a estas tecnologías, se obtienen productos con mayor calidad, inocuidad y seguridad, a la vez que se reduce casi a cero la posibilidad de perder las cosechas por un siniestro (Challa y Bakker, 1999).

Para el caso particular del jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia y valor económico en México y en el mundo, se cuenta con cultivares altamente rendidores para este tipo de tecnologías. El sistema de producción bajo invernadero que se practica en Europa y América del Norte, y que se ha importado a México tal cual, consiste en utilizar cultivares de tipo bola o saladette de crecimiento indeterminado, con densidades de población de dos a tres plantas/m<sup>2</sup> que se dejan crecer a más de 3 metros de altura, para cosechar de 15 a 25 racimos por planta en un ciclo de cultivo de 10 a 11 meses y un periodo de inicio a fin de cosecha de al menos seis meses, con rendimientos que pueden sobrepasar 400 a 500 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> cuando las condiciones ambientales son controladas adecuadamente y las prácticas culturales se realizan oportunamente (Heuvelink y Dorais, 2005; Sánchez *et al.*, 2014).

En la Universidad Autónoma Chapingo y con varios productores de jitomate en invernadero se ha estado investigando y validando, a escala comercial, un sistema o paquete tecnológico de producción de jitomate en hidroponía bajo invernadero, que consiste en reducir el tiempo de trasplante a fin de cosecha a menos de cuatro meses con la finalidad de lograr al menos tres ciclos de cultivo por año con mayor productividad anual y mayor beneficio económico para el productor (Sánchez y Corona, 1994).

Para lograr acortar los ciclos de cultivo de trasplante a fin de cosecha se ha recurrido a desarrollar un sistema de cultivo de plántulas que permite prolongar la edad para su trasplante hasta los 45 a 50 días, en conjunción con la práctica del despunte de las plantas a la altura de la tercera inflorescencia y podando para dejar solo un tallo. Para lograr un alto rendimiento por unidad de superficie, el menor rendimiento por planta que se obtiene con sólo tres racimos se ha compensado aumentando notablemente la densidad de población (de 3 plantas/m<sup>2</sup> en los sistemas convencionales hasta 8 plantas/m<sup>2</sup>), lo cual ha sido posible gracias a la menor área foliar que presentan las plantas despuntadas respecto a las que se dejan crecer libremente en los sistemas convencionales (Sánchez *et al.*, 2012).

Uno de los principales problemas con los sistemas hidropónicos, incluyendo el sistema de trasplantes con plántulas de mayor edad y el despunte a tres racimos por planta que aquí se plantea, es el del elevado costo de los fertilizantes altamente solubles para la preparación de soluciones nutritivas hidropónicas, mismo que se ha incrementado notablemente en los últimos años, lo que ha impactado de manera importante en los costos de producción en empresas de invernaderos hidropónicos e incluso en las que producen de manera intensiva en suelo (Huang, 2009).

En la mayoría de los sistemas hidropónicos que utilizan sustrato, se aplica el riego por goteo, con una solución nutritiva que contiene fertilizantes disueltos que incluyen los nutrientes minerales esenciales para las plantas en concentraciones óptimas para su crecimiento y desarrollo. Para que las plantas de un cultivo como el jitomate se desarrollen sin limitaciones nutricionales, la solución nutritiva debe tener un pH entre 5.5 a 6.5, una conductividad eléctrica (CE) entre 1.5 y 3 dS m<sup>-1</sup>, y los nutrientes minerales deben estar disociados en forma iónica en las proporciones y concentraciones adecuadas según sus tasas de absorción y en condiciones que eviten precipitados y antagonismos (Adams, 2004).

El uso de fertilizantes con un alto grado de solubilidad es indispensable cuando se usan en soluciones madre concentradas que son inyectadas a través de

sistemas de riego por goteo (Fertirrigación). Sin embargo, la solución nutritiva se puede preparar con su concentración final directamente en cisternas o depósitos grandes para aplicarla directamente al sistema de riego, sin que medie un sistema de dilución (Sánchez y Escalante, 1988).

Actualmente en México el uso de equipos de inyección es delicado y sofisticado, técnicamente difícil de manejar y con un alto costo inicial. A ello hay que sumar que el costo anual de los fertilizantes necesarios para operar una hectárea de invernadero para la producción hidropónica de jitomate supera ya los \$400,000.00, lo que impacta notablemente los costos de producción y limita la rentabilidad económica del productor (Suazo *et al.*, 2014).

Se considera posible reducir estos costos en al menos un 50 %, sin menoscabo del rendimiento y la calidad de frutos, mediante la preparación de soluciones nutritivas con la misma composición y concentración nutrimental, pero elaborada con fuentes fertilizantes de más bajo precio unitario, aunque con menor grado de solubilidad que les impide preparar soluciones muy concentradas. Esto es posible preparándolas a su concentración final en cisternas o depósitos y aplicarlas directamente al sistema de riego.

Otra alternativa para reducir los costos de producción en sistemas hidropónicos es mediante la reducción de la concentración de la solución nutritiva. Varias investigaciones han mostrado que las plantas pueden crecer bien a concentraciones de nutrientes relativamente más bajas respecto a las empleadas comúnmente (Asher y Edwards, 1983), lo que aportaría un ahorro extra de fertilizante. Diversos estudios sugieren que es posible reducir la concentración de las soluciones nutritivas entre un 20 y 30 % durante todo o al menos una parte del ciclo de cultivo, sin que se disminuya el rendimiento y la calidad de frutos, lo que supondría un ahorro adicional importante en los costos de producción (Gómez y Sánchez, 2003; Suazo *et al.*, 2014, Noriega, 2014).

Por otra parte, las necesidades hídricas de un cultivo están relacionadas con la evapotranspiración, proceso del sistema suelo-planta que combina la pérdida de

agua del suelo por evaporación y de la planta por transpiración (Burman y Pochov, 1994). En la etapa inicial del crecimiento de un cultivo, el efecto principal de la pérdida de agua es la evaporación (López *et al.*, 2009). La evaporación en un sustrato como la arena de tezontle es muy alta, sobre todo en las primeras etapas del cultivo, debido a que, por su alta rugosidad, expone mucha superficie al aire y al sol. En este sentido, el uso de acolchado plástico en los contenedores hidropónicos es una tecnología que puede permitir ahorros importantes en el gasto de agua y a la vez de sales fertilizantes. Esto porque la cubierta plástica reduce significativamente la evaporación del agua en la superficie, en especial cuando se maneja un sistema de riego por goteo (López *et al.*, 2009).

En un sustrato que no es irrigado en toda su superficie por el sistema de riego por goteo, quedan áreas de evaporación donde se pueden acumular y fijar nutrientes de la solución nutritiva en cantidades importantes, reduciendo la eficiencia de absorción nutrimental al no estar disponibles para el cultivo.

Con base en lo anterior, se llevó a cabo la presente investigación con los siguientes objetivos e hipótesis.

### **1.1. Objetivo general**

Comparar el rendimiento, la calidad de los frutos y el ahorro económico que se pueden lograr por: a) utilizar las mismas concentraciones de nutrientes, pero con una solución nutritiva elaborada con fertilizantes más económicos, b) por disminuir la concentración de nutrientes en la solución nutritiva, o c) por el uso de acolchado plástico, en la producción hidropónica de jitomate.

### **1.2. Objetivos particulares**

Comparar el crecimiento (variables morfológicas y de peso seco) del cultivo de jitomate manejado a tres racimos por planta en alta densidad, con dos soluciones nutritivas de igual concentración, pero preparada con diferentes fuentes fertilizantes.

Comparar el crecimiento del cultivo de jitomate manejado a tres racimos por planta en alta densidad, con soluciones nutritivas preparadas con las mismas fuentes, pero a diferentes concentraciones de nutrientes.

Comparar el crecimiento del cultivo de jitomate manejado a tres racimos por planta en alta densidad y el ahorro de agua y fertilizantes que se puede lograr mediante el acolchado del sustrato en los contenedores hidropónicos.

Calcular y comparar el balance y eficiencia de macronutrientes asimilados por las plantas de jitomate en el sistema de cultivo a tres racimos por planta en alta densidad.

Evaluar la rentabilidad económica que se puede lograr al emplear fuentes más económicas de fertilizantes, al disminuir la concentración de la solución nutritiva y al usar acolchado plástico en la producción de jitomate bajo invernadero.

### **1.3. Hipótesis**

Con el uso de una solución nutritiva alternativa que contenga la misma concentración de nutrientes que la convencionalmente usada para el cultivo de jitomate a tres racimos por planta, pero elaborada con fertilizantes menos solubles, pero más económicos, es posible lograr el mismo rendimiento y calidad de frutos de jitomate si las soluciones son preparadas directamente a su concentración final.

Independientemente de la formulación de la solución nutritiva (convencional o alternativa), la concentración de sus macronutrientes se puede reducir en un 20 % sin afectar el crecimiento rendimiento y calidad de fruto de plantas de jitomate manejadas a tres racimos en alta densidad de población.

El uso de acolchado plástico propiciará un ahorro significativo de solución nutritiva para la producción de jitomate a tres racimos por planta en alta densidad de población.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Hidroponía o cultivos sin suelo**

#### **2.1.1. Definición y concepto**

La palabra hidroponía se deriva de la combinación de dos palabras griegas *hydro* que significa agua y *ponos* que significa labor (Jones, 2005). De acuerdo con Resh (1995) la hidroponía se define como la ciencia del crecimiento de las plantas sin el uso de suelo, pero puede mediar el uso de un medio inerte, tal como grava, arena, turba, vermiculita o piedra pómez, el cual es irrigado con una solución nutritiva que contenga todos los elementos esenciales necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

#### **2.1.2. Variantes o modalidades de los sistemas hidropónicos**

Los sistemas hidropónicos se pueden clasificar en tres grupos según el medio donde se desarrollan las raíces:

1. Cultivo aeropónico: este sistema consiste en mantener a las raíces de las plantas suspendidas en el aire dentro de una cámara oscura, donde se inyecta la solución nutritiva periódicamente por medio de un microaspersor o nebulizador con el objetivo de mantener 100 % de humedad relativa dentro de la cámara.
2. Cultivo en solución: en este sistema las raíces de las plantas se encuentran suspendidas en la solución nutritiva, sin que éstas reciban luz que pueda favorecer cambios en la acidez de la solución, competencia por la toma de nutrientes y menor disponibilidad de oxígeno ocasionando un mal funcionamiento de la planta. Este sistema emplea un soporte en la parte superior del tallo, un aspecto importante de este sistema es que se debe suministrar mediante una bomba o compresor la cantidad de oxígeno necesario para evitar daños en la raíz (Resh, 2006).
3. Cultivo en sustrato: esta técnica emplea materiales inertes u orgánicos cuya función es proporcionar a la planta soporte, condiciones de oxígeno

y humedad óptimas para su desarrollo. Los sustratos inertes generalmente provienen de rocas ígneas y de materiales intemperizados como grava y arenas, también puede ser usada vermiculita, turba o tezontle. La turba, fibra de coco o la cascarilla de arroz son considerados sustratos orgánicos (Sánchez y Escalante, 1988; Urrestarazu, 2004; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013; Urrestarazu, 2015).

A su vez, los sistemas hidropónicos se pueden dividir en sistemas abiertos o cerrados. En los primeros, la solución nutritiva es drenada libremente, es decir, ya no es reutilizada, sino que es conducida fuera del sistema. Por otra parte, se considera un sistema cerrado si la solución nutritiva es recolectada para su reutilización en el cultivo después de un proceso previo de esterilización y ajuste de nutrientes, pH y CE (Sánchez *et al.*, 2014).

En los sistemas abiertos, a diferencia de los sistemas cerrados, el abastecimiento de agua y nutrientes se da en cada riego, tomando en cuenta un sobre-riego de 15 a 30 % del volumen de agua aplicado para evitar la acumulación de sales y prevenir desbalances en la zona de la raíz (Schröder y Lieth, 2002). Una desventaja de esto es que existe un exceso de agua y fertilizante que sale del sistema y en la mayoría de los casos va a parar a los mantos acuíferos causando un impacto ecológico negativo (Pardossi *et al.*, 2006). De manera general, los cultivos en hidroponía suelen establecerse bajo invernadero, sistema que ha potenciado los niveles de producción de los cultivos.

### **2.1.3. Objetivos de la hidroponía**

La intención de la hidroponía es poner el ambiente en el que crece la raíz en las mejores condiciones posibles para que las plantas funcionen de manera óptima (Sánchez y Escalante, 1988).

### **2.1.4. Condiciones óptimas para la raíz**

Las condiciones necesarias para un crecimiento y desarrollo óptimos de la raíz se pueden resumir como sigue:

**Un continuo y fácil suministro de agua.** El crecimiento de las plantas depende de un constante tránsito de elementos minerales a través y dentro del cuerpo de la planta, los cuales usan como vehículo el movimiento del agua para ser incorporados hacia la planta, por tal motivo es indispensable que la raíz cuente con disponibilidad suficiente de agua en forma continua (Epstein y Bloom, 2005).

**Una nutrición totalmente controlada, en cantidad suficiente y balanceada.** Si la concentración de un elemento dado o la proporción entre elementos no son adecuadas en la rizósfera, se puede ocasionar un desbalance nutricional en la planta. Si se modifica la relación cationes/aniones entonces se presentarán síntomas de deficiencia o de exceso repercutiendo en el desarrollo de las plantas (Steiner, 1961; Urrestarazu, 2015).

**Una excelente aireación y oxigenación para la respiración celular de la raíz.** Se debe mantener una disponibilidad constante de oxígeno en la rizósfera ya que al disminuir la concentración de oxígeno se puede producir una disminución en el crecimiento radical y como consecuencia secundaria la aparición de poblaciones de microorganismos no deseados en el medio (Urrestarazu y Mazuela, 2005).

**Una temperatura adecuada y estable.** La disponibilidad de oxígeno en la raíz está muy relacionada con la temperatura de la solución nutritiva, existiendo una estrecha correlación inversa, por lo que el oxígeno disuelto en la solución nutritiva disminuye a medida que aumenta la temperatura. Se ha descrito una fuerte disminución en la absorción de diversos nutrientes como N, P, K y Ca en cultivos hidropónicos cuando la temperatura es menor a 10 °C, y por encima de los 30 °C no se permite un buen desarrollo de las plantas (Urrestarazu, 2004). En el caso del jitomate, la temperatura considerada como óptima va de 25 a 29 °C (Lara-Herrera, 1999; León, 2001).

**Libre de plagas e inóculos de enfermedades o malezas.** Al cultivar en condiciones de un sustrato inerte previamente esterilizado es posible erradicar los inóculos de enfermedades y la incidencia de plagas puede ser más fácilmente

erradicada; no hay malezas como en el caso del suelo y las plantas pueden desarrollarse sin competencia (Sánchez y Escalante, 1988).

**Un medio libre de sales nocivas que podrían causar desbalances en el pH o CE.** La salinidad en los suelos es un problema mundial principalmente en regiones áridas y semiáridas, esto puede ser promovido por riegos con alto contenido de sales, que resulta en desbalances de pH o CE en la rizósfera (Mengel y Kirkby, 2001) ocasionando un pobre crecimiento de las plantas, así como disminución de la calidad y rendimiento de los cultivos.

**Ambiente de oscuridad y espacio necesario para el suficiente desarrollo de la raíz.** Es posible modificar el medio de crecimiento dependiendo las características del sustrato, por ejemplo, el tamaño y distribución de partículas para que la raíz no tenga dificultad en su movimiento debido a compactaciones o problemas de estructura/textura desfavorable, al contar con nutrientes disponibles en la solución del medio la raíz no necesita explorar grandes superficies, por lo que esa energía es mejor aprovechada por la parte superior de la planta (Sánchez y Escalante, 1988).

#### **2.1.5. Razones para adoptar la tecnología de hidroponia**

Junto con el uso de invernaderos, la hidroponia presenta un gran número de ventajas, desde el punto de vista técnico y económico respecto al sistema de cultivo tradicional en suelo. Algunas de ellas son: posibilidad de alcanzar altos rendimientos por m<sup>2</sup> empleando altas densidades de plantas, un balance adecuado de aire, agua y nutrientes para la raíz por lo cual la planta crece mejor, es posible un mayor control y corrección inmediata del pH en la solución nutritiva, así como deficiencias o toxicidades en la planta. Existe una mayor calidad, precocidad, uniformidad e inocuidad en los productos, se pueden obtener cosechas fuera de temporada, es posible ahorrar agua por medio de la reutilización de la solución nutritiva, así como evitar pérdidas por evaporación, asimismo se tiene ahorro de insecticidas, fungicidas y fertilizantes (Sánchez y Escalante, 1988; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013). Se genera así un sistema de

producción que permite de manera rentable producir alimentos en zonas donde la agricultura convencional no sería posible (Sánchez y Escalante, 1988).

En cuanto a las desventajas del sistema, se han identificado principalmente dos aspectos importantes: el nivel de capacitación que se requiere para operar los sistemas (conocimiento de fisiología y nutrición vegetal del cultivo para el manejo del sistema en cuestión) y el segundo, el costo elevado de la inversión inicial (invernadero, sistema de riego, depósitos de agua, semillas de alta producción, fertilizantes altamente solubles y equipos de dilución para las soluciones nutritivas madre), factores por los cuales los pequeños y medianos productores necesitan el financiamiento de bancos o apoyos del gobierno, aunado a esto, la inversión se incrementa al aumentar el nivel de automatización de las variables en el invernadero (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013) lo que ocasiona otra desventaja para el productor.

#### **2.1.6. Componentes de los sistemas hidropónicos**

La producción bajo hidroponía está integrada por una serie de elementos interactuantes e interdependientes que generan un sistema de producción. Estos elementos son: la planta, el sustrato, el contenedor, la solución nutritiva, el método de riego y drenaje y el régimen climático. Es importante destacar que el éxito de la producción depende de un adecuado manejo de todos los componentes, ya que se trata como se dijo de un sistema, donde todos sus componentes interactúan y dependen unos de otros (Sánchez y Escalante, 1988).

### **2.2. Agricultura protegida**

#### **2.2.1. Concepto**

A través de los años se han ido modificando las formas de producir alimentos, esto con el objetivo de generar mayores ventajas para los productores (Moreno *et al.*, 2011), un ejemplo es el uso de cubiertas plásticas en los cultivos para controlar el régimen climático, o también conocida como agricultura protegida. La

agricultura protegida es una tecnología de producción cuyo propósito es proteger a los cultivos, minimizando las restricciones y efectos de los fenómenos climáticos, ofrece grandes beneficios como altos rendimientos y calidad, mayor sanidad e inocuidad del producto, resultando en acceso a mejores mercados lo que se resume en mayor producción con alta rentabilidad económica (Sánchez y Moreno, 2017).

Los invernaderos como componente del régimen climático son estructuras agrícolas con una cubierta traslúcida que permiten modificar y controlar de forma más eficiente los principales factores ambientales (Juárez *et al.*, 2011), manteniéndolos más estables para los cultivos que están creciendo en su interior. Las principales ventajas son: mejor control de plagas y enfermedades, programación de las fechas de cosecha, protección contra la lluvia, aumento del rendimiento y calidad de producto, protección contra rayos UV, mayor control de la humedad y manejo más eficiente del agua (León, 2009).

### **2.2.2. Importancia a nivel mundial y nacional**

El uso de invernaderos para producción comercial inició a mediados del siglo XIX, incrementándose después de 1945. En el año de 1999 España, Italia, Holanda y Francia poseían la mayor superficie cubierta por invernaderos entre los países de la unión europea con 28,350, 26,600, 10,316 y 10,082 ha, respectivamente (Von Elsner *et al.*, 2000). La importancia del establecimiento de invernaderos para los cultivos se ve reflejada en el aumento de superficie bajo este sistema la cual se ha extendido. En años recientes la superficie ha aumentado a nivel mundial, en primer lugar, se encuentra China con casi 3 millones de ha, seguido por Turquía y Corea con alrededor de 60 mil ha, Japón, España e Italia con casi 50 mil ha.

En México la producción con agricultura protegida también ha crecido grandemente en los últimos años (Sánchez y Moreno, 2017). En el año 2012 se reportó una superficie de 20 mil hectáreas bajo estructuras de protección ya sea invernaderos (12 mil hectáreas) o casa sombra (8 mil hectáreas), destacando que

la gran mayoría de la superficie es sembrada con jitomate (Schwentenius y Gómez, 2000). De acuerdo con la Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A.C., se registró un crecimiento del 43 % de 2010 a 2016 (AMHPAC, 2017) y actualmente se estima una tasa media de crecimiento de 12 % en promedio anual (Sánchez y Moreno, 2017). Según datos de SIAP (2014) la superficie bajo cubierta supera ya las 20 mil ha y está distribuida de la siguiente manera: 63% bajo invernaderos, concentrándose la mayor parte en Jalisco y la región centro comprendida por el estado de México, Morelos, Puebla, Querétaro y Michoacán, el 22 % por casas sombra, principalmente en los estados del noroeste como Sinaloa, Sonora y Baja California, y entre un 10 y 5 % de macrotúneles y microtúneles, respectivamente.

## **2.3. Producción de jitomate en invernaderos con sistemas hidropónicos**

### **2.3.1. Producción de jitomate**

El jitomate debido a sus propiedades culinarias y alto valor nutritivo es una de las hortalizas mayormente consumidas por el ser humano, es cultivado mundialmente, abarcando una superficie estimada y producción global de 3,593,490 ha y 161, 739, 834 toneladas, respectivamente (FAO, 2013). México se encuentra entre los diez primeros lugares a nivel mundial con una producción de 3.1 millones de toneladas (FIRA, 2016), factor que permite la generación de empleos e ingresos importantes para los productores en el país. Aunque es cultivado en casi todos los estados de la República, sólo los estados de Sinaloa, Baja California, San Luis Potosí, Jalisco y Nayarit concentran el 74 % de la producción nacional (Velasco y Nieto, 2006).

El jitomate es también una de las hortalizas que más se producen en hidroponía bajo invernadero (Lara-Herrera, 1999). En México, la implementación de este cultivo en hidroponía se ha incrementado en los últimos años, sobre todo en los estados donde el suministro de agua para actividades de agricultura es limitado.

### **2.3.2. Sistema de producción convencional en invernadero**

En Europa, Estados Unidos y México normalmente se practica un sistema de producción bajo invernadero que consiste en el uso de variedades de hábito indeterminado, cuyo ciclo de cultivo dura entre 10 y 11 meses. La densidad de población es de 2 a 3 plantas/m<sup>2</sup>. En este sistema los tallos se dejan crecer a más de 7 m de longitud, logrando cosechar 15 o más racimos por planta durante un sólo ciclo de cultivo al año, de esta manera es posible alcanzar un rendimiento superior a 400 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> con el uso de invernaderos de alta tecnología (Resh, 2006).

Una de las desventajas que posee este sistema es que el ciclo de cultivo es muy largo, con un periodo de inicio a fin de cosecha de 5 a 7 meses donde las utilidades o pérdidas del productor quedan a merced de los oscilantes precios en el mercado. Además, lo largo del ciclo le impone la necesidad de un manejo muy tecnificado y cuidadoso para el control de plagas y enfermedades. También requiere de invernaderos muy altos, cuyo costo es elevado (Sánchez *et al.*, 2009).

### **2.3.3. Sistemas alternativos de producción**

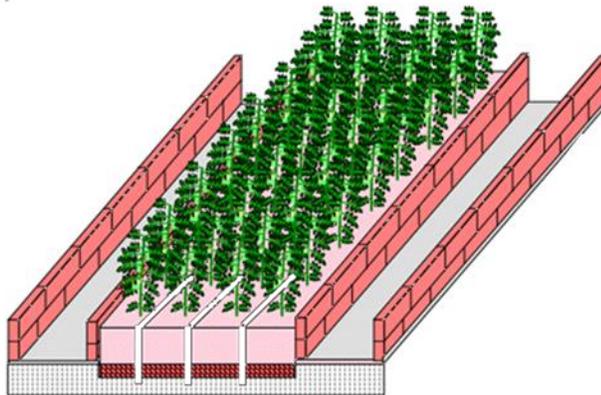
Desde 1986, en la Universidad Autónoma Chapingo se inició una línea de investigación secuenciada que ha culminado en el desarrollo de dos sistemas de producción de jitomate en hidroponia bajo invernadero que proporcionan al productor mayor rendimiento anual respecto a lo que se logra con el sistema convencional, son más sencillos de manejar, de menores costos de producción y más apropiado para pequeños y medianos productores (Sánchez *et al.*, 1991; Sánchez *et al.*, 1998; Méndez *et al.*, 2005; Sánchez *et al.*, 2012).

Estos sistemas consisten en la conducción de la planta a un solo tallo y en realizar un despunte del meristemo apical después de la formación de la tercera inflorescencia, dejando una o dos hojas arriba de la inflorescencia. Aunque, con estos sistemas, la producción por planta es menor, el rendimiento anual es mayor porque se aumenta la densidad hasta 8 a 10 plantas/m<sup>2</sup> (lo cual es posible porque

hay mucho menos área foliar por planta) y se acorta el ciclo de trasplante a cosecha a menos de cuatro meses, lo que permite tres ciclos de producción por año (Sánchez y Ponce, 1998; Sánchez y Corona, 1994; Cancino *et al.*, 2001; Méndez *et al.*, 2005; Vázquez *et al.*, 2007).

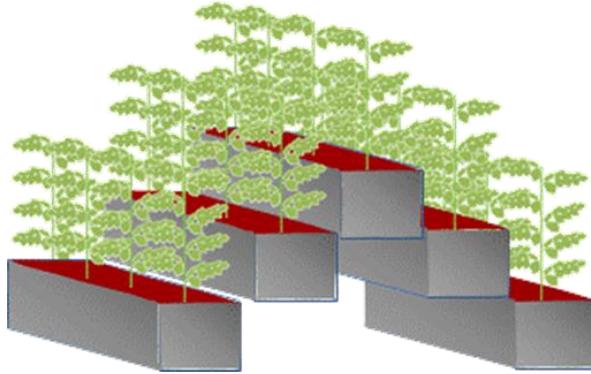
Los dos sistemas de producción desarrollados difieren en la disposición de las hileras de plantas:

En el primer sistema, denominado producción en dosel uniforme, se establecen de tres o cuatro hileras de plantas por cama de un metro de ancho, dejando pasillos de 50 a 60 cm entre camas contiguas. Aquí las plantas crecen al mismo nivel de altura, haciendo que las hileras de plantas que quedan en el interior de las camas tengan más competencia por luz que las hileras en el exterior, pues éstas tienen más intercepción de luz ya que dan hacia los pasillos, tal como se puede apreciar en la Figura 1 (Jorge y Sánchez, 2003).



**Figura 1. Esquema que muestra una fracción de cama con cuatro hileras de plantas de jitomate creciendo a la misma altura (dosel uniforme).**

En el segundo sistema, denominado producción en dosel escaleriforme, las hileras de plantas se colocan a diferente altura para formar un dosel en forma de escalera donde se busca que las hojas de cada hilera de planta queden mejor iluminadas para incrementar su fotosíntesis y con ello el rendimiento de cada planta (Figura 2) (Sánchez *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2014).



**Figura 2. Esquema que muestra hileras de plantas a diferente altura formando un dosel en forma de escalera (dosel escaleriforme).**

Dentro de las ventajas de ambos sistemas destacan la reducción de los problemas fitosanitarios y sobre todo se concentra la cosecha en un periodo de tiempo muy corto (un mes), lo que da la posibilidad al productor de programar la obtención de la cosecha en temporadas de alta demanda donde los precios son más altos (Sánchez *et al.*, 2010).

Actualmente se está realizando investigación y validación a escala comercial para la optimización de estos sistemas alternativos. Se ha estado trabajando en aspectos como alargar la edad de las plántulas, niveles de despunte a uno dos o tres racimos por planta con manejos de distintas densidades, cultivares, sustratos, tamaños de contenedor, variaciones en la concentración de solución nutritiva, propagación vegetativa y para promover la formación de más flores y frutos por racimo (Sánchez *et al.*, 2012).

Un problema de investigación actual es la eficiencia con la que son usados los fertilizantes por las plantas, ya que en ocasiones son aplicadas dosis superiores a los requerimientos del cultivo, a pesar de que estas aplicaciones pueden en determinadas circunstancias no afectar el rendimiento y la calidad de los frutos, si logran repercutir en los costos de producción ya que se consideran un desperdicio de fertilizante (Villareal *et al.*, 2002) y una fuente de contaminación al suelo y a los mantos acuíferos (Pardossi *et al.*, 2006). Por ello es importante desarrollar investigación en este sentido ya que los costos de fertilizante llegan a

superar el 30 % del costo total de producción, impactando la rentabilidad del pequeño y mediano productor (Suazo *et al.*, 2014).

## **2.4. Sustratos**

### **2.4.1. Definición y clasificación**

De acuerdo con Abad *et al.* (2005), el término sustrato hace referencia a todo material sólido diferente al suelo, de origen natural o sintético, mineral u orgánico, que colocado en un contenedor de forma pura o mezclado, permite el anclaje de las plantas a través de su sistema radical, éste puede o no participar en el suministro de nutrientes.

Un sustrato debe cumplir con cuatro condiciones principales: proveer de agua a la planta, suministrar nutrientes, permitir el intercambio de gases entre la zona radicular y el exterior del sustrato y por último dar soporte a las plantas (Fonteno, 1994), además debe proporcionar un ambiente que mantenga un balance biológico entre el sustrato y la planta (Bunt, 1988). No existe un sustrato ideal, el tipo de sustrato varía dependiendo el material con el que se trabaje (semillas, plantas, estacas), especie vegetal, condiciones climáticas, sistemas y programas de riego, fertilización, y costo (Urrestarazu, 2004).

Propiedades importantes en los sustratos son:

**Físicas:** La caracterización física de los sustratos estudia la distribución volumétrica del material sólido, agua y aire, así como su variación en el potencial matricial, estas características no se pueden modificar una vez que la planta esté establecida en el sustrato. De acuerdo con De Boodt *et al.* (1974) en un sustrato se debe tomar en cuenta las siguientes propiedades físicas:

Espacio poroso total: volumen total del sustrato no ocupado por partículas sólidas.

Capacidad de aireación: es la proporción del volumen del sustrato de cultivo que contiene aire después de haber sido saturado y dejado drenar libremente a una tensión de 10 cm de columna de agua.

Agua fácilmente disponible: proporción de agua que queda retenida en el sustrato entre las tensiones de 10 cm y 50 cm de columna de agua, volumen de agua que puede almacenarse en el sustrato y que está disponible fácilmente cuando la planta lo requiere sin requerir energía de succión alta.

Agua de reserva: cantidad de agua que libera un sustrato al pasar de una tensión de succión de 50 a 100 cm de columna de agua. Agua disponible para las plantas, pero para su absorción se debe emplear mayor energía causando estrés en la planta.

Agua difícilmente disponible: proporción en volumen de agua que queda retenida en un sustrato después de haber sido sometido a una tensión de más de 100 cm de columna de agua. Agua que no es útil para la planta.

**Químicas:** Las propiedades químicas caracterizan la transferencia de materia entre el sustrato y la solución del sustrato, éstas consisten en reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales, de intercambio de iones y de biodegradación de la materia orgánica (Urrestarazu, 2015).

**Biológicas:** Se refiere a la descomposición de los sustratos orgánicos por medio de reacciones químicas de hidrólisis o por la acción de microorganismos (Burés, 1997).

Existen diferentes criterios de clasificación de sustratos, algunos están basados en el origen de los materiales, naturaleza, propiedades o capacidad de degradación (Urrestarazu, 2004), pero de acuerdo con Urrestarazu, (2015) se pueden clasificar de la siguiente manera:

**Orgánicos:**

De origen natural: están sujetos a la descomposición biológica.

De síntesis: polímeros orgánicos no biodegradables (espuma de poliuretano, poliestireno expandido).

Residuos y subproductos de diferentes actividades de producción y consumo: para su uso deben experimentar un proceso de compostaje (corteza de árboles, aserrín, viruta de madera, residuos sólidos urbanos, cascarilla de arroz, paja de cereales, fibra de coco).

### **Inorgánicos**

De origen natural: obtenidos a partir de rocas o minerales de origen diverso, no son biodegradables (arena, grava, tierra volcánica).

Transformados o tratados industrialmente: a partir de rocas o minerales mediante tratamientos físicos o químicos que modifican sus características iniciales (perlita, lana de roca, vermiculita, arcilla expandida).

Residuos o subproductos industriales: materiales procedentes de distintas actividades industriales (estériles de carbón).

Es indispensable que los sustratos retengan agua suficiente para el desarrollo del cultivo, a diferencia de los suelos, los sustratos retienen gran parte de su contenido de agua a bajas tensiones, por lo que tensiones muy pequeñas son suficientes para desalojar gran contenido de agua de la matriz porosa del mismo, siendo ocupado por aire (Abad *et al.*, 2004).

Los sustratos deben ser inertes y no aportar o adsorber nutrientes a la solución nutritiva del cultivo pues pueden modificar su composición. Los sustratos orgánicos, aunque pueden dar soporte a la planta no son considerados inertes pues actúan como reservorios ya que adsorben y liberan nutrientes que son aportados debido a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) que poseen; algunos ejemplos son la turba, aserrín, corteza de pino o cascarilla de arroz. En el caso del sustrato inerte el material actúa únicamente como soporte y los nutrientes deben ser aportados por medio de los fertilizantes.

#### **2.4.2. Arena de tezontle como sustrato**

El tezontle es un material producto de las erupciones volcánicas de tonos generalmente rojizos, presenta partículas redondeadas o irregulares de tamaño de 2 a 50 mm, compuesto por aluminosilicatos y en menor medida de Fe, Mn, Ca y Mg (Burés, 1997). El tezontle se ha usado comúnmente como sustrato debido a que posee propiedades deseables como partículas porosas y ligeras, en México es un material económico ya que se encuentra disponible en grandes depósitos localizados en el eje neovolcánico transversal (Bastida, 2002). En cultivos hidropónicos se han empleado tres tipos de tezontle: negro, amarillo y rojo, este tono rojizo es debido a la presencia hierro (Burés, 1997).

#### **2.4.3. Propiedades físicas y químicas del tezontle**

De acuerdo con Vázquez *et al.* (2003) el tezontle rojo ofrece un buen drenaje y aireación debido a su porosidad. También posee porosidad interna (que lo hace un material ligero con densidad aparente de  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ ), retiene alta humedad y no libera sustancias nutritivas ni tóxicas además de que es económico y accesible (Vargas-Canales *et al.*, 2014).

### **2.5. Contenedores**

Un contenedor se puede definir como el recipiente en el que está contenido el sustrato sobre el cual son cultivadas las plantas (Sánchez y Escalante, 1988). Todas las formas de cultivo en hidroponía involucran el crecimiento de plantas en algún tipo de contenedor, ya sea camas, macetas, bolsas, tubos o canales.

De acuerdo con Biran y Eliassaf, (1980) la elección de un volumen adecuado del contenedor es una característica que se debe tener en cuenta ya que puede influir directamente sobre varios factores relacionados con el desarrollo de la raíz.

#### **2.5.1. Volumen de contenedor**

Aunque un volumen limitado para el crecimiento de la raíz puede ser una ventaja en los cultivos sin suelo, un volumen restringido ejerce un cierto estrés que puede

limitar el correcto desarrollo y funcionamiento del sistema radical. Para establecer este factor como una ventaja o desventaja es necesario considerar los siguientes aspectos:

En un volumen menor es posible hacer un mayor control de parámetros de la rizósfera como pH, CE, temperatura, oxígeno.

Un volumen mayor permite un control más constante de la temperatura, debido a una mayor inercia térmica y una mayor capacidad de almacenamiento de nutrientes, agua y oxígeno.

A un mayor volumen de contenedor, el sustrato será más costoso.

En un cultivo donde la solución nutritiva es aplicada por medio de fertirriego automatizado, en el caso que exista un fallo y el cultivo se quede sin irrigación durante varias horas determinadas, con un volumen pequeño de sustrato el cultivo podría sufrir estrés por falta de disponibilidad hídrica, por el contrario, en un sistema con mayor reserva de fertirriego se puede ver menos afectado.

Otros requisitos deseables al momento de elegir un contenedor para un cultivo son: durabilidad (que pueda utilizarse en varios ciclos para amortizar el costo), que sea inerte (que no libere ni adsorba iones de la solución nutritiva), de color opaco para evitar el desarrollo de microorganismos como algas (que se pueden beneficiar de los nutrientes y del oxígeno de la solución nutritiva), que sea económico y de fácil disponibilidad.

### **2.5.2. Tipos de contenedor**

Comercialmente los tipos más empleados son bolsas, macetas, sacos (almohadas), tubos horizontales o verticales, canaletas, tinas o camas. La mayoría son elaborados con compuestos derivados del petróleo como polietileno, poliestireno, policloruro de vinilo, madera, cemento, materiales para construcción o metal. Su forma puede variar a cuadrada, cilíndrica, rectangular o triangular.

Las características del sustrato en interacción con el tamaño del contenedor modifican el ambiente de la raíz en relación con el reparto de aire-agua, afectando el crecimiento de las raíces, brotes apicales, distribución y acumulación de biomasa, fotosíntesis, relación de agua en la planta, absorción de nutrientes, respiración, floración y rendimiento (Walters *et al.*, 2005). La capacidad del contenedor está en función de su altura y de las características del sustrato (Burés, 1997). La altura y la profundidad poseen un efecto marcado sobre el contenido de aire del sustrato, a mayor altura del contenedor, mayor el contenido de aire, entonces si se emplean contenedores poco profundos como tinas o camas, se debe preferir usar un sustrato de textura gruesa para mantener un nivel adecuado de aireación (Sánchez y Escalante, 1988). A su vez la programación del fertirriego se debe adaptar a la morfología del contenedor, esto es muy importante ya que en ocasiones la morfología del contenedor influye más en el fertirriego que el tipo de sustrato ya que puede ocurrir que el manejo de dos tipos de contenedores con un mismo sustrato sea distinto que el de los dos contenedores iguales rellenos con sustratos distintos (Urrestarazu, 2015).

### **2.5.3. Características y propiedades de tinas o camas de cultivo**

Las tinas o camas de cultivo provocan un efecto sobre la porosidad del sustrato en particular en contenedores de menor tamaño debido a que la porosidad cercana a las paredes del contenedor es mayor que en el centro de la tina ya que las partículas se acomodan de manera distinta al estar en contacto con una pared lisa aumentando la aireación. Esto es importante debido a que el espacio poroso es ocupado por el agua que a su vez lleva los nutrientes en solución durante cada riego. En este sentido, el volumen depende de las condiciones de cada sustrato, si existen fuertes oscilaciones térmicas en el día o noche se sugiere elegir un sustrato voluminoso y de poros grandes, por el contrario, si se cuenta con calefacción de raíces es conveniente emplear sustratos que retengan mayor humedad y de volumen pequeño para que sea más fácil de calentar (Canovas, 2001). Actualmente existe una gran variedad de tinas o camas de cultivo y cada

una posee ventajas y desventajas que deben ser evaluadas al momento de establecer el cultivo.

## **2.6. Solución nutritiva**

### **2.6.1. Definición y concepto**

La solución nutritiva se define como el conjunto de elementos nutritivos requeridos por la planta, disueltos en agua. Se han identificado alrededor de 60 elementos constituyentes de las plantas mediante análisis químico, pero de estos sólo se han considerado 16 como esenciales para el crecimiento de las plantas (Resh, 2013). Estos se han clasificado por su concentración en el tejido como macronutrientes (C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mo, Cl, Mn, B) (Sánchez y Escalante, 1988).

En este sentido, con excepción del C, O e H, todos los elementos pueden ser suministrados a través de la solución nutritiva y en forma asimilable por las raíces de las plantas, por lo tanto, se considera como prerrequisito la solubilidad de las sales que contienen los iones esenciales en el agua. El N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, B, Cu y Zn se añaden al agua por medio de fertilizantes comerciales, los otros elementos como Cl y Mo van a menudo incluidos como impurezas en el agua y en los fertilizantes que proporcionan los macronutrientes (Sánchez y Escalante, 1988).

No existe una solución nutritiva teórica ideal para un cultivo en particular, la concentración óptima de elementos nutritivos para una especie vegetal, depende de un conjunto de factores como la parte a cosechar de la planta, la estación del año, el clima, la calidad del agua y el estado de desarrollo de la planta (Sánchez y Escalante, 1988).

### **2.6.2. Factores que influyen en la disponibilidad y absorción de nutrientes**

Los factores que contribuyen a la transferencia de los nutrientes del medio a la planta son variados e involucran la estructura de la raíz. La absorción es distinta

entre los cultivos y es afectada por la concentración de la solución externa en la rizósfera, el estado de desarrollo de la planta, condiciones climáticas y el rendimiento del cultivo. Por ejemplo, en el caso del jitomate, en etapa de desarrollo absorbe cuatro veces más Ca que K, mientras que a plena carga de frutos esta relación sube a siete (Voogt, 1988, Urrestarazu, 2004).

La movilidad de los nutrientes en la rizósfera está relacionada con la disponibilidad para las plantas (Marschner, 1995), el acceso de los nutrientes hacia la raíz considera tres mecanismos principales:

La intercepción por contacto con la raíz. Intercepta a los nutrientes disponibles más cercanos y depende de su concentración en el suelo o sustrato y del volumen de raíz que ocupa los poros.

La difusión simple o facilitada. Los nutrientes son llevados hasta la superficie de la raíz por un gradiente de concentración.

El flujo de masas. Los nutrientes disueltos en agua son arrastrados hacia la raíz por medio de la transpiración, esto depende de la concentración de nutrientes en la solución de suelo y de la cantidad de agua transpirada por la planta (Marschner, 1995).

En general son varios los factores que afectan la absorción de agua por las plantas como el tamaño de la hoja, su anatomía, la velocidad del viento, la presión atmosférica, transpiración, textura del suelo, concentración de nutrientes, etapa fenológica del cultivo, oxigenación, temperatura (Sinha, 2004) por lo que es importante conocer las condiciones que satisfagan las necesidades de cada cultivo para propiciar un óptimo desarrollo.

### **2.6.3. Bases para la formulación de la solución nutritiva**

En hidroponia el uso eficiente de la solución nutritiva trae consigo un buen desarrollo de la planta, así como un ahorro considerable de agua y fertilizante, en este sentido, es importante considerar otros componentes importantes como

son el pH, la frecuencia de riego, el sustrato empleado y en ocasiones el uso de acolchado plástico. Por medio del uso y manejo adecuado de los componentes anteriores es posible obtener los máximos rendimientos e incluso mayor rentabilidad económica.

De manera general, en las plantas superiores la mayor parte del material vegetal está constituido por agua, la cual corresponde aproximadamente de 80 a 90 % del peso total de la planta, el resto es considerado tejido vegetal y está constituido por los elementos minerales indicados en los Cuadros 1 y 2. Estos elementos son indispensables para el desarrollo de las plantas y su importancia radica en que forman parte de una serie de procesos metabólicos lo cuales están descritos en el Cuadro 3.

**Cuadro 1. Porcentajes aproximados en peso seco de los elementos componentes de plantas superiores.**

<b>Elemento</b>	<b>% de peso seco</b>
C	44 - 49
O	42 - 46
H	5 - 7
N, K	0.8 - 5
P, Mg	0.5 - 0.65
Ca	0.2 - 3
Fe	0.005 - 0.05
Mn	0.005
Zn, Cu	0.003
B	0.0015 - 0.005
Mo	0.0005

Fuente: Alcántar y Trejo-Téllez (2013).

**Cuadro 2. Rango aproximado de nutrientes en los tejidos de la planta de jitomate.**

<b>Elemento</b>	<b>% de peso seco</b>
N	4.5 - 5.5
P	0.6 - 1.0
K	4 - 5.5
Ca	1.5 - 2.5
Mg	0.4 - 0.6
Fe	80 - 150 ppm
B	35 - 60 ppm
Mn	70 - 150 ppm
Zn	30 - 45 ppm
Cu	4 - 6 ppm
Mo	1 - 3 ppm

Fuente: Resh (2013).

**Cuadro 3. Nutrientes esenciales y sus funciones principales en las plantas.**

<b>Nutriente</b>	<b>Principales funciones</b>
<b>C</b>	Principal constituyente de la materia viva y está presente en todas las biomoléculas; carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos.
<b>H</b>	Es importante en el equilibrio iónico y del pH, participa en reacciones redox y en el intercambio de energía en la célula.
<b>O</b>	Se encuentra en todas las biomoléculas. Aproximadamente el 90 % del oxígeno consumido en la célula es utilizado en la respiración.
<b>N</b>	Importante componente de todas las proteínas y ácidos nucleicos, presente en coenzimas nucleótidos, amidas, ureidos y en la clorofila entre otros.
<b>P</b>	Forma parte de los ácidos nucleicos y participa en la síntesis de proteínas. Como constituyente del ATP y muchas coenzimas, interviene en todos los procesos metabólicos de transferencia de energía.
<b>K</b>	Es activador o cofactor de más de 50 enzimas del metabolismo de carbohidratos y proteínas, participa en el equilibrio iónico y en la regulación osmótica.
<b>Ca</b>	Es importante en la división celular y en la estabilidad de la membrana y pared celular, asociado con proteínas cumple funciones de mensajero secundario.
<b>Mg</b>	Participa como cofactor o activador en muchas reacciones enzimáticas, se asocia al ATP en la transferencia de energía y es componente de la clorofila.
<b>S</b>	Presente en muchas proteínas y participa en reacciones de intercambio de energía.
<b>Fe</b>	Componente de muchas enzimas, juega un papel importante en la transferencia de electrones, como en los citocromos y en las cadenas de transporte electrónico.
<b>Cu</b>	Componente y activador de muchas enzimas, principalmente superóxido dismutasas, también es componente de la plastocianina.
<b>Zn</b>	Componente esencial y activador de numerosas enzimas. Es necesario para la biosíntesis de la clorofila y ácido indolacético.

<b>Mo</b>	Es importante en la asimilación de N, como constituyente de la enzima nitrato reductasa y nitrogenasa.
<b>B</b>	Participa en el metabolismo, transporte de carbohidratos y en la síntesis de la pared celular.
<b>Cl</b>	Se requiere en la fotosíntesis y en la fotólisis del agua. Participa en la división celular.

Fuente: Alcántar y Trejo-Téllez (2013).

Cada uno de los nutrientes descritos anteriormente se deben encontrar en la solución nutritiva en forma iónica, en solución y en forma inorgánica, estos nutrientes pueden ser suministrados por una serie de fertilizantes, los cuales se clasifican de distintas maneras, algunos proporcionan dos o más nutrientes lo cual facilita la elaboración de la solución nutritiva y reduce su precio (Sánchez y Escalante, 1988).

Una característica básica en la formulación de la solución nutritiva es la solubilidad de los fertilizantes con la que se elabora. La solubilidad se puede definir como la medida de la concentración de sal que permanece en solución cuando está disuelta en el agua (Resh, 2006). Un aspecto importante que debe considerarse es el costo de los fertilizantes empleados ya que es indispensable que el sistema de producción sea rentable (Tejo, 2002).

Otro factor que influye en el comportamiento de la solución nutritiva es el pH. Este puede definirse como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) en una solución (Baca Castillo *et al.*, 2016). El pH es una propiedad importante, ya que afecta al crecimiento de las raíces vegetales y microorganismos del suelo. Tiene influencia directa sobre la solución del medio nutritivo influyendo en el equilibrio de óxido-reducción, en la solubilidad de varios constituyentes, y en la forma iónica de algunos elementos. También influye en el transporte de iones en las membranas de las células corticales y epidérmicas de la raíz (Epstein y Bloom, 2005).

Ya sea en cultivos en suelo o en hidroponia, el pH de la solución que rodea a las raíces es muy importante para su adecuado crecimiento ya que un mal manejo frecuentemente ocasiona un debilitamiento general y bajo rendimiento en la planta (Sánchez y Escalante, 1988). El crecimiento radical se ve favorecido con

pH ligeramente ácido (entre 5.5 y 6.5) ya que influye en la disponibilidad de nutrientes (Taiz y Zieger, 2006).

Un factor importante que puede modificar el pH de la rizósfera es la fuente de N como fertilizante empleado, ya sea como  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NH}_4^+$  debido a las características que poseen cada uno en su absorción por la raíz ya que pueden acidificar o alcalinizar el medio. La absorción de  $\text{NH}_4^+$  por la planta depende de un acarreador uniporte, una célula no puede sostener una entrada de iones positivos como los del  $\text{NH}_4^+$  sin un ión contrario (-) que ayude a restaurar la electroneutralidad en la célula. Durante largos periodos de exposición a  $\text{NH}_4^+$ , su conversión a  $\text{NH}_2$  para formar aminoácidos u otros compuestos orgánicos, provoca que las células acumulen  $\text{H}^+$ , lo que disminuye el pH del citoplasma y a su vez provoca un estímulo de las  $\text{H}^+$  ATPasas de la membrana para poder bombear los protones fuera de la célula, incrementando la acidez en el exterior y estimulando la entrada de aniones, resultando en un balance eléctrico para la entrada de  $\text{NH}_4^+$ . En el caso de que exista un exceso de  $\text{NH}_4^+$  en la rizósfera, la salida de  $\text{H}^+$  ocasiona que el pH disminuya (Epstein y Bloom, 2005).

Por otra parte, un exceso de aniones como el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) dentro de las células propicia la salida de  $\text{HCO}_3^-$  (ion bicarbonato) u  $\text{OH}^-$  (ion hidroxilo) de la raíz (Baca Castillo *et al.*, 2016), esto aunado a que debido al principio de electroneutralidad por cada ion de  $\text{NO}_3^-$  que ingresa a la célula, debe ingresar uno de  $\text{H}^+$  para neutralizar la carga, lo que causa que la solución del suelo, en este caso del sustrato, se alcalinice poco a poco modificando las condiciones de la rizósfera (Gallegos Vázquez *et al.*, 2000).

Como se comentó anteriormente, la estabilidad del pH en la solución nutritiva se altera cuando el N es suministrado como  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NH}_4^+$  debido al mecanismo por el cual la planta incorpora cada uno (Marschner, 1995). Esto repercute en el balance de cationes/aniones de acuerdo con la naturaleza de cada ion provocando competencias, antagonismos o sinergismos. Los iones monovalentes como  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  se absorben más fácilmente que los iones divalentes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Un efecto de antagonismo se presenta cuando

existe mayor presencia de iones  $\text{NH}_4^+$  sobre la absorción de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ , por el contrario, el  $\text{NO}_3^-$  favorece su absorción, la presencia de  $\text{Cl}^-$  restringe la absorción de  $\text{NO}_3^-$  (Jones, 2005). Es por esto que se reporta inconveniente el suministro del N en forma de  $\text{NH}_4^+$  en un porcentaje mayor al 20 % del N total, debido a que puede afectar la calidad y la producción de los productos cosechados.

La conductividad eléctrica, (CE) se define como una medida indirecta de la concentración de sales totales en la solución nutritiva. Esta estimación se basa en que a medida que hay más sales en solución, la conducción de electricidad es mayor (Urrestarazu, 2004, Alcántar y Trejo-Téllez, 2013; Baca Castillo *et al.*, 2016).

Es posible producir un incremento en la salinidad del suelo o sustrato cuando la cantidad de sales aportadas con el agua es superior a las cantidades absorbidas por las plantas o a las pérdidas por lixiviación. La CE influye en la nutrición de las plantas ya que un aumento significativo de salinidad en la solución nutritiva puede reducir el peso de la planta, el área foliar, el grosor de tallo, la absorción de agua y nutrientes (Urrestarazu, 2004). En este caso las plantas deben vencer potenciales osmóticos elevados de lo contrario la planta se marchitará, aunque haya agua en el medio. Valores por arriba de  $6 \text{ dS m}^{-1}$  inducen una absorción diferente entre los nutrientes, un valor menor que  $2 \text{ dS m}^{-1}$  puede provocar deficiencias nutricionales, sobre todo en temporadas frías (Lara-Herrera, 1999).

El jitomate se considera moderadamente sensible a la salinidad, la conductividad recomendada para no afectar el rendimiento es de  $2.5 \text{ dS m}^{-1}$  (Jones, 1999). El incremento en la salinidad puede ser corregido por medio de lixiviación controlada o lavados para evitar la acumulación de sales (Urrestarazu, 2004; Urrestarazu, 2015).

La presencia de algunos iones como  $\text{Na}^+$  en la solución nutritiva pueden ocasionar daños severos en la planta debido a la competencia que puede generar contra la absorción de  $\text{K}^+$  o  $\text{Ca}^{+2}$ . En el caso de la presencia del ion  $\text{Cl}^-$ , se puede

limitar la absorción de  $\text{NO}_3^-$  debido a un efecto antagónico. En algunos cultivos se emplea el uso de NaCl para elevar la CE, esto con el objetivo de concentrar más el sabor en algunos productos como es el caso de jitomate cherry. Se han realizado investigaciones donde elevan la CE hasta valores de  $8 \text{ dS m}^{-1}$  sin daños de pudrición basal del fruto (PBF) en comparación cuando la elevan con macronutrientes, esto debido a un fuerte antagonismo del  $\text{Ca}^{+2}$  con el  $\text{K}^+$  (Urrestarazu, 2004).

De acuerdo con Alcántar y Trejo-Téllez (2013), algunas consideraciones importantes al momento de elaborar la solución nutritiva y elegir fuentes fertilizantes son:

La eficiencia del nutriente que puede ser expresada en términos del nutriente aplicado y que es absorbido por la planta o por medio del incremento del rendimiento que se logra por cada kilogramo del nutriente aplicado, está relacionada con la susceptibilidad a pérdidas por lavados o volatilización.

El Índice salino, que consiste en la relación entre el incremento de la presión osmótica producido por el material y su mismo peso, este índice es mayor en los fertilizantes nitrogenados y potásicos que en los fosfatados, también es mayor en los de alta concentración.

Otras características como la naturaleza del ion acompañante, higroscopicidad, compatibilidad con otros productos, costo, adquisición, transporte, almacenamiento, y aplicación.

#### **2.6.4. Formas de suministrar la solución nutritiva con el riego**

El propósito del manejo de riego es maximizar la disponibilidad de agua y oxígeno en el sistema radical de la planta, este es el factor más influyente en la productividad de un cultivo y un buen manejo asegura también una buena nutrición (Urrestarazu, 2004). De toda el agua que se aplica a los cultivos en su desarrollo, la mayor parte se transfiere a la atmósfera por medio de la transpiración y también por medio de la evaporación directa del suelo o sustrato,

lo que se conoce como evapotranspiración (Quiñones, 1997), por tal motivo el agua requerida por la planta para su riego debe incluir el agua usada en la evapotranspiración, así como también agua para el lavado de sales acumuladas en la rizósfera.

En fertirriego los fertilizantes y el ácido añadido al agua de riego constituyen la disolución del fertilizante, por lo tanto, el tipo de fertilizante debe ser de alta calidad, elevada y completa solubilidad y pureza, debe contener bajos niveles de sales y un pH aceptable. La compatibilidad entre ellos es importante para prevenir la precipitación, la elección de uno u otro depende de su disponibilidad y precio (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

Existen distintas maneras de suministrar la solución nutritiva a un cultivo, pero comúnmente son empleadas dos: soluciones elaboradas a su concentración final y soluciones madre. Cuando se preparan soluciones nutritivas a su concentración final comúnmente se emplean algunos de los siguientes elementos: recipiente de almacenamiento, grupo de bombeo y presión, sistema de filtrado, electroválvulas de los sectores de riego y programador de riego. Cuando se preparan soluciones madre los fertilizantes están concentrados en depósitos y son mezclados al momento en que se produce el riego; además de los elementos descritos en el sistema anterior se necesita: mayor número de depósitos para los fertilizantes provistos de sistemas de agitación, inyectoros para diluir los fertilizantes, electroválvulas para regular la inyección, controladores de conductividad, controladores de pH, controladores de fertilizante entre otros. En este sentido, existen diferencias en la complejidad de ambos sistemas ya que el sistema de soluciones madre emplea más componentes lo cual hace que el sistema sea más caro y difícil. El sistema de soluciones nutritivas diluidas a su concentración final, debido a su fácil operatividad, sumado a que los costos de mantenimiento son más bajos, debe ser usado siempre que sea posible y económicamente viable (Urrestarazu, 2004).

### **2.6.5. Importancia del fertirriego**

De acuerdo con Urrestarazu (2015), el fertirriego consiste principalmente en aplicar un determinado volumen de solución nutritiva en los cultivos sin suelo con el objetivo de:

Suministrar la cantidad conveniente de cada nutriente individualmente a la planta y evitar su acumulación hasta niveles tóxicos.

Garantizar un adecuado equilibrio nutricional (interacción entre elementos nutritivos).

Mantener una buena aireación para que las raíces realicen respiración en condiciones no limitantes.

Mantener la temperatura dentro de los niveles apropiados de cada especie.

Mantener la disponibilidad de agua a tensiones de retención bajas.

Mantener la uniformidad de los elementos anteriores por todo el contenedor donde se desarrollan las raíces para que estas puedan colonizar la totalidad del contenedor en lo posible.

Un buen fertirriego no sólo debe aportar la cantidad de agua sino también todos y cada uno de los nutrientes minerales en su proporción correspondiente (Urrestarazu, 2015).

## **2.7. Eficiencia del uso de agua y nutrientes en el sistema hidropónico**

### **2.7.1. Conceptualización general del balance de nutrientes**

La forma indirecta para medir la eficiencia de los fertilizantes aplicados, así como su incorporación a la planta y a su vez expresada en el rendimiento del cultivo, es el balance general de nutrientes, este posteriormente se puede traducir a costos para los productores. Esta evaluación consiste básicamente en llevar un seguimiento de la cantidad de agua y fertilizante aplicado, cantidad de nutrientes

aprovechados por la planta, nutrientes adsorbidos o retenidos por el sustrato y perdidos o lixiviados por medio de drenaje, donde las cantidades faltantes pueden ser atribuidas a pérdidas dependiendo la naturaleza del elemento, ya sea por fijación o precipitación en el sustrato y/o evaporación (Urrestarazu, 2004: Urrestarazu, 2015).

### **2.7.2. Nutrientes aportados diario y por ciclo**

Para aportar durante todo el ciclo del cultivo la cantidad de nutrientes que se prevé que la planta necesita para su desarrollo, es importante estimar la cosecha final que se espera obtener y en función de ésta calcular las necesidades totales de cada nutriente las cuales varían dependiendo el cultivo. Esta cantidad se debe repartir entre los distintos periodos del ciclo equilibradamente dentro de los riegos que se realicen. Por último, se debe transformar las necesidades de cada elemento en términos de cantidades de fertilizantes comerciales a suministrar. Esto en ocasiones es complicado debido a la falta de información, a los pocos estudios de absorción de nutrientes realizados en cada cultivo en específico y a la variabilidad de condiciones experimentales lo que hace complicado su comparación, por lo que en ocasiones se opta por dar recomendaciones basadas en equilibrios de absorción (Camacho, 2003).

En el caso del cultivo de jitomate en hidroponia, varios autores (Urrestarazu, 2004 y Resh, 2013) recomiendan las concentraciones indicadas en el Cuadro 4. Winsor y Adams (1987) y Urrestarazu (2004) señalan el contenido de nutrientes ideales en una hoja de jitomate, aunque este puede variar dependiendo la edad, el sistema de cultivo y medio ambiente (Cuadro 5).

**Cuadro 4. Concentraciones ideales de nutrientes en una solución nutritiva para el cultivo de jitomate en hidroponia.**

Elemento	Sonneveld y Straver 1992 (mg L <sup>-1</sup> )	Sonneveld y Straver, 1994 (mg L <sup>-1</sup> )	Resh, 2011 (mg L <sup>-1</sup> )
N (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	7	69	-
N (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	224	221	169
P	46	40	49
K	195	224	201
Ca	240	106	240
Mg	48	83	50
S	64	39	119
B	0.3	0.32	0.3
Cu	0.05	0.048	0.15
Fe	2.3	0.84	2.5
Mn	0.6	0.55	0.58
Zn	0.4	0.26	0.4
Mo	0.05	0.048	0.3

Fuente: Urrestarazu (2004) y Resh (2013).

**Cuadro 5. Contenido adecuado de nutrientes en la lámina foliar de jitomate hidropónico.**

Nutriente	Rango	Unidad
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.5 – 5	%
P	0.35 - 0.75	%
K	3.5 - 6.5	%
Ca	2.0 - 4.0	%
Mg	0.35 - 0.8	%
B	30 – 80	mg kg <sup>-1</sup>
Cu	7 – 20	mg kg <sup>-1</sup>
Mn	100 - 300	mg kg <sup>-1</sup>
Mo	> 0.4	mg kg <sup>-1</sup>
Zn	30 - 100	mg kg <sup>-1</sup>

Fuente: Winsor y Adams (1987), Urrestarazu (2004).

### 2.7.3. Nutrientes absorbidos por la planta, diario y por ciclo

Como se comentó anteriormente, la planta modifica el consumo de nutrientes y agua en función del estado fenológico, de las condiciones del clima, del vigor de la planta, de la salinidad del agua, oxígeno disuelto en la solución nutritiva y pH (Camacho, 2003, Sonneveld y Voogt, 2009). Se debe asumir que la absorción

radical de agua y nutrientes debe compensar la pérdida por transpiración más el incremento de agua utilizada en el crecimiento, de esta manera el consumo de la planta puede dividirse en la suma de transpiración y agua constitucional (Urrestarazu, 2015). Se considera que más del 90 % del agua absorbida se pierde por transpiración (Boyer, 1985, Urrestarazu, 2015), para compensar esta pérdida la planta absorbe agua de la rizósfera y con ella los nutrientes disponibles. En los Cuadros 6, 7, 8, 9 y 10 está representada la variación en el consumo de agua en una planta de jitomate en función de la temperatura del medio radical, época del año, estado fenológico y la absorción nutrimental por día en un sistema NFT, respectivamente.

**Cuadro 6. Consumo de agua en planta de jitomate en función de la temperatura del medio radical.**

Temperatura (°C)	Consumo de agua (L/planta/día)
12	0.96
15	2.06
18	2.45
30	2.34

Fuente: Cornillon (1987), Urrestarazu (2015).

**Cuadro 7. Consumo de agua en planta de jitomate en función de época del año.**

Época del año	Consumo de agua (L/planta/día)
Otoño - invierno	1.47
Primavera - verano	1.96

Fuente: Salas *et al.* (2000), Urrestarazu (2015).

**Cuadro 8. Consumo de agua en planta de jitomate en función del estado fenológico.**

Estado fenológico	Consumo de agua (L/planta/día)
Desarrollo vegetativo	0.30
Floración	1.41
Fructificación	2.01

Fuente: Adams (1989), Urrestarazu (2015).

**Cuadro 9. Absorción promedio diaria de N, P, K y agua en plantas de jitomate en periodo de fructificación cultivado en NFT.**

Racimo en floración	N (mg/planta/día)	P (mg/planta/día)	K (mg/planta/día)	Agua (ml/planta/día)
1	116	22	144	608
9	114	25	293	926

Fuente: Adams (1986), Atherton y Rudich (1986).

**Cuadro 10. Concentración de absorción para jitomate en invernadero.**

Elemento	Absorción	
	mmol L <sup>-1</sup> de agua absorbida	mg L <sup>-1</sup> de agua absorbida
N	9.6	134
P	1.1	43
K	6.1	238
Ca	2.2	88
Mg	0.9	22
S	1.2	39

Fuente: Modificado de Urrestarazu (2004).

El conocimiento del ritmo de absorción de los nutrientes y su dinámica de estos en el suelo o en sustrato, aunado a la producción de materia seca por la planta es importante para poder realizar las aportaciones de agua y fertilizantes a lo largo de sus etapas fenológicas (Burgueño *et al.*, 1994).

#### 2.7.4. Nutrientes drenados diario y por ciclo

Como se mencionó anteriormente, en los sistemas abiertos existe una cantidad de solución nutritiva que sale del sistema y no es reutilizada, esta solución drenada es considerada como un excedente o lixiviado producido en cada uno de los riegos, suele expresarse en porcentaje respecto al volumen total de riego

aplicado. Este excedente en el riego es importante para reestablecer el equilibrio en la rizósfera entre los iones que son absorbidos por la planta en menor proporción afectando la CE; cuando se absorbe más agua que iones la CE aumenta. En este sentido, el nuevo fertirriego tiene como objetivo rellenar y reponer el consumo realizado, mientras que el extra suministrado tiene como objetivo lavar el exceso de sales y homogeneizar la rizósfera. La proporción de drenaje necesaria está en función de factores como el ritmo de transpiración, época del año, etapa de desarrollo de la planta, por practicidad se han considerado un porcentaje entre un 10 y 30 % (Urrestarazu, 2015). Según Rodríguez *et al.* (2005) en un cultivo de jitomate el porcentaje de sobre-riego durante la etapa de plántula puede ir de 30 a 60 %, en el caso de la etapa de desarrollo vegetativo permanece alrededor de 35 % y durante la etapa productiva disminuye a 30 %.

De acuerdo con Vox *et al.* (2010) el balance de agua, N y P en un cultivo de jitomate cultivado sobre lana de roca durante un periodo 4 meses bajo invernadero en un sistema abierto (Cuadro 11), aproximadamente el 75 % de agua aportada es aprovechada por el cultivo y el 25 % sale del sistema, lo cual implica un incremento en los costos y en la contaminación profunda y superficial de los cuerpos de agua. Por otra parte, en el Cuadro 12 están representados la cantidad de iones en el drenaje de un cultivo de jitomate en primavera cultivado en un sistema abierto.

**Cuadro 11. Balance de agua, N y P en un cultivo de jitomate cultivado en lana de roca en un sistema abierto.**

Factor	Unidad	Riego aplicado	Riego aprovechado por el cultivo	Riego perdido
Agua	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	2,450	1,840	610
N	kg ha <sup>-1</sup>	510	352	158
P	kg ha <sup>-1</sup>	130	95	35

Fuente: Vox *et al.* (2010).

**Cuadro 12. Contenido de Iones en el drenaje de un sistema abierto para jitomate cultivado durante la primavera.**

<b>Ion</b>	<b>mmol L<sup>-1</sup></b>	<b>mg L<sup>-1</sup></b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	22.16	1,374
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	2.16	210
K <sup>+</sup>	10.17	397
Ca <sup>+2</sup>	7.89	316
Mg <sup>+2</sup>	4.42	106
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	4.07	390
Na <sup>+</sup>	5.10	117
Cl <sup>-</sup>	4.65	163

Fuente: García *et al.* (1998), Urrestarazu (2004).

### **2.7.5. Nutrientes retenidos en el sustrato diario y por ciclo**

En ocasiones, dependiendo del tipo de sustrato, éste puede retener o adsorber nutrientes, los cuales pueden ser liberados más tarde si las condiciones son favorables. esto puede causar desbalances nutricionales e indisponibilidad de los nutrientes para la raíz de la planta por tal motivo se recomienda emplear los lavados (lixiviados) de sales. Si se aumenta la concentración de iones disueltos en la disolución del sustrato debido a pérdidas por evaporación, también se reduce la disponibilidad y absorción debido a la reducción del gradiente de potencial hídrico entre el sustrato y la raíz. De acuerdo con lo anterior, es indispensable dependiendo el tipo de sustrato realizar monitoreo para realizar lavado o aportes para recuperar las pérdidas por retención, precipitación o evaporación de solución nutritiva en el sustrato (Urrestarazu, 2015).

La cantidad de agua que se requiere para un lavado de sales es directamente proporcional a la evapotranspiración y a la concentración de sales que existen en el agua de riego e inversamente proporcional a la tolerancia a la salinidad del cultivo (García, 2007). En ocasiones se analiza la solución que hay en el sustrato o que sale en el drenaje para corregir la solución de entrada en función de la analizada. La CE del extracto de sustrato del drenaje se considera un indicador más recomendable (Urrestarazu, 2015).

En el caso del tezontle, como se mencionó anteriormente existen tres tipos los cuales poseen características distintivas entre ellos (amarillo, rojo y negro), en el

caso particular del tezontle rojo, según Burés (1997), recién sacado de la mina y antes de ser utilizado en un cultivo, puede contener algunas cantidades de nutrientes como las presentadas en el Cuadro 13.

**Cuadro 13. Propiedades químicas del tezontle rojo.**

<b>Propiedad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
N extractable	6	mg L <sup>-1</sup>
P extractable	9	mg L <sup>-1</sup>
K extractable	52	mg L <sup>-1</sup>
Ca extractable	330	mg L <sup>-1</sup>
Mg extractable	25	mg L <sup>-1</sup>
MO (% peso)	0.0	%
CE	0.02	dS m <sup>-1</sup>

Fuente: Burés (1997).

El riego por goteo utilizando solución nutritiva y combinado con el uso de sustrato es el sistema hidropónico más empleado en México debido a las ventajas que posee comparado con otros sistemas como NFT o subirrigación (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013). Con ayuda de este sistema es posible suministrar agua a una baja tensión y por medio de una alta frecuencia se puede mantener un ambiente de humedad favorable en el suelo o sustrato (García y Briones, 2007). Sin embargo, dependiendo las características de algunos sustratos sumados a las características del contenedor, se puede propiciar la evaporación de la solución nutritiva más fácilmente.

#### **2.7.6. Evaporación de la solución y nutrientes precipitados**

Aunque la solución nutritiva es elaborada con la finalidad de que los nutrientes se encuentren disponibles para la planta, existen algunos factores que pueden hacerlos indisponibles y en consecuencia considerarlos como pérdida de fertilizantes, un factor importante en la rizósfera como se comentó anteriormente es el pH que puede variar en función de las concentraciones de los iones H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (ácidos débiles) y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (base débil) (De Rijck y Scherevens, 1997) causando incompatibilidad entre las fuentes de fertilizante. Esto es importante ya que en determinados rangos puede existir precipitación de los iones formando

compuestos poco solubles como  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . Los cuales no pueden ser aprovechados por la planta y son depositados en el sustrato.

También la evaporación en sustratos como turba o como la arena de tezontle es muy alta, sobre todo en las primeras etapas del cultivo, debido a que, por su alta rugosidad, expone mucha superficie al aire y al sol. Una técnica empleada comúnmente para evitar pérdida de agua por evaporación y optimizar las condiciones de desarrollo para la raíz y por ende del crecimiento de las plantas es el uso de acolchados plásticos.

### **2.7.7. Acolchado plástico y su efecto en el balance de agua y nutrientes**

Furuta *et al.* (1977) estudiaron el efecto del acolchado sobre la evapotranspiración en turba, la cual lograron reducir en un 26 %. Ibarra y Rodríguez, (1991) reportan que el acolchado plástico permite un ahorro de agua de 15 % en comparación con un sistema tradicional.

El acolchado plástico es una técnica empleada con la finalidad de proteger los cultivos y mejorar el clima de la zona de la raíz, consiste en la colocación de una lámina plástica sobre el suelo o superficie donde se cultivan las plantas (Díaz *et al.*, 2001), la lámina puede ser de baja o alta densidad, de color negro, blanco o aluminizado, estas variaciones proveen al suelo ciertas características especiales dependiendo las necesidades del cultivo. El color reflectivo afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas por medio del incremento de la temperatura en la parte superior del suelo y la cantidad y calidad de luz reflejada para la planta (Heuvelink y Dorais, 2005). Su empleo tiene una serie de ventajas, algunas de ellas son: inhibe el crecimiento de hierbas malas, mejora la retención de humedad, previene la erosión del suelo, provee altos rendimientos y cosechas más tempranas (Díaz-Pérez y Dean Batal, 2002). García (1996) menciona que el acolchado ayuda a conservar la temperatura del suelo cuando se presentan variaciones, favorece la conservación y el movimiento de agua hacia la zona de raíces, incrementa la eficiencia en el uso de fertilizantes y previene el lixiviado de nutrientes (Lamont, 1993).

En ocasiones existe acumulación de sales en la parte superior del medio de crecimiento debido a su precipitación por la evaporación del agua de la solución de la superficie del sustrato (Argo y Biernbaum, 1995). Resultados de investigaciones sugieren que el acolchado produce una reducción significativa de la evaporación del agua en la superficie del suelo o sustrato, especialmente en sistemas donde se emplea riego por goteo, en el que se reduce la acumulación de sales debido al efecto de capilaridad (FAO, 2013). También existe un incremento general de la transpiración del cultivo debido a la transferencia de calor sensible y radiativo desde la superficie de la cobertura del acolchado hacia las adyacencias de la vegetación más cercanas a éste (López *et al.*, 2009). Al existir una mayor transpiración, existe un mayor consumo hídrico y por ende absorción mineral, los cuales están influenciados por la temperatura de la disolución contenida en la rizósfera; es decir, a mayor temperatura radical mayor absorción de sales (Urrestarazu y Salas, 2004) lo que implica una acumulación mayor de nutrientes en los tejidos de la planta.

Aunque la mayoría de los estudios sobre acolchado han sido desarrollados en suelo y la información sobre su efecto en cultivos sin suelo es limitada (Farina *et al.*, 2003) es interesante evaluar su rentabilidad para mejorar la eficiencia de los cultivos en sustrato.

#### **2.7.8. Perspectivas de investigación a futuro: ahorro de agua y fertilizantes**

En comparación con los sistemas hidropónicos cerrados, en un sistema abierto la mayor desventaja es que existe una gran pérdida de agua y fertilizantes (Jones, 2005) al no ser reutilizada la solución nutritiva, tal como se representa en el Cuadro 14. Una opción es reducir el aporte a una concentración mínima de nutrientes, ajustar la concentración al consumo necesario haciendo más eficiente el uso del agua y fertilizantes, pero sin que esto repercuta en la calidad y rendimiento. Algunos estudios han mostrado que es posible reducir la concentración de las soluciones nutritivas para determinar los niveles de suficiencia (Zheng *et al.*, 2005, Nakano *et al.*, 2010) optimizando el uso de fertilizantes para lograr sistemas sustentables (Magdaleno-Villar *et al.*, 2006).

**Cuadro 14. Consumo de fertilizantes (g m<sup>-2</sup>) en un sistema abierto y cerrado de cultivo de jitomate.**

<b>Sistema</b>	<b>KNO<sub>3</sub></b>	<b>Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub></b>	<b>MgSO<sub>4</sub></b>	<b>HNO<sub>3</sub></b>	<b>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></b>	<b>Micronutrientes</b>	<b>Total</b>
Abierto	91	78	20	12	27	4	231
Cerrado	50	45	11	6	15	2	129

Fuente: García y Urrestarazu (1998), Urrestarazu (2004).

Siddiqi *et al.* (1998), evaluaron reducir al 75 % la concentración de macronutrientes y encontraron que no hubo efectos adversos en el rendimiento y calidad de los frutos de jitomate bajo invernadero. Cruz Crespo *et al.* (2012) señalan que en hidroponía es posible reducir las concentraciones nutrimentales hasta un 50 %, sin que se afecte el rendimiento en jitomate (Armenta-Bojórquez *et al.*, 2001).

Ante una creciente escasez de recursos hídricos, aunada al aumento constante de los insumos agrícolas como los fertilizantes, es necesario buscar tecnología alternativa que ayude a reducir los costos de producción e incrementar la eficiencia y aprovechamiento de los nutrientes sin sacrificar la calidad y el rendimiento de una manera sustentable con el medioambiente (Bugarín-Montoya *et al.*, 2002), e incluso en algunos países se han adaptado prácticas orgánicas al cultivo sin suelo (Inden y Torres, 2005).

El desarrollo de un sistema hidropónico que permitiera disminuir los costos de producción relacionados con el uso de fertilizantes ayudaría a elevar las ganancias para el productor ya que, de acuerdo con Lamas (2011) de los costos totales de producción, los fertilizantes pueden representar al menos el 20 %. Por tal motivo en México es indispensable continuar desarrollando investigación en este sentido ya que existe un gran número de pequeños y medianos productores que son el sector más vulnerable con el aumento en los costos de producción.

### **III. EFECTO AGRONÓMICO E IMPACTO ECONÓMICO DE FUENTES FERTILIZANTES, CONCENTRACIONES NUTRIMENTALES Y ACOLCHADO PLÁSTICO SOBRE UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE JITOMATE**

#### **3.1. Introducción**

Uno de los principales problemas con los sistemas en la producción de cultivos con los sistemas hidropónicos, es el del elevado costo de los fertilizantes altamente solubles para la preparación de soluciones nutritivas, mismo que se ha incrementado notablemente en los últimos años, lo que ha impactado de manera importante en los costos de producción en empresas de invernaderos hidropónicos e incluso en las que producen de manera intensiva en suelo (Huang, 2009).

El uso de fertilizantes con un alto grado de solubilidad es indispensable cuando se usan en soluciones madre concentradas que son inyectadas a través de sistemas de riego por goteo (Fertirrigación). Sin embargo, la solución nutritiva se puede preparar con su concentración final directamente en cisternas o depósitos grandes para aplicarla directamente al sistema de riego, sin que medie un sistema de dilución (Sánchez y Escalante, 1988).

Actualmente en México el uso de equipos de inyección es delicado y sofisticado, técnicamente difícil de manejar y con un alto costo inicial. A ello hay que sumar que el costo anual de los fertilizantes necesarios para operar una hectárea de invernadero para la producción hidropónica de jitomate supera ya los \$ 400,000 pesos, lo que impacta notablemente los costos de producción y limita la rentabilidad económica del productor (Suazo *et al.*, 2014).

Se considera posible reducir estos costos, sin menoscabo del rendimiento y la calidad de frutos, mediante la preparación de soluciones nutritivas con la misma composición y concentración nutrimental, pero elaborada con fuentes fertilizantes de más bajo precio unitario, aunque con menor grado de solubilidad, lo que les impide preparar soluciones muy concentradas. Esto es posible preparándolas a

su concentración final en cisternas o depósitos y aplicarlas directamente al sistema de riego.

Otra alternativa para reducir los costos de producción en sistemas hidropónicos es mediante la reducción de la concentración de la solución nutritiva. Varias investigaciones han mostrado que las plantas pueden crecer bien a concentraciones relativamente más bajas respecto a las empleadas comúnmente (Asher y Edwards, 1983), lo que aportaría un ahorro extra de fertilizante. Diversos estudios sugieren que es posible reducir la concentración de las soluciones nutritivas entre un 20 y 30 % durante todo o al menos una parte del ciclo de cultivo, sin que se disminuya el rendimiento y la calidad de frutos, lo que supondría un ahorro adicional importante en los costos de producción (Gómez y Sánchez, 2003; Suazo *et al.*, 2014, Noriega, 2014).

Por otra parte, las necesidades hídricas de un cultivo están relacionadas con la evapotranspiración, proceso del sistema suelo-planta que combina la pérdida de agua del suelo por evaporación y de la planta por transpiración (Burman y Pochov, 1994). En la etapa inicial del crecimiento de un cultivo, el efecto principal de la pérdida de agua es la evaporación (López *et al.*, 2009). La evaporación en un sustrato como la arena de tezontle es muy alta, sobre todo en las primeras etapas del cultivo, debido a que, por su alta rugosidad, expone mucha superficie al aire y al sol. En este sentido, el uso de acolchado plástico en los contenedores hidropónicos es una tecnología que puede permitir ahorros importantes en el gasto de agua y a la vez de sales fertilizantes. Esto porque la cubierta plástica reduce significativamente la evaporación del agua en la superficie, en especial cuando se maneja un sistema de riego por goteo (López *et al.*, 2009).

En un sustrato que no es irrigado en toda su superficie por el sistema de riego por goteo, quedan áreas de evaporación donde se pueden acumular y fijar nutrientes de la solución nutritiva en cantidades importantes, reduciendo la eficiencia de absorción nutrimental al no estar disponibles para el cultivo. Por lo anterior es importante desarrollar investigación encaminada a mejorar la

eficiencia del uso de los fertilizantes ya que esto repercute directamente en gasto elevado para el productor.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar la posibilidad de reducir los costos al preparar soluciones nutritivas mediante fuentes fertilizantes alternativas más económicas, bajando la concentración de nutrientes en un 20 %, y/o usando acolchado plástico para hacer más eficiente el uso del agua y fertilizante.

## **3.2. Materiales y métodos**

### **3.2.1. Establecimiento del experimento**

El experimento fue llevado a cabo bajo condiciones de invernadero en las instalaciones del Posgrado de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicadas en el municipio de Texcoco, Estado de México, a 19° 29' 35" de latitud norte, 98° 52' 19" de longitud oeste y a 2250 m., con una precipitación anual de 636.5 mm y una temperatura media anual de 15.2 °C, correspondiente a un tipo de clima templado subhúmedo con lluvias en verano (García, 1987).

El invernadero es de estructura metálica con cubierta de polietileno térmico y alta dispersión de luz. Tiene ventanas laterales de 2 m de altura con protección de malla antiáfidos y cortinas retráctiles a todo lo largo y por ambos costados. El piso estuvo cubierto en su totalidad por tela de polipropileno (ground cover) blanca.

El experimento se inició durante la primavera 2017. Se empleó el cultivar 'El Cid' de la empresa Harris Moran, que es de tipo saladette indeterminado con hojas que presentan buena cobertura de planta. Tiene sus frutos con paredes muy gruesas, con excelente firmeza y vida de anaquel (Harris Moran, 2018).

Las semillas fueron sembradas el 18 de marzo en charolas de poliestireno de 60 cavidades con un volumen de 250 ml por cavidad y una separación de 5 cm entre cavidades. Las charolas fueron previamente lavadas y desinfectadas con hipoclorito de sodio al 1 %. Como sustrato se utilizó una mezcla de turba y perlita

(50-50 %) y en la superficie se colocó vermiculita para cubrir la semilla. Una vez concluida la siembra, las charolas fueron apiladas y cubiertas con un plástico hasta la emergencia de las primeras plántulas.

Durante los primeros 45 días después de la siembra (dds) se aplicó la solución nutritiva indicada en el Cuadro 15. A partir del trasplante, hasta el final de la cosecha la solución nutritiva fue aplicada según correspondió a cada tratamiento.

**Cuadro 15. Concentraciones y fuentes de nutrientes aplicados durante la fase de semillero.**

<b>Nutriente</b>	<b>Concentración (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fuente fertilizante</b>
Nitrógeno	100	Nitrato de calcio
Fósforo	25	Ácido fosfórico al 85 %
Potasio	125	Sulfato de potasio
Calcio	125	Nitrato de calcio
Magnesio	25	Sulfato de magnesio
Azufre	85	Sulfatos de potasio y magnesio
Hierro	2	Sulfato ferroso
Manganeso	1	Sulfato de manganeso
Boro	0.5	Bórax
Cobre	0.1	Sulfato de cobre
Zinc	0.1	Sulfato de zinc

El trasplante se realizó a los 45 días después de la siembra (dds) en tinas de lámina galvanizada de 0.24 m de ancho x 1 m de largo y 0.24 m de profundidad, las cuales fueron previamente forradas por dentro con plástico negro de 150 micras y rellenas con arena de tezontle rojo con tamaño de partícula entre 1 y 3 mm de diámetro. Cada una de las tinas tenía un tubo de salida para el drenaje de la solución nutritiva excedente que tuviera lugar después de cada riego (Figura 3).



**Figura 3. Tinas de lámina galvanizada rellenas con tezontle.**

### **3.2.2. Tratamientos**

Al momento del trasplante (45 dds), se establecieron en total 12 tratamientos, resultado de la combinación de seis formulaciones de solución nutritiva aplicadas bajo dos condiciones de manejo (acolchado y sin acolchar). Las seis formulaciones resultaron, a su vez, de tres diferentes concentraciones de solución nutritiva y dos fuentes de fertilizantes.

**Formulación 1:** Solución nutritiva convencional al 100 % de concentración durante todo el ciclo del cultivo (Cuadro 16).

**Formulación 2:** Solución nutritiva convencional al 80 % de concentración durante todo el ciclo del cultivo (excepto para los micronutrientes que se aportaron al 100 % todo el ciclo) (Cuadro 19).

**Formulación 3:** Solución nutritiva convencional en la que se hizo variar la concentración de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo: al 60 % de concentración para todos los nutrientes excepto el nitrógeno que se aplicó al 100 %, del trasplante hasta la antesis del 50 % de las flores del primer racimo; al 80 % de concentración para todos los nutrientes excepto el nitrógeno que se aplicó al 100 %, desde la antesis del 50 % de las flores del primer racimo hasta el amarre de los frutos del tercer racimo; y al 100 % de concentración para todos los nutrientes excepto el potasio que se aplicó al 130 %, del amarre de los frutos del tercer racimo hasta el final de la cosecha. Los micronutrientes se aplicaron al 100 % durante todo el ciclo (Cuadro 18 y19).

**Formulación 4:** Solución nutritiva alternativa al 100 % de concentración durante todo el ciclo del cultivo (Cuadro 17).

**Formulación 5:** Solución nutritiva alternativa al 80 % de concentración durante todo el ciclo del cultivo (excepto micronutrientes que se aportaron al 100 % todo el ciclo) (Cuadro 20).

**Formulación 6:** Solución nutritiva alternativa en la que se hizo variar la concentración de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo: al 60 % de concentración para todos los nutrientes excepto el nitrógeno que se aplicó al 100 %, del trasplante hasta la antesis del 50 % de las flores del primer racimo; al 80 % de concentración para todos los nutrientes excepto el nitrógeno que se aplicó al 100 %, desde la antesis del 50 % de las flores del primer racimo hasta el amarre de los frutos del tercer racimo; y al 100 % de concentración para todos los nutrientes excepto el potasio que se aplicó al 130 %, del amarre de los frutos del tercer racimo hasta el final de la cosecha. Los micronutrientes se aplicaron al 100 % durante todo el ciclo (Cuadro 18 y 20).

Cada una de estas formulaciones se probó bajo condiciones de acolchado y no acolchado del sustrato colocado en las tinas (Figura 4). El acolchado se realizó con polietileno aluminizado de 100 galgas de espesor. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con un arreglo en parcelas divididas con tres repeticiones, siendo las parcelas grandes las formulaciones de solución nutritiva en sus diferentes concentraciones y las parcelas chicas las condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.

La unidad experimental para las subparcelas constó de dos tinas contiguas de lámina galvanizada, cada una con cuatro plantas, con una distancia entre plantas de 20 cm y entre hileras de plantas de 25 cm. Esto generó una densidad de población de 8 plantas 0.5 m<sup>2</sup> útil equivalente a 10.6 plantas/m<sup>2</sup> de invernadero (considerando pasillo de 50 cm de ancho). Se realizó un sorteo para establecer la posición del acolchado de las tinas, considerando las repeticiones de manera independiente.



**Figura 4. Tinas con acolchado plástico y sin acolchar.**

Las tres primeras formulaciones de soluciones nutritivas se elaboraron con fuentes solubles que convencionalmente se utilizan en sistemas hidropónicos y las segundas tres se elaboraron con fuentes menos solubles, pero de más bajo costo.

**Cuadro 16. Concentraciones y fuentes de nutrientes aplicados con la solución nutritiva convencional al 100 %.**

<b>Fuentes comerciales</b>	<b>Cantidad aportada g 1000 L<sup>-1</sup></b>	<b>Concentración de nutrientes aportados (g 1000L<sup>-1</sup>)</b>
Nitrato de calcio	1000	N = 155; Ca = 230
Ácido fosfórico al 85 %	190	P = 50
Nitrato de potasio	320	N = 45; K = 125
Sulfato de potasio	280	K = 125; S = 52
Sulfato de magnesio	500	Mg = 50; S = 67
Sulfato ferroso	10	Fe = 2; S = 1
Sulfato de manganeso	4	Mn = 1
Bórax	4	B = 0.5
Sulfato de cobre	0.4	Cu = 0.1
Sulfato de zinc	0.4	Zn = 0.1

**Cuadro 17. Concentraciones y fuentes de nutrientes aplicados con la solución nutritiva alternativa al 100 %.**

<b>Fuentes comerciales</b>	<b>Cantidad aportada (g 1000 L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Concentración de nutrientes aportados (g 1000 L<sup>-1</sup>)</b>
Fosfonitrato	600	N = 200; P = 5
Superfosfato simple	700	P = 45; Ca = 190; S = 71
Cloruro de potasio	480	K = 250; Cl = 221
Sulfato de calcio	170	Ca = 40; S = 32
Sulfato de magnesio	500	Mg = 50; S = 67
Sulfato ferroso	10	Fe = 2; S = 1
Sulfato de manganeso	4	Mn = 1
Bórax	4	B = 0.5
Sulfato de cobre	0.4	Cu = 0.1
Sulfato de zinc	0,4	Zn = 0.1

**Cuadro 18. Concentraciones de las diferentes formulaciones de solución nutritiva, tanto convencional como alternativa, en distintas etapas fenológicas.**

<b>Etapas fenológicas</b>	<b>Formulaciones 1 y 4</b>	<b>Formulaciones 2 y 5</b>	<b>Formulaciones 3 y 6</b>
Trasplante a antesis en la primera inflorescencia	100 %	80 %	60 % para todos los nutrientes excepto nitrógeno que va al 100 %
Antesis en la primera inflorescencia a amarre de frutos en tercer racimo	100 %	80 %	80 % para todos los nutrientes excepto nitrógeno que va al 100 %
Amarre de frutos del tercer racimo a final de la cosecha	100 %	80 %	100 % para todos los nutrientes excepto potasio que va al 130 %

**Cuadro 19. Concentraciones de nutrientes (mg L<sup>-1</sup>) aportados por los fertilizantes en las formulaciones de solución nutritiva convencional.**

Fuentes fertilizantes	Nutriente	100 %	80 %	Etapa fenológica		
				EF1	EF2	EF3
Nitrato de calcio	N	155	124	155	155	155
	Ca	230	184	138	184	230
Sulfato de potasio	K	125	100	75	100	163
	S	52	42	31	42	52
Nitrato de potasio	N	45	36	45	45	45
	K	125	100	75	100	163
Ácido fosfórico al 85 %	P	50	40	30	40	50
Sulfato de magnesio	Mg	50	40	30	40	50
	S	67	54	40	54	67
Sulfato ferroso	Fe	2	2	2	2	2
	S	1	1	1	1	1
Sulfato de manganeso	Mn	1	1	1	1	1
Borax	B	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfato de cobre	Cu	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Sulfato de zinc	Zn	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

EF1 de trasplante a antesis de primera inflorescencia. EF2 de antesis de primera inflorescencia a amarre de frutos en el tercer racimo. EF3 de amarre de frutos en el tercer racimo a fin de cosecha de los tres racimos.

**Cuadro 20. Nutrientes aportados por los fertilizantes en la solución alternativa.**

Fuentes fertilizantes	Nutriente	100 %	80 %	Etapa fenológica		
				EF1	EF2	EF3
Fosfonitrato (nitrato de amonio)	N	200	160	200	200	200
	P	5	4	3	4	5
Superfosfato de calcio simple	P	45	36	27	36	45
	Ca	190	152	144	152	190
Cloruro de potasio	K	250	200	150	200	325
	Cl	227	182	136	182	221
Sulfato de calcio	Ca	40	32	24	32	40
	S	32	26	19	26	32
Sulfato de magnesio	Mg	50	40	30	40	50
	S	67	54	40	54	67
Sulfato ferroso	Fe	2	1.6	1.2	1.6	2
	S	1	0.8	0.6	0.8	1
Sulfato de manganeso	Mn	1	0.8	0.6	0.8	1
Borax	B	0.5	0.4	0.3	0.4	0.5
Sulfato de cobre	Cu	0.1	0.08	0.06	0.08	0.1
Sulfato de zinc	Zn	0.1	0.08	0.06	0.08	0.1

EF1 de trasplante a antesis de primera inflorescencia. EF2 de antesis de primera inflorescencia a amarre de frutos en el tercer racimo. EF3 de amarre de frutos en el tercer racimo a fin de cosecha de los tres racimos.

Para cada formulación se utilizó como depósito de la solución nutritiva un tinaco de 200 litros de capacidad, donde por medio de gravedad se aplicó riego por goteo a través de cintillas de polietileno con goteros integrados a cada 20 cm de distancia (Figura 5). A lo largo del ciclo de cultivo se aplicaron de tres a cinco riegos por día según las condiciones ambientales y la etapa fenológica de las plantas, de tal modo que, para mantener una solución con conductividad constante en la rizósfera, se buscó dar un sobre-riego que provocara un drenaje del contenedor entre 10 y 20 % del volumen de la solución aplicada durante el día.

Este drenaje fue capturado en contenedores plásticos. Diariamente se midió su volumen, pH y CE. Con esta información se llevó un balance semanal de la solución nutritiva aportada y del volumen de solución nutritiva drenada de las tinas en cada tratamiento durante todo el ciclo. Al final del experimento se contabilizó el volumen de solución y la cantidad de fertilizantes y nutrientes aportados cada día y durante todo el ciclo de cultivo por planta.



**Figura 5. Sistema de riego por goteo utilizado a base de cintilla.**

Recién trasplantadas las plántulas, se realizaron las labores de tutoreo con hilo de plástico, para ello, en la base del tallo de la planta se colocó un anillo de plástico de 23 mm de diámetro para la mejor sujeción del hilo tutor. Los hilos

fueron amarrados a un alambre superior de carga durante todo el ciclo de cultivo, con el objetivo de sostenerla y evitar daños mecánicos en la planta.

A partir de los 60 dds, cada semana se eliminaron los brotes laterales de las plantas para conducir las a un solo tallo. Cuando las flores de la tercera inflorescencia se encontraron en botón, se hizo el despunte (eliminación de la yema terminal) dos hojas por arriba de ésta (80-85 dds), para detener el crecimiento de la planta y obtener la cosecha de sólo tres racimos por planta.

Se mantuvo un control preventivo y curativo de plagas y enfermedades, así como un manejo de las condiciones climáticas adecuado a las necesidades del cultivo hasta el término de la cosecha.

La primera cosecha de frutos se realizó a los 105 dds, cuando los primeros frutos lograron un tamaño y una coloración roja; de ahí en adelante se realizaron cortes semanalmente, durante 4 semanas más hasta el final del ciclo de cultivo que tuvo lugar a los 130 dds, es decir 85 días después del trasplante.

Durante cada corte, los frutos cosechados fueron clasificados en: frutos de tamaño comercial (> 5 cm de longitud), y frutos de tamaño comercial con pudrición basal del fruto (PBF). En cada categoría se registró también el número y peso de frutos para obtener el rendimiento por planta y por unidad de superficie de cada tratamiento.

Al final de la cosecha se tomaron datos de variables morfológicas, peso seco por órganos y total, y de rendimiento por unidad de superficie y sus componentes primarios (número de frutos y peso medio por fruto). También se determinó el gasto total de solución nutritiva y macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg), el lixiviado de macronutrientes en los drenajes, los macronutrientes absorbidos por el cultivo y los macronutrientes retenidos en el sustrato en todo el ciclo de cultivo. Con estos últimos datos se estimaron: la eficiencia de absorción de cada macronutriente y la eficiencia en el uso del agua y de los macronutrientes en el rendimiento final.

### 3.2.3. Variables morfológicas

A los 130 dds se midieron las siguientes variables morfológicas:

**Área foliar por planta:** Con la ayuda de un integrador de área foliar Licor 3100 (Licor Inc., Lincon, Nebraska, EUA), se determinó el área foliar de una planta representativa seleccionada de cada unidad experimental.

**Altura de planta:** En cada unidad experimental, con un flexómetro, se midió y promedió la altura de tres plantas.

**Grosor del tallo:** En cada unidad experimental se midió y promedió con un vernier electrónico el grosor del tallo de las plantas.

### 3.2.4. Variables de peso seco

Los datos de peso seco, por cada órgano y total se midieron de una planta por cada unidad experimental de cada repetición a los 130 dds. Las plantas muestreadas fueron las mismas que se utilizaron para medir el área foliar.

**Peso seco de las hojas:** una vez determinada el área foliar de cada planta representativa seleccionada de cada unidad experimental, se procedió a secar sus hojas en una estufa a una temperatura de 70 °C hasta que llegaran a peso constante, el cual se cuantificó con una balanza analítica.

**Peso seco del tallo:** De cada planta muestreada se tomaron los tallos y se secaron en una estufa a una temperatura de 70 °C hasta que llegaron a peso constante, con la ayuda de una balanza analítica.

**Peso seco de la raíz:** De cada planta muestreada se quitó y lavó la raíz con agua limpia hasta que estuviera libre de partículas de sustrato, una vez limpia fue sometida al proceso de secado en estufa a 70 °C hasta llegar a peso constante, el cual se cuantificó con una balanza analítica.

**Peso seco de los frutos:** De cada planta muestreada seleccionada de cada unidad experimental, previo a que fuera cortada y llevada al laboratorio se marcó con una etiqueta y conforme se cosechaban sus frutos desde los 105 dds y semanalmente hasta los 130 dds, fueron llevados al laboratorio donde se realizó el mismo proceso de secado en estufa, y con la ayuda de una balanza se cuantificó el peso seco.

**Peso seco total por planta:** Se obtuvo sumando el peso seco de la raíz, tallo, hojas y frutos de la planta representativa seleccionada de cada unidad experimental.

### **3.2.5. Variables de rendimiento y sus componentes**

Las variables de rendimiento y sus componentes fueron:

**Índice de cosecha por planta:** se obtuvo con los datos del peso seco de los frutos de la planta representativa seleccionada de cada unidad experimental dividiéndolo entre su peso seco total.

**Número de frutos comerciales por unidad de superficie:** se contaron los frutos comerciales que se cosechaban en cada corte de las ocho plantas de cada unidad experimental.

**Peso medio de los frutos comerciales por planta:** se obtuvo dividiendo el peso fresco total de los frutos comerciales de cada unidad experimental entre el número de frutos totales de la unidad experimental.

**Rendimiento comercial por unidad de superficie:** para la toma de esta variable, se cuantificó el peso fresco total de los frutos comerciales por cada unidad experimental de ocho plantas. El primer corte se realizó a los 105 dds y se cosechó semanalmente hasta los 130 dds para un total de cinco cortes.

**Número de frutos no comerciales por planta:** Se contaron los frutos no comerciales que se cosecharon en cada corte de las ocho plantas de cada unidad experimental.

**Peso medio de frutos no comerciales por planta:** Se obtuvo dividiendo el peso fresco total de los frutos no comerciales de cada unidad experimental entre el número de frutos totales de la unidad experimental.

**Rendimiento no comercial por unidad de superficie:** se cuantificó el peso fresco total de los frutos no comerciales por cada unidad experimental de ocho plantas.

### **3.2.6. Uso de acolchado, consumo y ahorro de solución nutritiva**

**Consumo de agua y fertilizante:** se cuantificó el gasto diario y durante todo el ciclo de cultivo de la solución nutritiva consumida por la planta más un sobre-riego del 10 %, esto se calculó de la siguiente manera: riego aportado - el riego drenado = riego gastado o aprovechado por la planta + 10 % de drenaje.

### **3.2.7. Variables relacionadas con el balance de agua y nutrientes**

**Solución nutritiva y macronutrientes aportados a la planta:** conociendo la concentración de cada elemento en cada una de las formulaciones aplicadas y el gasto en litros de la solución que se le aportó a cada unidad experimental durante todo el ciclo del cultivo, se procedió a calcular la cantidad aportada de cada macronutriente (excepto azufre) por día y durante todo el ciclo de trasplante a fin de cosecha para cada unidad experimental.

**Macronutrientes absorbidos por la planta:** Al final del ciclo de cultivo se realizaron análisis químicos del tejido de la planta representativa seleccionada de cada unidad experimental para determinar el contenido de cada macronutriente (N, P, K, Ca y Mg), excepto azufre, tanto por planta como de las ocho plantas de cada unidad experimental. El procedimiento fue el siguiente:

Una vez seco todo el material fue separado en dos categorías para el proceso de molienda: estructuras vegetativas (hojas, tallo, raíz) y estructuras reproductivas (frutos). La molienda se realizó con un molino WILEY modelo 4 de 110 VAC, el material fue homogeneizado para facilitar el molido. Una vez obtenido el polvo se

almacenó en frascos de vidrio para su digestión posterior en el laboratorio. Para la determinación nutrimental se tomó una muestra de 0.5 g de peso seco, la cual fue sometida a una digestión húmeda (ácido sulfúrico y ácido perclórico en relación 4:1), se agregaron 4 ml de esta mezcla y 2 ml de agua oxigenada al 30 %; el material se quedó sobre una plancha caliente hasta que el extracto cambió a un color claro. El extracto se aforó a 50 ml con agua destilada y a partir de éste se realizaron las determinaciones de N, P, K, Ca y Mg (Alcántar y Sandoval, 1999).

La determinación de N total se realizó por el método de microkjendahl (Chapman y Pratt, 1973). El contenido de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  fue realizado por medio de la adición del reactivo Devarda. El contenido de P se determinó por el método del amarillo de Vanadato-molibdato (Chapman y Pratt, 1973), leyendo en un espectrofotómetro GENESYS 10 UV a una absorbancia de 420 nm. El contenido de K se determinó por medio de un flamómetro JENWAY (Chapman y Pratt, 1973); los contenidos de Ca y Mg fueron determinados por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica Pye Unicam SP 9 de Phillips.

**Macronutrientes lixiviados en los drenajes:** De los drenajes de las tinas se cuantificó su volumen diariamente y se fueron colectando muestras de un volumen conocido. Al momento de la anthesis del primer racimo (65 dds), al momento de amarre de frutos del tercer racimo (90 dds) y al final de la cosecha (130 dds), de los drenajes colectados se tomaron muestras de 150 ml para cada tratamiento y repetición en cada una de las etapas fenológicas señaladas, muestras que fueron almacenadas en frascos color ámbar en un lugar fresco. Posteriormente se hizo la determinación de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , P, K, Ca y Mg empleando las mismas metodologías que para la determinación de sus concentraciones en el tejido vegetal. Con estos datos se calculó la cantidad de cada macronutriente (excepto azufre) que fue lixiviado diariamente y durante todo el ciclo de cultivo.

**Macronutrientes resolubilizados en el sustrato:** Al final del ciclo de cultivo se colectaron dos muestras compuestas del sustrato, una a una profundidad de 0 a 10 cm (0.6 L) y la otra a de 10 a 20 cm de profundidad (0.9 L), sumando 1.5 L de

tezontle en total para cada tratamiento y repetición. Cada muestra de sustrato fue puesta en un recipiente plástico donde se saturó con un volumen conocido de agua destilada, se dejó reposar por un par de horas y posteriormente se realizó la extracción de la solución de saturación, ésta fue filtrada para realizar las determinaciones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , P, K, Ca y Mg mediante las técnicas señaladas para las muestras de tejido vegetal. Con estos datos se estimó la cantidad de macronutrientes presentes en el sustrato de forma soluble al final del ciclo de cultivo.

**Balance final del sistema:** Se representó el balance completo resumiendo la cantidad de macronutrientes presentes en cada proceso del cultivo. Para cada macronutriente (N, P, K, Ca y Mg), excepto azufre, se estimó el porcentaje de absorción por la planta en relación al total suministrado, esto con ayuda de los datos de macronutrientes aportados y de cantidad presente de cada macronutriente en las plantas al final del ciclo de cultivo.

### **3.2.8. Eficiencia de absorción de agua y nutrientes**

En función del gasto de agua y del rendimiento final, se estimó la cantidad de litros de agua y g de nutriente requeridos por la planta para producir un kilogramo de fruto en peso fresco para los tratamientos evaluados.

El diseño experimental fue en bloques completos al azar con un arreglo en parcelas divididas con tres repeticiones, los resultados obtenidos para cada una de las variables estudiadas fueron sometidos a pruebas de análisis de varianza individual por medio del programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0. También se realizaron comparaciones de medias con pruebas de Tukey con una probabilidad  $P=0.05$

### 3.3. Resultados y discusión

#### 3.3.1. Variables morfológicas

El análisis de varianza muestra que, entre formulaciones de solución nutritiva, no hubo diferencias significativas para ninguna de las variables morfológicas estudiadas, pero entre las condiciones de acolchado y sin acolchar, sí hubo diferencias estadísticas en el grosor del tallo (Cuadro 21).

De acuerdo con las comparaciones de medias (Cuadro 22), todas las formulaciones de soluciones nutritivas presentaron valores similares de área foliar por planta, altura de planta y grosor del tallo, con valores medios de 6027 cm<sup>2</sup>, 108 cm y 10.1 mm, respectivamente. Cabe señalar que la extrapolación del área foliar por planta a la densidad de población que se manejó el cultivo equivale a un índice de área foliar (IAF) de 4.2 (0.6 m<sup>2</sup> x 10.6 plantas / 1.5 m<sup>2</sup>) ya considerando los pasillos de 50 cm de ancho que se dejan entre camas. Este IAF es considerado dentro del rango óptimo para maximizar la tasa de fotosíntesis y la acumulación de materia seca por día (Gardner *et al.*, 1990; Heuvelink y Dorais, 2005). Godoy *et al.* (2008) al estudiar dos concentraciones de solución nutritiva (33 a 100 %) reportaron que no hubo diferencias significativas en el área foliar, altura de la planta y peso seco de las hojas, dicho resultado lo atribuyeron a las reservas de nutrientes que poseía el suelo. En el caso de este experimento, los resultados obtenidos pueden deberse a que el despunte de las plantas a la altura del tercer racimo haya propiciado mayores reservas para el desarrollo de las estructuras, ya que los frutos en crecimiento influyen negativamente en el peso de otras estructuras como frutos que apenas están iniciando su crecimiento (Lipari y Pastore, 1986).

Sánchez *et al.* (2014) registraron un comportamiento similar entre distintas formulaciones de solución nutritiva y variables morfológicas, y sólo encontraron diferencias significativas en los primeros días del experimento y éstas disminuyeron con el desarrollo de la planta; en el caso de este experimento sólo

se tomaron mediciones al final del ciclo del cultivo y no durante el crecimiento de la planta lo que sería interesante evaluar en futuros experimentos.

**Cuadro 21. Cuadrados medios de tres caracteres morfológicos de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Fuente de variación	GL	Área foliar	Altura de planta	Grosor del tallo
Repetición	2	303361	94.08	0.45
Formulación	5	1614336	38.65	0.60
Error a	10	1509391	6.98	0.69
Condición	1	129480	10.02	3.25*
FormulaciónXCondición	5	885110	3.36	0.36
Error b	12	698001	8.38	0.45
r <sup>2</sup>		0.77	0.82	0.74
CV (%)		13.86	2.66	6.62

\*: Significativo P=0.05. GL: grados de libertad. CV: coeficiente de variación.

**Cuadro 22. Comparación de medias de tres caracteres morfológicos de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Formulación de solución nutritiva	Área foliar por planta (cm <sup>2</sup> )	Altura de planta (cm)	Grosor del tallo (mm)
Convencional al 100 %	6538 a	107 a	10.1 a
Convencional al 80 %	6658 a	107 a	9.8 a
Convencional variable	5593 a	110 a	9.7 a
Alternativa al 100 %	5349 a	107 a	10.2 a
Alternativa al 80 %	5874 a	109 a	10.3 a
Alternativa variable	6151 a	110 a	10.5 a
DMS	2464	4.29	1.67

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.

En la condición de acolchado las plantas tuvieron estadísticamente mayor grosor de tallo en comparación a no acolchar (Cuadro 23) (10.4 contra 9.8 mm), probablemente porque el acolchado propició condiciones de humedad más elevadas y de menor presión osmótica en el sustrato (FAO, 2013), lo que

favoreció la absorción de más agua por las células del tallo haciéndolas incrementar su volumen (Taiz y Zeiger, 2006).

**Cuadro 23. Comparación de medias de tres caracteres morfológicos de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.**

Condición	Área foliar por planta (cm <sup>2</sup> )	Altura de planta (cm)	Grosor del tallo (mm)
Con acolchado	5967 a	108 a	10.4 a
Sin acolchar	6087 a	109 a	9.8 b
DMS	607	2.10	0.49

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.

### 3.3.2. Variables de peso seco

El análisis de varianza indica que no hubo ningún efecto significativo de formulaciones de solución nutritiva ni de la condición de acolchado en el peso seco de las plantas o en alguno de sus órganos componentes medido a los 130 dds (Cuadro 24). Se puede inferir que el peso seco final de las plantas o de alguno de sus órganos no se vieron afectados con el cambio de fuentes fertilizantes para preparar una solución nutritiva dada, ni tampoco al disminuir la concentración de la solución nutritiva en un 20 % o hacerle cambios de concentración en diferentes etapas fenológicas. Los resultados anteriores concuerdan con lo reportado por Godoy *et al.* (2008).

**Cuadro 24. Cuadrados medios y significancia estadística de las variables del peso seco de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Fuente de variación	GL	Hojas	Tallo	Raíz	Frutos	Total
Repetición	2	107.2	26.5	10.10	9736**	10442**
Formulación	5	184.5	27.5	12.96	518	1628
Error a	10	129.2	20.5	16.23	354	906
Condición	1	287.6	14.6	0.0001	515	1890
FormulaciónXCondición	5	59.5	5.4	10.13	370	504
Error b	12	78.5	21.6	12.02	200	535
r <sup>2</sup>		0.8	0.6	0.67	0.9	0.9
CV (%)		18.6	22.6	56.32	20.1	16.0

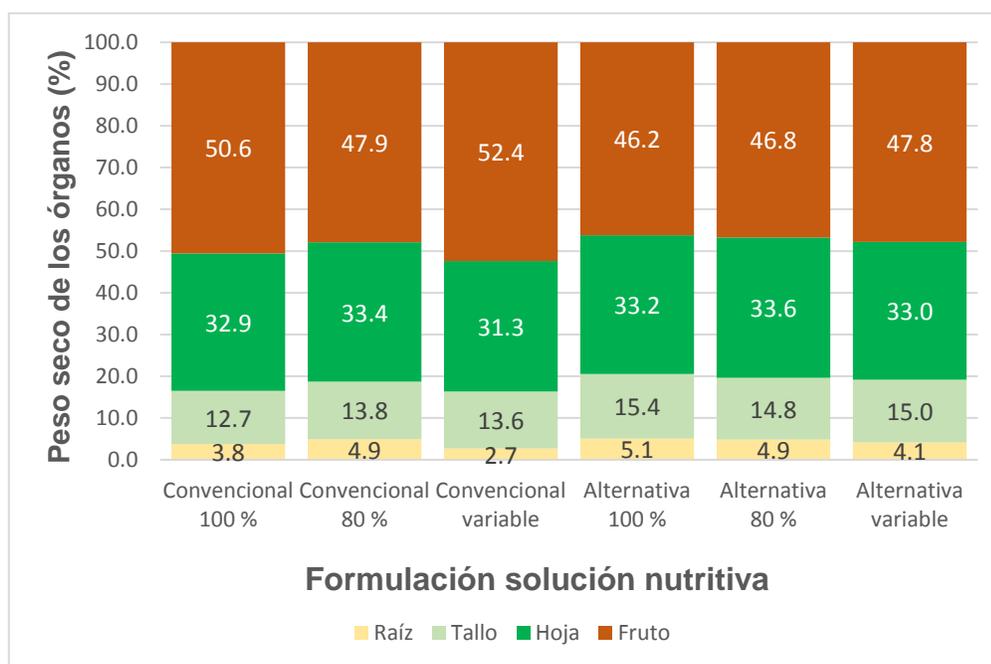
\*\* : Altamente significativo P=0.01. GL: grados de libertad. CV: coeficiente de variación. Condición: acolchado plástico y sin acolchar.

En el cuadro de comparación de medias para formulaciones (Cuadro 25) se observa que el peso seco total que alcanzaron las plantas osciló entre 121 y 170 g, correspondiendo la mitad de este peso a los frutos y más de una tercera parte a las hojas. El peso combinado de tallo y raíz alcanzó entre el 20 a 25 % del peso seco total de la planta (Figura 6). El IC fue de alrededor de 50 % para todos los tratamientos. La distribución del peso seco obtenido en este estudio concuerda con lo reportado por Nuñez-Ramírez *et al.* (2012) en un cultivo de jitomate var. Beatrice a los 180 días después del trasplante (ddt), donde el 54 % se destinó a frutos y 46 % a hojas y tallos en una densidad de 3.8 plantas/m<sup>2</sup>. Vargas-Canales *et al.* (2014) reportan un 60 % en flores y frutos, 30 % en hojas y 10 % en tallos en jitomate tipo saladette var. Rafaello a una densidad de 5 plantas/m<sup>2</sup> y por último Gandica *et al.* (2015) a los 116 ddt registró de 22 a 32 % en tallo, 25 a 27 % en hojas y 35 a 54 % en frutos de jitomate.

**Cuadro 25. Comparación de medias de peso seco de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivadas con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Formulación	Hojas (g)	Tallo (g)	Raíz (g)	Frutos (g)	Total (g)
Convencional al 100 %	47.5 a	18.3 a	5.4 a	72.9 a	144.2 a
Convencional al 80 %	56.8 a	23.5 a	8.4 a	81.6 a	170.5 a
Convencional variable	45.6 a	19.9 a	3.9 a	76.4 a	145.9 a
Alternativa al 100 %	40.1 a	18.6 a	6.1 a	55.8 a	120.8 a
Alternativa al 80 %	45.5 a	20.0 a	6.6 a	63.3 a	135.6 a
Alternativa variable	49.6 a	22.6 a	6.2 a	71.9 a	150.5 a
DMS	22.7	9.0	8.0	37.7	60.3

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.



**Figura 6. Distribución en porcentaje del peso seco a los 130 días después de la siembra en los órganos de la planta de jitomate.**

A pesar de que distintos autores coinciden en que el uso de acolchado plástico posee beneficios para los rendimientos de los cultivos (Lamont, 1993; García, 1996; Díaz-Pérez y Dean Batal, 2002), en este estudio no existió un efecto del acolchado sobre el peso seco de los órganos de la planta (Cuadro 26).

**Cuadro 26. Comparación de medias de peso seco de plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.**

Condición	Hojas (g)	Tallo (g)	Raíz (g)	Frutos (g)	Total (g)
Acolchado	44.7 a	19.9 a	6.1 a	66.5 a	137.3 a
Sin acolchar	50.4 a	21.1a	6.1 a	74.1 a	151.8 a
DMS	6.4	3.3	2.5	10.2	16.8

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.

### 3.3.3. Variables de rendimiento y sus componentes

Los resultados de las variables de índice de cosecha por planta (IC), frutos por planta, peso medio de fruto (g), rendimiento (kg/planta) y frutos con pudrición basal (FPB) están reportados en el Cuadro 27 y 28. El análisis de varianza indicó que hubo un efecto significativo de la formulación de solución nutritiva sobre la variable índice de cosecha, número de frutos por planta, rendimiento y frutos con pudrición basal. No hubo diferencias estadísticas entre la condición con y sin acolchado para ninguna de las variables consideradas.

**Cuadro 27. Cuadrados medios y probabilidad estadística de las variables del rendimiento de la planta de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Fuente de variación	GL	IC por planta	Frutos por planta	Peso medio de fruto	Rendimiento
Repetición	2	0.131**	5.7	7.4	0.085
Formulación	5	0.004*	36.6**	85.9	0.443**
Error a	10	0.005**	4.66	22.1	0.042
Condición	1	0.0002	1.50	97.7	0.003
Formulación <sup>X</sup> Condición	5	0.005*	6.70	50.6	0.081*
Error b	12	0.0012	2.37	28.8	0.026
r <sup>2</sup>		0.96	0.90	0.74	0.91
CV (%)		7.47	8.55	5.13	8.66

\*: Significativo P=0.05. \*\*: Altamente significativo P=0.01. GL: grados de libertad. CV: coeficiente de variación. Condición: acolchado plástico y sin acolchar.

**Cuadro 28. Cuadrados medios y significancia estadística de las variables del rendimiento de la planta de jitomate con pudrición basal a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Fuente de variación	GL	Frutos con PB por planta	Peso medio frutos con PB	Rendimiento de frutos con PB
Repetición	2	0.64	14.7	0.001
Formulación	5	20.60**	7236.04**	0.08**
Error a	10	0.30	53.34	0.001
Condición	1	0.53	0.03	0.001
Formulación <sup>x</sup> Condición	5	1.32	33.72	0.007
Error b	12	0.58	72.9	0.003
r <sup>2</sup>		0.94	0.97	0.91
CV (%)		48.7	26.98	56.92

\*\* : Altamente significativo P=0.01. GL: grados de libertad. CV: coeficiente de variación. Condición: acolchado plástico y sin acolchar. PB: Pudrición Basal.

La prueba de comparación de medias indicó que el IC en todas las formulaciones de solución nutritiva fue igual estadísticamente, pero no en el caso de número de frutos, ni en rendimiento (Cuadro 29). El IC hace referencia a la proporción del peso de los frutos en relación con el peso total de la planta, valores de IC de 0.50 son reportados para plantas a 3 racimos (Tanaka *et al.* 1974; Atherton y Rudich 1986), estos valores son similares con los obtenidos en este trabajo.

El número de frutos comerciales fue significativamente mayor en las formulaciones convencionales (promedio de 20 frutos/planta), respecto a las formulaciones alternativas (promedio de 15.6 frutos/planta) (Cuadro 29). Esta diferencia se explica por la presencia de más frutos con incidencia de pudrición basal en las formulaciones alternativas.

El peso medio de frutos fue similar en todos los tratamientos; en todos los casos se tuvieron frutos ligeramente superiores a 100 g. Sánchez y Ponce (1998) reportaron frutos de 96 g con una densidad similar, ambos pesos se encuentran en el rango adecuado para la comercialización de los frutos en el mercado.

En el Cuadro 29 se observa que el rendimiento por planta fue significativamente mayor en los tratamientos con las formulaciones convencionales (con un promedio cercano a los 2.12 kg/planta), respecto a las formulaciones alternativas

(promedio de 1.62 kg/planta) dado que el peso medio de los frutos comerciables fue similar en todas las formulaciones, esta diferencia se debió al mayor número de frutos por planta obtenido con los sistemas convencionales.

A su vez, el menor número de frutos comerciables obtenidos por planta con las formulaciones alternativas se debe a que en estos tratamientos se presentaron frutos con el desorden fisiológico denominado pudrición basal del fruto (Cuadro 30) posiblemente ocasionado por una deficiencia local de calcio en el mismo, lo que los hace no comerciables, mientras que en las formulaciones convencionales este desorden no se presentó. El mayor número de frutos con pudrición basal se dio en el tratamiento donde la solución alternativa se modificaba según la etapa fenológica y el menor en la formulación con la solución alternativa al 100 % durante todo el ciclo de cultivo.

Los factores involucrados que pueden ayudar a explicar la presencia de este desorden fisiológico en las soluciones alternativas y la diferencia estadística del número de frutos con este desorden entre las tres formulaciones alternativas se destacan a continuación:

En primer lugar, cabe recordar que, en las formulaciones alternativas, el calcio se aportó fundamentalmente como superfosfato simple y como sulfato de calcio (yeso), los cuales son muy poco solubles y difíciles de disolver (Sánchez y Escalante, 1988), mientras que en el caso de las formulaciones convencionales la fuente nitrato de calcio es muy soluble y fácil de disolver. Es posible que, en la preparación de las soluciones nutritivas durante el experimento, los fertilizantes sulfato de calcio y superfosfato simple no se disolvieran completamente, contribuyendo a generar una deficiencia de calcio en la solución.

En segundo lugar, en las formulaciones alternativas un 50 % de la aportación de nitrógeno fue a base de amonio. Este radical por su carga positiva compite fuertemente con la absorción de calcio por la raíz (Sánchez y Escalante, 1988; Marschner, 1995; Resh, 2013; Urrestarazu, 2004; Sonneveld y Voogt, 2009).

Por último, una alta relación K:Ca puede afectar negativamente la absorción de Ca ya que ambos iones son positivos y compiten por ser absorbidos por la raíz. En este caso la velocidad de absorción del potasio es mayor por ser de carga monovalente y la del calcio menor por ser divalente (Marschner, 1995; Sonneveld y Voogt, 2009). La formulación alternativa variable presentó más frutos con pudrición basal por planta posiblemente porque en la etapa de llenado de frutos se elevó la concentración de potasio a 130 %, mientras que la de calcio quedó en un 100 %.

Como se destaca más adelante, los análisis químicos de las plantas alimentadas con las soluciones nutritivas alternativas presentan niveles muy bajos de calcio en sus tejidos, lo que corrobora lo aquí señalado.

En el caso de la concentración de solución nutritiva en las formulaciones convencionales, los resultados apuntan que se puede bajar la concentración normalmente usada de nutrientes sin afectar el rendimiento o calidad de los frutos. De manera similar a éste experimento, Gómez y Sánchez (2003), reportaron que no encontraron diferencias significativas en tratamientos con solución nutritiva al 100 y 66 % de concentración nutrimental, ni en el rendimiento ni en otras variables como número de frutos y peso medio de fruto. De manera similar Flores (2016) y Suazo *et al.* (2014) tampoco encontraron diferencias en concentraciones al 75 % respecto al 100 %. Desde el punto de vista económico es relevante que al probar tratamientos con formulaciones a menores concentraciones resulte en rendimientos similares ya que esto se traduce en un ahorro significativo de fertilizantes al usar las soluciones nutritivas más diluidas que la convencional.

**Cuadro 29. Comparación de medias del rendimiento de la planta de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Formulación	IC por planta	Frutos por planta	Peso medio de fruto (g)	Rendimiento (kg/planta)
Convencional al 100 %	0.48 a	19.8 ab	102.2 ab	2.03 ab
Convencional al 80 %	0.47 a	19.8 ab	106.9 ab	2.11 a
Convencional variable	0.51 a	20.4 a	105.8 ab	2.16 a
Alternativa al 100 %	0.45 a	16.2 abc	97.6 b	1.58 c
Alternativa al 80 %	0.43 a	15.7 bc	107.4 a	1.68 bc
Alternativa variable	0.47 a	15.0 c	106.3 ab	1.58 c
DMS	0.1	4.3	9.4	0.41

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.

**Cuadro 30. Comparación de medias del rendimiento de la planta de jitomate con pudrición basal a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Formulación	Frutos con PB por planta <sup>-1</sup>	Peso medio de frutos con PB (g)	Rendimiento de frutos con PB (kg/planta)
Convencional al 100 %	0.0 c	0.0 b	0.00 d
Convencional al 80 %	0.0 c	0.0 b	0.00 d
Convencional variable	0.0 c	0.0 b	0.00 d
Alternativa al 100 %	2.0 b	64.3 a	0.13 c
Alternativa al 80 %	3.0 b	64.7 a	0.19 b
Alternativa variable	4.2 a	61.0 a	0.26 a
DMS	1.10	14.6	0.05

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa. PB: Pudrición Basal.

Por otra parte, el análisis de varianza y el de comparación de medias indicaron que no existe un efecto de la condición acochado o sin acolchar sobre de las variables de rendimiento (Cuadro 31 y 32). El objetivo del fertirriego es suministrar a la planta la cantidad de agua necesaria para su consumo, disminuir la salinidad de la rizósfera (CE), equilibrar el balance de nutrientes y proporcionar una buena aireación para la respiración radical por medio de la relación aire-agua en la proporción óptima (Urrestarazu, 2015), todos los aspectos anteriores se modifican con el uso de acolchado por lo que el fertirriego debe ser ajustado a estas condiciones. Por otra parte, el riego junto con el suministro de sobre-riego ejercido para disminuir la concentración de sales en la rizósfera debe ajustarse

con una mayor frecuencia y no con dosis mayores ya que el sustrato no será capaz de retener más agua y se incrementará el nivel de drenaje y con este el lavado de sales (Urrestarazu, 2015).

**Cuadro 31. Comparación de medias de variables de rendimiento de la planta de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.**

Condición	IC por planta	Frutos por planta	Peso medio de fruto (g)	Rendimiento (kg/planta)
Acolchado	0.46 a	18.05 a	102.8 a	1.85 a
Sin acolchar	0.47 a	17.64 a	106.1 a	1.87 a
DMS	0.02	1.11	3.89	0.11

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.

**Cuadro 32. Comparación de medias de variables de rendimiento de la planta de jitomate con pudrición basal a los 130 días después de la siembra cultivado en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.**

Condición	Frutos con PB por planta	Peso medio frutos con PB (g)	Rendimiento de frutos con PB (kg/planta)
Acolchado	1.44 a	31.64 a	0.100 a
Sin acolchar	1.68 a	31.71 a	0.111 a
DMS	0.55	6.20	0.043

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa. PB: Pudrición Basal.

### 3.3.4. Uso de acolchado, consumo y ahorro de solución nutritiva

De acuerdo con los Cuadros 33 y 34, el volumen de solución consumida (solución aportada - solución drenada + 10 % de sobre-riego) en los 85 días que transcurrieron desde el trasplante hasta el fin de la cosecha, fue estadísticamente igual para las seis formulaciones consideradas, oscilando entre 59.3 y 64.5 L/planta, lo que equivale a un promedio de 7.3 a 8 L m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> (considerando una densidad de 10.6 plantas/m<sup>2</sup>) o 0.7 a 0.8 L/planta/día.

Ya que las formulaciones al 80 % tenían menor concentración de nutrientes, el gasto de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) fue un 20 % menor, diferencia que resultó estadísticamente significativa. También el gasto de P, Mg y S resultó estadísticamente menor en las formulaciones variables según la etapa fenológica

respecto a las formulaciones al 100 %, esto porque durante un tercio del ciclo se manejaron al 50 % y otro tercio al 80 % de su concentración normal.

Con base en precios actuales de fertilizantes, para el caso de las formulaciones convencionales el costo por m<sup>3</sup> de preparar una solución al 100 % es de \$ 34.00 pesos. Suponiendo un gasto de 0.65 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> en un ciclo de cultivo y tres ciclos de cultivo al año, posible gracias al sistema de despunte a tres racimos por planta, a una escala comercial de una hectárea, el consumo sería de 19,716 m<sup>3</sup> de solución al año con un costo en fertilizantes del orden de \$ 670,344.00 pesos. Usando la solución al 80 % se obtiene el mismo rendimiento por unidad de superficie y la misma calidad, pero se ahorrarían \$ 134,069.00 pesos anuales en fertilizantes.

**Cuadro 33. Cuadrados medios y significancia estadística del consumo de solución nutritiva y macronutrientes aportados en el riego de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Fuente de variación	GL	Consumo	N	P	K	Ca	Mg	S
Repetición	2	105.1*	3.8*	0.2*	5.9*	5.6*	0.2*	1.4*
Formulación	5	28.4	13.1**	0.5**	16.9**	11.5**	0.5**	2.6**
Error a	10	17.5	0.6	0.03	0.9	0.9	0.03	0.2
Condición	1	106.7*	4.1*	0.2*	6.8*	5.8*	0.2*	1.2*
FormulaciónXCondición	5	15.7	0.6	0.03	0.9	0.7	0.03	0.2
Error b	12	10.2	0.4	0.02	0.6	0.6	0.02	0.13
r <sup>2</sup>		0.85	0.95	0.92	0.94	0.92	0.92	0.92
CV (%)		5.14	5.20	5.47	5.27	5.47	5.47	5.50

\*: Significativo P=0.05. \*\*: Altamente significativo P=0.01. GL: grados de libertad. CV: coeficiente de variación. Condición: acolchado plástico y sin acolchar.

**Cuadro 34. Comparación de medias del consumo de solución nutritiva y macronutrientes aportados en el riego de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Formulación	Consumo (L)	N (g)	P (g)	K (g)	Ca (g)	Mg (g)	S (g)
Convencional al 100 %	62.0 a	12.3 a	3.1 a	15.5 a	15.5 a	3.1 a	7.4 a
Convencional al 80 %	59.3 a	9.5 b	2.3 c	11.8 b	11.8 d	2.3 c	5.7 c
Convencional variable	63.8 a	12.7 a	2.6 bc	15.4 a	13.6 bcd	2.6 bc	6.4 bc
Alternativa al 100 %	59.3 a	11.8 a	2.9 ab	14.8 a	14.8 ab	2.9 ab	7.1 ab
Alternativa al 80 %	62.0 a	9.9 b	2.4 c	12.3 b	12.3 cd	2.4 c	5.9 c
Alternativa variable	64.5 a	12.9 a	2.7 bc	15.5 a	13.7 abc	2.7 bc	6.5 bc
DMS	8.38	1.51	0.38	1.87	1.86	0.38	0.89

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.

Las comparaciones de medias del Cuadro 35 indican que la cantidad de solución consumida fue mayor en la condición sin acolchar (64 L/planta) que en la condición acolchada (60 L/planta). De manera general, los gastos de N, P, K, Ca, Mg y S fueron menores en la condición acolchada que sin acolchar, esto debido al menor aporte de riego que se realizó en el primer caso, que equivale a un ahorro del 6 % con el acolchado respecto a no acolchar. Como se comentó anteriormente, el uso de acolchado ocasionó disminución de la evaporación lo que se tradujo en mayor eficiencia en el uso de agua y una reducción del lixiviado de fertilizantes (Moreno *et al.*, 2006) hecho que también resultó en este experimento. Gómez y Sánchez (2003), reportan en un experimento similar un ahorro del 7.35 % en condición de acolchado; ellos argumentan que estas diferencias son más evidentes en las primeras etapas de desarrollo del cultivo, quizá debido a que la planta aún no desarrolla su máximo follaje y la superficie del sustrato está libre de vegetación, lo que favorece la evaporación. Por otra parte, Ibarra y Rodríguez, (1991) reportan que el acolchado plástico permite un ahorro de agua de 15 % en comparación con un sistema tradicional, aunque el ahorro de este estudio fue menor, aun así, representa un ahorro significativo si se extrapola a extensiones mayores de cultivo, sobre todo en áreas donde el existe poca disponibilidad de agua.

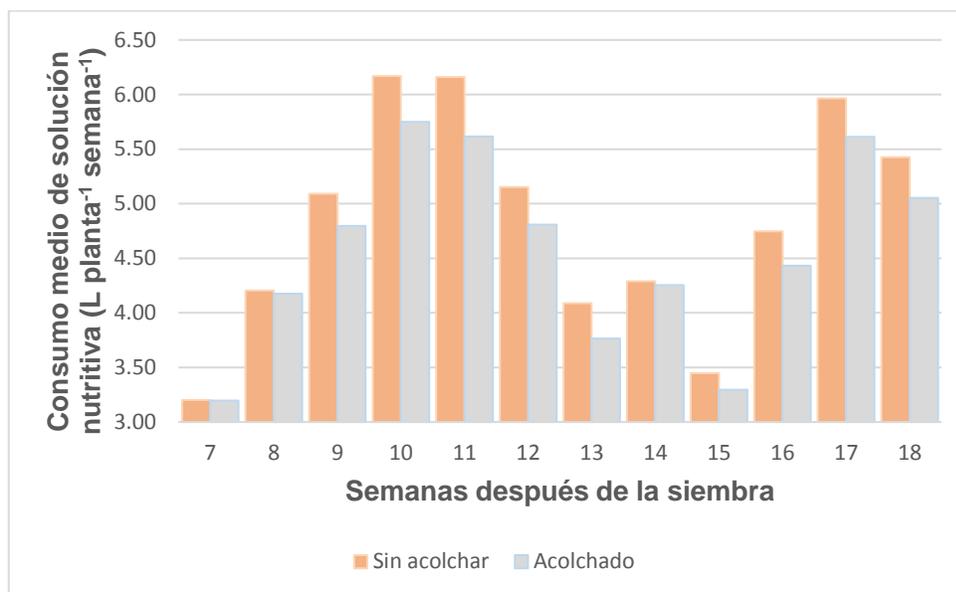
**Cuadro 35. Comparación de medias de macronutrientes aportados en el riego de jitomate a los 130 días después de la siembra cultivado en condiciones con acolchado plástico y sin acolchar.**

Condición	Consumo (L)	N (g)	P (g)	K (g)	Ca (g)	Mg (g)	S (g)
Acolchado	60.1 b	11.2 b	2.6 b	13.8 b	13.2 b	2.6 b	6.3 b
Sin acolchar	64.0 a	11.8 a	2.8 a	14.6 a	14.0 a	2.8 a	6.7 a
DMS	2.31	0.44	0.11	0.54	0.54	0.11	0.25

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.

La Figura 7 muestra que el consumo de solución nutritiva de las plantas sin acolchar fue mayor a lo largo del desarrollo del cultivo; se observa que entre las semanas 13 a 15 hay un descenso pronunciado en el consumo de agua, el cual

se puede asociar a la presencia de varios días nublados y a la incidencia de las primeras lluvias de la temporada.



**Figura 7. Consumo medio de solución nutritiva de una planta de jitomate en condiciones de acolchado y sin acolchado plásticos.**

A pesar de que en este estudio el ahorro de agua de riego fue solamente del 6%, traduciendo la diferencia en el consumo de solución nutritiva bajo la condición de acolchado a la superficie de una hectárea el resultado sería 424 m<sup>3</sup> de solución nutritiva ahorrada por ciclo, o de 1,272 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Si un m<sup>3</sup> de solución nutritiva convencional al 100 % tiene un costo aproximado de \$ 34.00 pesos, el ahorro sería aproximadamente \$ 43,248.00 pesos menos el costo del plástico para acolchar y los jornales para su colocación (aproximadamente \$ 10,000.00 pesos por ambos conceptos).

### 3.3.5. Variables relacionadas con el balance de agua y nutrientes

Con la finalidad de estudiar la distribución y la eficiencia en el uso de los nutrientes por el sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta, en alta densidad de población, con un sistema hidropónico sin recirculación de la solución nutritiva y con arena nueva de tezontle como sustrato, se realizó una estimación de la distribución de los nutrientes en los distintos componentes de este sistema, desde el momento del trasplante (45 dds) hasta el final de la

cosecha (130 dds); es decir, durante un periodo de 85 días. Estos componentes analizados son:

- a) Nutrientes aportados con la solución nutritiva
- b) Nutrientes absorbidos por la planta
- c) Nutrientes lixiviados en el drenaje
- d) Nutrientes resolubilizados en el sustrato

El supuesto del que se parte es que si el tezontle es químicamente inerte (sin capacidad de intercambio catiónico), entonces el balance final sería:

*Nutrientes aportados por los fertilizantes – (nutrientes absorbidos por la planta + nutrientes lixiviados en el drenaje + nutrientes resolubilizados en el sustrato) = 0.*

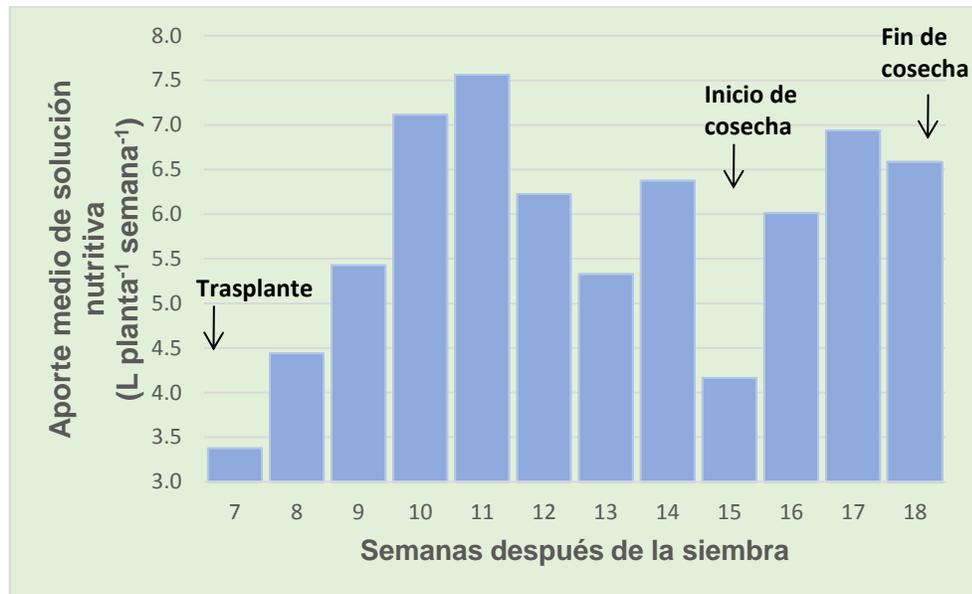
Si el resultado no fuera cero, las diferencias se explicarían por fijación o adsorción de nutrientes en el tezontle que no pudieron ser resolubilizados ni cuantificados en el análisis químico o bien por aportaciones del agua de riego o del sustrato que indicarían que el tezontle no es del todo inerte.

#### **3.3.5.1. Solución nutritiva y macronutrientes aportados a la planta**

El consumo de agua (y en consecuencia de solución nutritiva) depende de varios factores como son: etapa fenológica de la planta, el índice de área foliar (IAF), la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento entre otros.

En este estudio se presentaron variaciones en el consumo de solución nutritiva a lo largo del ciclo de cultivo; en la Figura 8 se puede apreciar un aumento en el gasto de agua por planta en las primeras semanas después del trasplante, producto del aumento del área foliar, y posteriormente un descenso de la semana 13 a la 15 debido a la ocurrencia de varios días nublados. De manera general el rango de consumo varió entre 0.5 y 1 L/planta/día, con un promedio de consumo de solución nutritiva en los 85 días de trasplante a fin de cosecha de 0.81 L/planta/día (69 L/planta/ciclo de cultivo), equivalentes a 8.6 L m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> de

superficie de invernadero al disponerse una densidad de población de 10.6 plantas/m<sup>2</sup>.



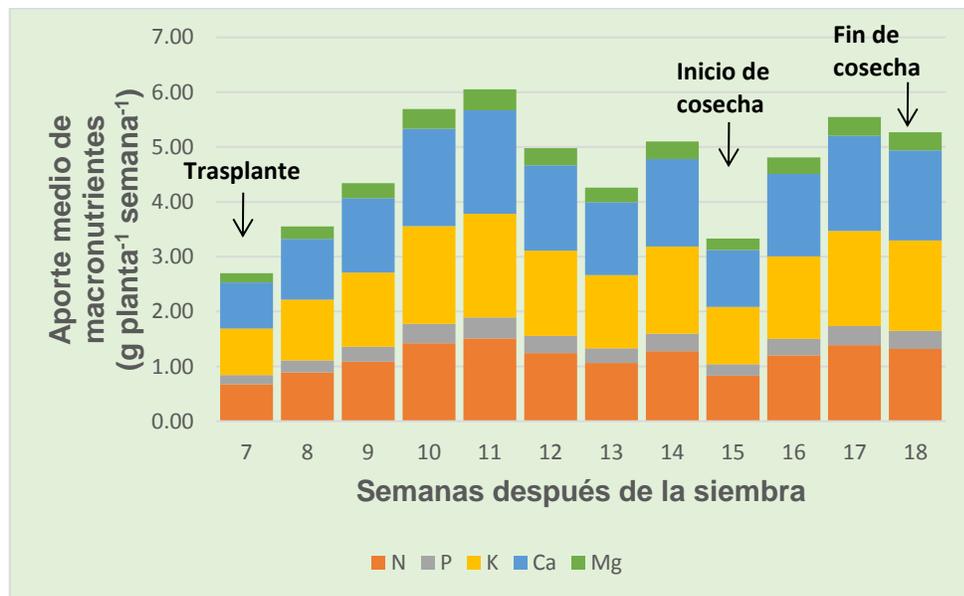
**Figura 8. Aporte medio de solución nutritiva en una planta de jitomate cultivada con la formulación convencional al 100 % en condición sin acolchar.**

Respecto a los nutrientes aportados, en el Cuadro 36 se presentan las cantidades de cada macronutriente (excepto azufre) aportado por planta durante todo el ciclo para cada una de las formulaciones estudiadas, así como para las condiciones de acolchado y sin acolchar.

En el caso del consumo semanal de macronutrientes también se presentó una variación del gasto. En la Figura 9 se presenta el consumo semanal de macronutrientes por planta para la formulación convencional al 100 %. Se puede apreciar un incremento gradual en los nutrientes aportados durante las primeras cinco semanas después del trasplante, seguido de un descenso en las siguientes cuatro semanas, siguiendo un patrón similar al consumo de agua. El comportamiento de las demás formulaciones fue similar.

**Cuadro 36. Macronutrientes aportados por planta (en gramos) durante un ciclo de cultivo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva en promedio de condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.**

Formulación	N	P	K	Ca	Mg
Convencional 100 %	13.9	3.5	17.4	17.4	3.5
Convencional 80 %	11.1	2.8	13.9	13.9	2.8
Convencional variable	13.9	2.7	15.4	13.7	2.7
Alternativa 100 %	13.9	3.5	17.4	17.4	3.5
Alternativa 80 %	11.1	2.8	13.9	13.9	2.8
Alternativa variable	13.9	2.7	15.4	13.7	2.7



**Figura 9. Aporte medio de macronutrientes por semana en una planta de jitomate cultivada con la formulación convencional al 100 % en condición sin acolchar.**

En el apartado de rendimiento y sus componentes se señaló que en las formulaciones convencionales se obtuvieron mayores rendimientos en comparación con las alternativas, también que entre las formulaciones convencionales al 80 o 100 % de concentración, los rendimientos fueron

similares, por lo que con la solución convencional al 80 % se obtiene un 20 % de ahorro en fertilizantes para el productor. Este ahorro puede ser significativo. Por ejemplo, si se extrapola el consumo de solución nutritiva por planta de trasplante a fin de cosecha (que fue de 69 L) al consumo por hectárea, con una densidad de población de 10.6 plantas/m<sup>2</sup> de invernadero se tendría un gasto de 731 L/m<sup>2</sup>/ciclo o 7,314 m<sup>3</sup>/ha/ciclo; con tres ciclos de cultivo al año el gasto sería de 21,942 m<sup>3</sup>/ha/año. Si el costo de preparar un m<sup>3</sup> de solución convencional al 100 % fue de \$ 34.00 pesos como se señaló anteriormente, el gasto en fertilizantes al año equivale a \$746,028.00 pesos, mientras que, si se utiliza la solución convencional al 80 % que da el mismo rendimiento, se tiene un gasto de \$596,822.00 pesos; es decir, habría un ahorro de \$149,206.00 pesos por hectárea por año para el productor, mismo que se traduciría en ganancia extra.

Por otro lado, si se comparara el gasto en fertilizantes y el rendimiento extrapolado a una hectárea y un año del tratamiento de solución convencional al 80 % contra el de solución alternativa también al 80 %, los números serían los siguientes (Cuadro 37):

Nótese que, aunque el uso de la solución alternativa al 80 % significaría un ahorro de poco más de \$ 200,000.00 pesos/ha/año respecto a la convencional al 80 %, la diferencia en ingreso bruto por el menor rendimiento de jitomate con la solución alternativa sería de más de \$ 1,000,000.00 pesos, por lo que definitivamente la solución más rentable para el productor es la convencional al 80 % de su concentración normal.

Como ya se indicó, parece posible mejorar la solución alternativa mediante la adición de nitrato de calcio, reduciendo el nitrato de amonio y sustituyendo el superfosfato simple con el fosfato mono-amónico o di-amónico. El costo por m<sup>3</sup> sería un poco mayor a la solución alternativa, pero inferior a la convencional; por ello se sugiere realizar un estudio expofeso.

**Cuadro 37. Extrapolación de rendimientos, consumo de solución y costos de dos formulaciones de solución nutritiva.**

<b>Formulación convencional al 80 %</b>	<b>Formulación alternativa al 80 %</b>
Rendimiento/m <sup>2</sup> = 22.4 kg	Rendimiento/m <sup>2</sup> = 17.8 kg
Rendimiento/ciclo = 224 t ha <sup>-1</sup>	Rendimiento/ciclo = 178 t ha <sup>-1</sup>
Rendimiento por año = 672 t ha <sup>-1</sup>	Rendimiento por año = 534 t ha <sup>-1</sup>
Ingreso bruto estimado = \$ 6,720,000.00	Ingreso bruto estimado = \$ 5,340,000.00
Consumo = 21,390 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Consumo = 21,390 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Costo de la solución = \$ 581,808.00	Costo de la solución = \$ 376,464.00

Nota: suponiendo un precio medio de venta de \$ 10.00 pesos por kg y tres ciclos de cultivo al año. El precio estimado por m<sup>3</sup> de solución es de \$ 27.20 pesos para la convencional al 80 % y de \$ 17.60 pesos para la alternativa al 80 %.

En cuanto al ahorro económico por acolchar, en este experimento no fue notable debido a que el diseño experimental tuvo algunas limitaciones ya que no permitió realizar los riegos por separado en cada condición y ésto afectó la eficiencia del acolchado para ahorrar solución nutritiva. Se sugiere continuar con la investigación e implementar un experimento más detallado para valorar el ahorro en agua y nutrientes que puede representar el acolchado al disminuir o evitar la alta tasa de evaporación de un sustrato tan rugoso como lo es el tezontle.

### **3.3.5.2. Macronutrientes absorbidos por la planta**

El análisis de varianza muestra que existen diferencias significativas entre formulaciones de solución nutritiva para P, Ca y Mg absorbidos por las plantas. Entre las condiciones de acolchado y sin acolchar no se encontraron diferencias significativas (Cuadro 38).

**Cuadro 38. Cuadrados medios y significancia estadística de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivado en un ciclo de trasplante a fin de cosecha de 85 días con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Fuente de variación	GL	N	P	K	Ca	Mg
Repetición	2	5.07*	0.44*	20.07*	1.34*	0.32*
Formulación	5	1.27	0.25*	1.56	5.54**	0.45*
Error a	10	0.57	0.02	1.41	0.27	0.03
Condición	1	2.88	0.05	3.61	0.02	0.02
FormulaciónXCondición	5	0.40	0.01	1.36	0.35	0.02
Error b	12	0.44	0.03	0.95	0.26	0.03
r <sup>2</sup>		0.83	0.86	0.86	0.92	0.91
CV (%)		19.4	16.2	14.2	23	19.5

\*: Significativo P=0.05. \*\*: Altamente significativo P=0.01. GL: grados de libertad. CV: coeficiente de variación. Condición: acolchado plástico y sin acolchar.

De manera general el orden de cantidad de nutrientes absorbidos por la planta fue: K > N > Ca > P > Mg. Fayad *et al.* (2002) registró un orden similar de absorción de nutrientes en jitomate en un ambiente protegido (K > N > Ca > Mg > P), e indica que la parte vegetativa extrajo más Ca y Mg y el fruto más N, P, K. Por su parte, Vargas-Canales *et al.* (2014) registraron un orden igual en la absorción de nutrientes al de este estudio (K > N > Ca > P > Mg). En estas comparaciones se puede destacar que los altos contenidos de extracción de K y Ca son característicos de la etapa de fructificación.

De acuerdo con las comparaciones de medias del Cuadro 39, de manera general las plantas manejadas con las distintas formulaciones absorbieron cantidades similares de nitrógeno y potasio, (2.4 % y 4.6 % en promedio, respectivamente). Lo anterior podría sugerir que las plantas absorbieron estos elementos hasta abastecer su demanda con cierta independencia de la concentración externa aportada (absorción diferencial). Las cantidades de los macronutrientes absorbidos por las plantas en el presente estudio concuerdan con los valores registrados por Heuvelink y Dorais (2005) y Vargas-Canales *et al.* (2014), este último en un cultivo de jitomate en tezontle y con un peso similar de planta.

El nitrógeno y el potasio son nutrientes importantes para el cultivo de jitomate, el primero está implicado directamente en el crecimiento de la planta y el segundo funciona como un elemento que mantiene el balance de las cargas en la célula por efecto de los ácidos orgánicos, de sulfatos, cloruros o nitratos (Heuvelink y Dorais, 2005). La relación de absorción de N:K es similar durante la formación de los dos o tres primeros racimos; esta relación disminuye con el desarrollo de los frutos llegando a ser de 1:2.5 (Atherton y Rudich, 1986; Heuvelink y Dorais, 2005); en este estudio, la relación que se estableció en los aportes de la solución nutritiva fue 1:1.25 y la relación de absorción final en la planta fue de 1:2 en promedio para todas las formulaciones, lo que indica un incremento de absorción de potasio en la planta tal como lo mencionan Heuvelink y Dorais (2005).

En el caso de la absorción de fósforo, calcio y magnesio, las plantas cultivadas con las formulaciones convencionales presentaron valores significativamente mayores a las formulaciones alternativas. Como se mencionó anteriormente, esto podría estar relacionado con el tipo de fuentes usadas y su baja solubilidad (sulfato de calcio y superfosfato simple), por lo que es posible que dichos fertilizantes no se disolvieran adecuadamente, provocando una baja disponibilidad y absorción para la planta, contribuyendo a la aparición del desorden en los frutos conocido como la pudrición basal por deficiencia de calcio.

También, de acuerdo con Kirkby y Mengel (1967), se ha observado que en presencia de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) se disminuye la absorción de otros cationes. Es probable que la absorción de Ca y Mg en las formulaciones alternativas haya sido interferida por la presencia de nitrógeno en forma de  $\text{NH}_4^+$  suministrado por el nitrato de amonio en la solución nutritiva, ya que al poseer cargas del mismo tipo estos iones compiten por la entrada a las células de la planta creando un antagonismo.

**Cuadro 39. Comparación de medias de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivado en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Formulación	N	P	K	Ca	Mg
Convencional al 100 %	3.38 a (2.3 %)	1.28 ab (0.8 %)	6.6 a (4.5 %)	3.1 a (2.1 %)	0.99 ab (0.7 %)
Convencional al 80 %	3.34 a (2.3 %)	1.48 a (0.9 %)	6.7 a (4.0 %)	3.2 a (1.9 %)	1.26 a (0.7 %)
Convencional variable	2.97 a (2.0 %)	1.14 bc (0.8 %)	7.5 a (5.0 %)	3.0 a (2.0 %)	0.90 bc (0.6 %)
Alternativa al 100 %	3.01 a (2.5 %)	0.99 bc (0.8 %)	6.0 a (5.0 %)	1.4 b (1.2 %)	0.59 cd (0.5 %)
Alternativa al 80 %	3.58 a (2.6 %)	0.93 c (0.7 %)	6.5 a (4.8 %)	1.3 b (1.0 %)	0.81 bcd (0.6 %)
Alternativa variable	4.23 a (2.8 %)	1.03 bc (0.7 %)	6.9 a (4.6 %)	1.3 b (0.8 %)	0.50 d (0.3 %)
DMS	1.52	0.34	2.38	1.04	0.35

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa. Los macronutrientes fueron calculados en gramos y en % de peso seco,

Por otra parte, Sonneveld y Voogt (2009) sugieren que el consumo de la planta se modifica de acuerdo con sus fases de crecimiento y desarrollo, condiciones climáticas, CE, pH, temperatura, oxígeno disuelto en la solución nutritiva y luminosidad; de esta manera aproximadamente el 1 % del peso fresco total de la planta corresponde a los nutrientes inorgánicos (Papadopoulos,1991). En el presente estudio, el contenido de macronutrientes minerales (excepto azufre) representó aproximadamente el 10.4 % del peso total de la planta en promedio.

De acuerdo con Heuvelink y Dorais (2005), la demanda de absorción de un cultivo de jitomate en invernadero para producir un rendimiento de 100 t ha<sup>-1</sup> es de 200 a 600 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno, 43 a 83 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo y de 498 a 830 kg ha<sup>-1</sup> de potasio; si se comparan estos datos con los de este experimento, considerando una densidad de 10.6 plantas/m<sup>2</sup> de invernadero, las cantidades absorbidas por las plantas para lograr ese rendimiento serían: 158 kg ha<sup>-1</sup> de N, 69.7 kg ha<sup>-1</sup> de P, 317 kg ha<sup>-1</sup> de K, 150 kg ha<sup>-1</sup> de Ca y 59 kg ha<sup>-1</sup> de Mg, las cuales se encuentran en el rango mencionado por dichos autores, con excepción del consumo de potasio que fue un poco menor.

En el caso de la condición de acolchado o sin acolchar, en el promedio de las formulaciones no se detectaron diferencias significativas en absorción para ninguno de los macronutrientes considerados (Cuadro 40).

**Cuadro 40. Comparación de medias de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivado en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.**

Condición	N	P	K	Ca	Mg
Acolchado	3.14 a (2.2 %)	1.10 a (0.8 %)	6.41 a (4.6 %)	2.20 a (1.6 %)	0.81 a (0.6 %)
Sin acolchar	3.70 a (2.4 %)	1.18 a (0.7 %)	7.05 a (4.6 %)	2.25 a (1.5 %)	0.87 a (0.6 %)
DMS	0.48	0.13	0.70	0.37	0.11

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa. Los macronutrientes fueron calculados en gramos y en % de peso seco,

En cuanto a la eficiencia de absorción de cada macronutriente (cantidad absorbida en relación a la cantidad total aportada en %), se puede destacar lo siguiente (Cuadro 41):

Las mayores eficiencias de absorción para todos los macronutrientes se dieron con la formulación convencional al 80 %.

Las mayores eficiencias de absorción de nitrógeno y potasio se dieron con las formulaciones convencional y alternativa al 80 %.

Las formulaciones alternativas dieron eficiencias de absorción bajas para fósforo y muy bajas para calcio.

**Cuadro 41. Eficiencia de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Nutriente	Formulación	Aportado en la solución nutritiva (g)	Absorbido por la planta (g)	Eficiencia respecto al total aportado (%)
<b>N</b>	Convencional 100 %	13.9	3.38	24
	Convencional 80 %	11.1	3.34	30
	Convencional variable	13.9	2.97	21
	Alternativa 100 %	13.9	3.01	22
	Alternativa 80 %	11.1	3.58	32
	Alternativa variable	13.9	4.23	30
<b>P</b>	Convencional 100 %	3.5	1.28	36
	Convencional 80 %	2.8	1.48	53
	Convencional variable	2.7	1.14	42
	Alternativa 100 %	3.5	0.99	28
	Alternativa 80 %	2.8	0.93	33
	Alternativa variable	2.7	1.03	38
<b>K</b>	Convencional 100 %	17.4	6.60	38
	Convencional 80 %	13.9	6.70	48
	Convencional variable	15.4	7.50	49
	Alternativa 100 %	17.4	6.01	34
	Alternativa 80 %	13.9	6.51	47
	Alternativa variable	15.4	6.93	45
<b>Ca</b>	Convencional 100 %	17.4	3.08	18
	Convencional 80 %	13.9	3.18	23
	Convencional variable	13.7	3.03	22
	Alternativa 100 %	17.4	1.45	8
	Alternativa 80 %	13.9	1.31	9
	Alternativa variable	13.7	1.28	9
<b>Mg</b>	Convencional 100 %	3.5	0.99	28
	Convencional 80 %	2.8	1.26	45
	Convencional variable	2.7	0.90	33
	Alternativa 100 %	3.5	0.59	17
	Alternativa 80 %	2.8	0.81	29
	Alternativa variable	2.7	0.5	18

En general, se puede decir que las eficiencias de absorción fueron bajas para tratarse de un sistema hidropónico, con un promedio en la solución convencional al 80 % (que fue la formulación más eficiente) de 30 % para nitrógeno, 53 % para fósforo, 48 % para potasio, 23 % para calcio y 45 % para magnesio. Al respecto

se puede destacar que distintos sistemas hidropónicos presentan diferentes eficiencias de absorción. En general los sistemas con recirculación de la solución nutritiva como el de raíz flotante, técnica de la película nutritiva, new growing system o la aeroponía, son los más eficientes, pues se pueden lograr porcentajes de absorción superiores al 90 % de lo aportado en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio; en tanto que con sistemas hidropónicos abiertos con sustratos inertes pueden presentar eficiencias de absorción inferiores al 50 % por pérdidas de nutrientes por lixiviación y precipitación en la superficie del sustrato (Sonneveld y Voogt, 2009; Osuna, 2011; Resh, 2013; Cunha-Chiamolera *et al.*, 2017).

La baja eficiencia de absorción de calcio puede tener su explicación en una elevada precipitación de sulfatos y fosfatos de calcio debido a que la arena de tezontle es muy rugosa y, por lo tanto, en una cama de cultivo se expone mucha superficie a la evaporación de la solución; como el sulfato y el fosfato de calcio son poco solubles pueden precipitar con facilidad, además, como el riego es por goteo no moja de manera uniforme toda la superficie de la cama y se pueden quedar fijadas las sales en la superficie del tezontle sin ser resolubilizadas.

Al comparar la eficiencia de absorción de los macronutrientes entre formulaciones se puede apreciar que la formulación al 80 % tuvo la mayor eficiencia, por lo tanto, se reitera la recomendación de esta formulación para que sea usada por el productor, pues representa la ventaja de que se aprovecha más el fertilizante y, en comparación con la formulación al 100 % que implica un 20 % extra en cantidad y por ende en costo de fertilizantes.

En cuanto a la comparación entre acolchar y no acolchar (Cuadro 42), la eficiencia de absorción fue similar entre ambas condiciones. Esto como se comentó anteriormente, puede estar asociado a las limitantes del diseño del experimento, ya que existió un mayor sobre-riego con acolchado y por lo tanto un mayor porcentaje de nutrientes lixiviados lo que desfavorece los datos de eficiencia de absorción en el caso del acolchado.

**Cuadro 42. Eficiencia de macronutrientes absorbidos en una planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Nutriente	Condición	Aportado en la solución nutritiva (g)	Absorbido por la planta (g)	Eficiencia respecto al total aportado (%)
<b>N</b>	Acolchado	12.9	3.14	24
	Sin acolchar	12.9	3.70	29
<b>P</b>	Acolchado	3	1.10	37
	Sin acolchar	3	1.18	39
<b>K</b>	Acolchado	15.5	6.41	41
	Sin acolchar	15.5	7.05	45
<b>Ca</b>	Acolchado	15	2.20	15
	Sin acolchar	15	2.25	15
<b>Mg</b>	Acolchado	3	0.81	27
	Sin acolchar	3	0.87	29

### 3.3.5.3. Macronutrientes lixiviados en los drenajes

Se calculó la cantidad perdida de cada macronutriente en los drenajes a lo largo del ciclo de trasplante a fin de cosecha (85 días) en gramos por planta. El análisis de varianza con estos datos muestra que existen diferencias significativas entre formulaciones de solución nutritiva para todos los macronutrientes y también entre la condición de acolchado y sin acolchar excepto para Ca (Cuadro 43).

Aunque el análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas para Ca, la comparación de medias no lo detectó, indicando que en todas las formulaciones se lixivió una cantidad similar de este elemento (Cuadro 44). Tampoco hubo diferencias para las pérdidas de fósforo; destacando que estas fueron mínimas en relación a los demás macronutrientes. Se destaca también que la solución alternativa al 100 % fue la que perdió más nitrógeno, potasio y magnesio por lixiviación.

En gramos lixiviados por planta se tiene el siguiente orden decreciente de pérdida de los macronutrientes por lixiviación: Ca > K > Mg > N > P. Sin embargo, si se

toman los porcentajes de macronutrientes lixiviados en relación al total aportado el orden decreciente es Mg > Ca > K > N > P.

**Cuadro 43. Cuadrados medios y significancia estadística de macronutrientes lixiviados en el drenaje por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Fuente de variación	GL	N	P	K	Ca	Mg
Repetición	2	0.16*	0.003	4.65*	8.84*	4.01*
Formulación	5	0.62*	0.009*	11.19*	2.82*	3.98*
Error a	10	0.05	0.002	0.97	1.48	0.62*
Condición	1	0.23*	0.017*	11.22*	1.17	1.36*
FormulaciónXCondición	5	0.13	0.01*	0.85	1.68	0.60*
Error b	12	0.03	0.001	0.81	0.85	0.17
r <sup>2</sup>		0.92	0.88	0.9	0.84	0.94
CV (%)		28.2	73.4	25.2	18.3	12.6

\*: Significativo P=0.05. GL: grados de libertad. CV: coeficiente de variación. Condición: acolchado plástico y sin acolchar.

Cabe señalar que existe la posibilidad de que la arena de tezontle no sea del todo inerte y contribuya con aportaciones de calcio, magnesio y potasio en los drenajes. Para averiguarlo habría que realizar los análisis químicos adecuados.

**Cuadro 44. Comparación de medias de macronutrientes lixiviados en el drenaje por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Formulación	N	P	K	Ca	Mg
Convencional al 100 %	0.35 bc (3 %)	0.08 a (2 %)	3.95 abc (23 %)	5.36 a (31 %)	2.65 b (76 %)
Convencional al 80 %	0.83 ab (7 %)	0.08 a (3 %)	2.16 c (16 %)	5.08 a (37 %)	2.78 b (99 %)
Convencional variable	0.61 abc (4 %)	0.01 a (0 %)	2.25 c (15 %)	5.95 a (43 %)	3.28 ab (121 %)
Alternativa al 100 %	1.05 a (8 %)	0.03 a (1 %)	5.70 a (33 %)	5.10 a (29 %)	4.85 a (139 %)
Alternativa al 80 %	0.78 ab (7 %)	0.10 a (4 %)	4.35 ab (31 %)	4.76 a (34 %)	2.81 b (100 %)
Alternativa variable	0.18 c (1 %)	0.03 a (1 %)	3.00 bc (19 %)	3.88 a (28 %)	3.31 ab (123 %)
DMS	0.49	0.10	1.97	2.44	1.58

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa. Los valores entre paréntesis corresponden al porcentaje de

pérdidas respecto a lo aportado. Los macronutrientes lixiviados en el drenaje fueron calculados en gramos y en % respecto al total aplicado.

Si las cantidades anteriores se extrapolan a una hectárea/año (considerando una densidad de 10.6 plantas/m<sup>2</sup>) resultaría en las pérdidas estimadas en el Cuadro 45, mismas que pueden representar un gasto importante para el productor.

**Cuadro 45. Estimación de pérdida de macronutrientes por lixiviación en un cultivo de jitomate cultivado con dos formulaciones de solución nutritiva.**

Nutriente	Formulación convencional al 80 %	Formulación alternativa al 80 %
<b>N</b>	0.83 g planta <sup>-1</sup> 88 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 264 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	0.78 g planta <sup>-1</sup> 82 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 246 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
<b>P</b>	0.08 g planta <sup>-1</sup> 8 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 24 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	0.10 g planta <sup>-1</sup> 11 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 33 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
<b>K</b>	2.16 g planta <sup>-1</sup> 229 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 687 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	4.35 g planta <sup>-1</sup> 461 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 1,383 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
<b>Ca</b>	5.08 g planta <sup>-1</sup> 533 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 1,599 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	4.76 g planta <sup>-1</sup> 505 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 1,515 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
<b>Mg</b>	2.78 g planta <sup>-1</sup> 295 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 885 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	2.81 g planta <sup>-1</sup> 298 kg ha <sup>-1</sup> ciclo <sup>-1</sup> 894 kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>

En el caso de la comparación de lixiviados de macronutrientes entre condiciones (con y sin acolchado), existió mayor pérdida de N, P y K en el drenaje de la condición acolchada; caso contrario ocurrió con el Mg (Cuadro 46). En ambos casos estas diferencias fueron significativas. En calcio las pérdidas por lixiviación fueron similares para ambas condiciones.

**Cuadro 46. Comparación de medias de macronutrientes lixiviados en el drenaje por planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.**

Condición	N	P	K	Ca	Mg
Acolchado	0.71 a (5 %)	0.07 a (2 %)	4.12 a (26 %)	5.20 a (35 %)	3.08 b (102 %)
Sin acolchar	0.55 b (4 %)	0.03 b (1 %)	3.01 b (19 %)	4.84 a (32 %)	3.47 a (155 %)
DMS	0.13	0.02	0.65	0.67	0.30

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $P=0.05$ ). DMS: Diferencia Mínima Significativa. Los valores entre paréntesis corresponden al porcentaje de pérdidas respecto a lo aportado. Los macronutrientes lixiviados en el drenaje fueron calculados en gramos y en % respecto al total aplicado.

La cantidad o concentración de elementos lixiviados puede variar debido a la cantidad de nutrientes aportada, tipo de sustrato, régimen de irrigación, variedad, densidad de plantación, temperatura y fertilizantes empleados, etc. De acuerdo con Urrestarazu y García (1999), el contenido de iones en el drenaje de un sistema abierto para jitomate es como sigue:  $1.3 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$ ,  $0.2 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $0.4 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{K}^+$ ,  $0.3 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $0.1 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{Mg}^{+2}$ . Si se toma en cuenta la cantidad reportada de la formulación convencional al 100 % (testigo) (en  $\text{mg L}^{-1}$ ) dividida entre el número de litros drenado totales, las cantidades drenadas son las siguientes:  $0.0029 \text{ g L}^{-1}$  de N,  $0.007 \text{ g L}^{-1}$  de P,  $0.26 \text{ g L}^{-1}$  de K,  $0.37 \text{ g L}^{-1}$  de Ca y  $0.19 \text{ g L}^{-1}$  de Mg. Aunque los datos son similares para Ca y Mg a lo reportado por Urrestarazu y García (1999), la comparación debe ser tomada con reserva ya que son muchas las variables que entran en juego.

En el caso de pérdida de macronutrientes por lixiviación respecto a la cantidad total aportada al sistema, las formulaciones alternativas presentaron los porcentajes mayores (Cuadro 47). Se observa que el orden y porcentaje de macronutrientes perdidos varía en los siguientes rangos: Mg (100 a 139 %) > K (19 a 33 %) > Ca (28 a 34 %) > N (1 a 8 %) > P (1 a 4 %), este orden y porcentajes son similares en algunos casos respecto al reportado por Pineda *et al.* (2011) en una evaluación en jitomate despuntado a tres racimos empleando tezontle como sustrato.

**Cuadro 47. Porcentaje de pérdida de macronutrientes lixiviados por planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Nutriente	Formulación	Aportado por la solución nutritiva (g)	Perdido en el lixiviado (g)	Perdido en el lixiviado respecto al total aportado (%)
<b>N</b>	Convencional 100 %	13.9	0.35	3
	Convencional 80 %	11.1	0.83	7
	Convencional variable	13.9	0.61	4
	Alternativa 100 %	13.9	1.05	8
	Alternativa 80 %	11.1	0.78	7
	Alternativa variable	13.9	0.18	1
<b>P</b>	Convencional 100 %	3.5	0.08	2
	Convencional 80 %	2.8	0.08	3
	Convencional variable	2.7	0.00	0
	Alternativa 100 %	3.5	0.03	1
	Alternativa 80 %	2.8	0.10	4
	Alternativa variable	2.7	0.03	1
<b>K</b>	Convencional 100 %	17.4	3.95	23
	Convencional 80 %	13.9	2.16	16
	Convencional variable	15.4	2.25	15
	Alternativa 100 %	17.4	5.70	33
	Alternativa 80 %	13.9	4.35	31
	Alternativa variable	15.4	3.00	19
<b>Ca</b>	Convencional 100 %	17.4	5.36	31
	Convencional 80 %	13.9	5.08	37
	Convencional variable	13.7	5.95	43
	Alternativa 100 %	17.4	5.10	29
	Alternativa 80 %	13.9	4.76	34
	Alternativa variable	13.7	3.88	28
<b>Mg</b>	Convencional 100 %	3.5	2.65	76
	Convencional 80 %	2.8	2.78	99
	Convencional variable	2.7	3.28	121
	Alternativa 100 %	3.5	4.85	139
	Alternativa 80 %	2.8	2.81	100
	Alternativa variable	2.7	3.31	123

En cuanto a la condición de acolchado y sin acolchar (Cuadro 48), de manera general se observa que el mayor porcentaje de pérdida se presentó bajo la condición acolchada; cabe destacar que existieron algunos porcentajes que rebasaron el 100 % como en el caso de Mg, estos excesos probablemente puedan ser atribuidos a aportaciones dadas por el sustrato.

**Cuadro 48. Porcentaje de pérdida de macronutrientes lixiviados por planta de jitomate cultivada en un ciclo de cultivo de 85 días de trasplante a fin de cosecha en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Nutriente	Condición	Aportado por la solución nutritiva (g)	Perdido en el lixiviado (g)	Perdido en el lixiviado respecto al total aportado (%)
<b>N</b>	Acolchado	12.9	0.71	5
	Sin acolchar	12.9	0.55	4
<b>P</b>	Acolchado	3	0.07	2
	Sin acolchar	3	0.03	1
<b>K</b>	Acolchado	15.5	4.12	26
	Sin acolchar	15.5	3.01	19
<b>Ca</b>	Acolchado	15.0	5.20	35
	Sin acolchar	15.0	4.84	32
<b>Mg</b>	Acolchado	3	3.08	102
	Sin acolchar	3	3.47	155

En las Figura 10 y 11 están representadas las comparaciones de solución nutritiva y macronutrientes drenados a lo largo del ciclo de cultivo bajo la condición de acolchado y sin acolchar. En la semana 11 a 14 se observa la máxima cantidad drenada y por lo tanto de nutrientes perdidos. Desde el inicio hasta el final de la cosecha se observa una disminución en los lixiviados, este patrón coincide con la Figura 12 donde se observa un aumento en la conductividad eléctrica de la solución nutritiva del drenaje, con valores cercanos a 5.5 dS m<sup>-1</sup>.

De acuerdo con Sonneveld y Voogt (2009), la principal razón del cambio de pH es debida a la variación entre la absorción de cationes y aniones por el cultivo, la absorción de aniones libera de las raíces HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> u OH<sup>-</sup> y la de cationes libera H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>. Por otra parte, también los fertilizantes poseen un efecto residual en el pH, por lo que los sulfatos y el ácido fosfórico tienden a acidificar el medio (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

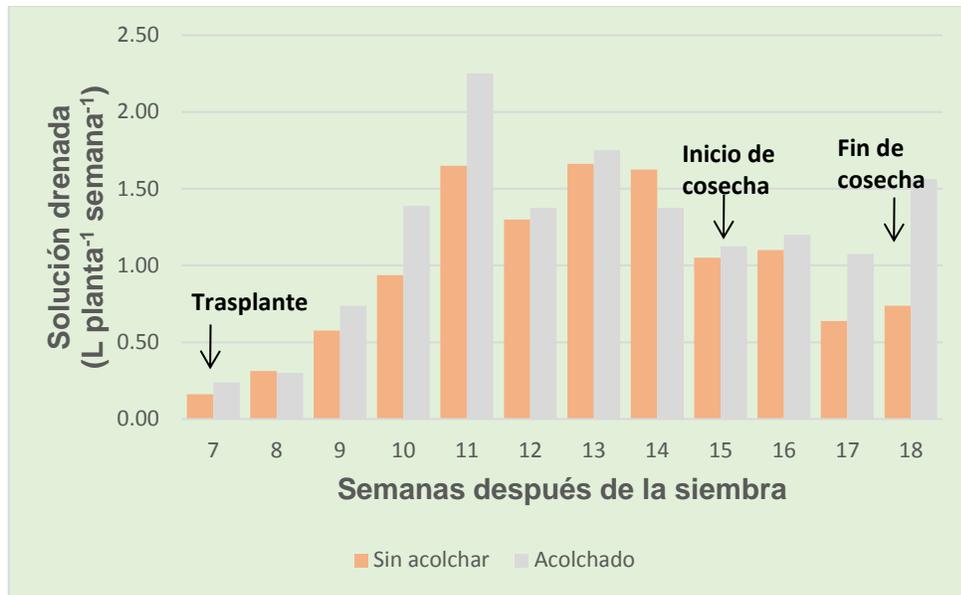


Figura 10. Solución nutritiva drenada promedio semanal por planta de jitomate cultivada con la formulación convencional al 100 % en condición acolchada y sin acolchar.

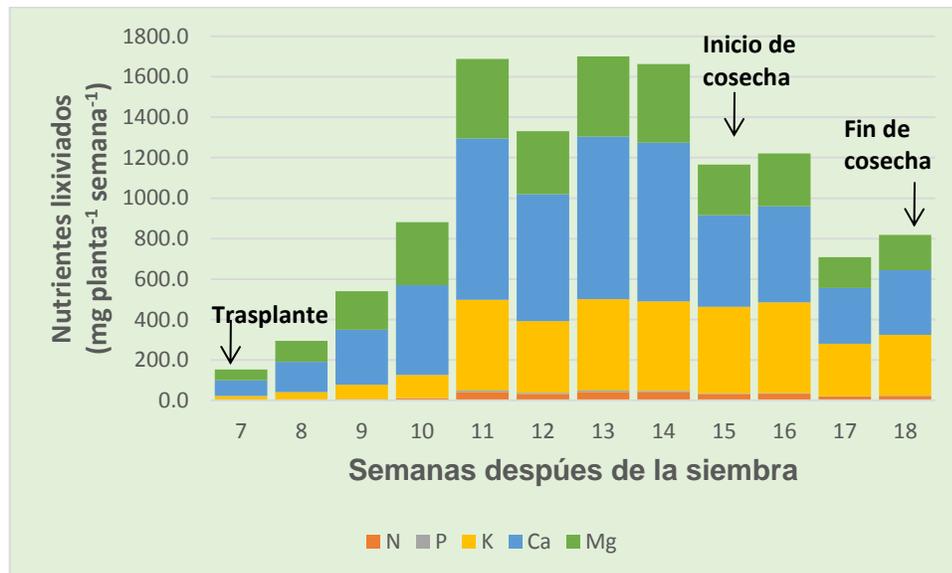
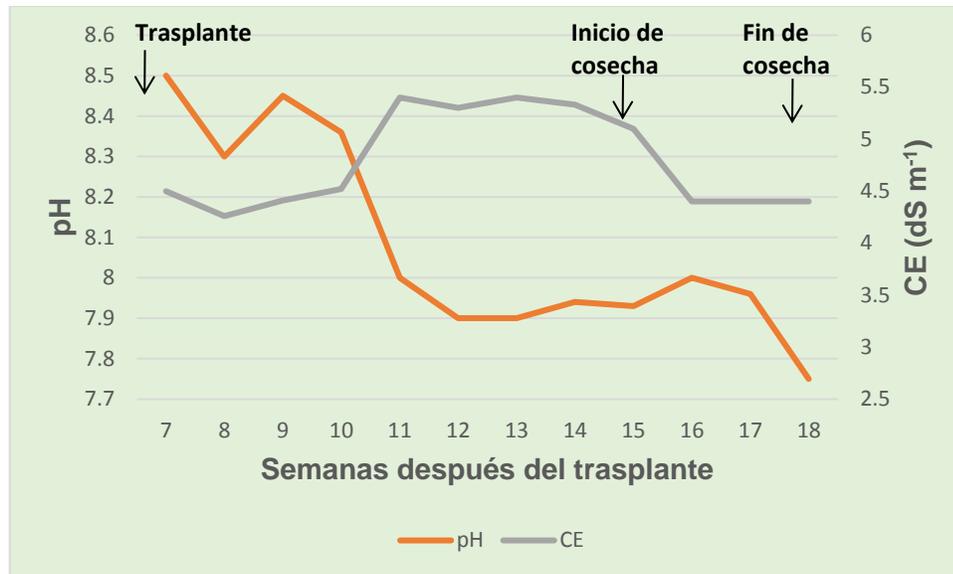


Figura 11. Nutrientes lixiviados promedio semanal por planta de jitomate cultivada con la formulación convencional al 100 % en condición sin acolchar.



**Figura 12. Variación del pH y CE de la solución nutritiva drenada en plantas de jitomate cultivadas con la formulación convencional al 100 % en condición sin acolchar.**

Una opción para aprovechar la cantidad de agua y, sobre todo, los nutrientes perdidos en el sistema, sería recirculando la solución nutritiva. Osuna (2011) al evaluar distintos sistemas hidropónicos cerrados y abiertos en jitomate, destaca que en un sistema con recirculación de solución nutritiva se puede lograr un ahorro superior al 30 % de agua y 40 % de  $\text{NO}_3^-$ , P, K y Ca comparado con un sistema sin recirculación.

### 3.3.5.3. Macronutrientes resolubilizados en el sustrato

De los macronutrientes que quedan retenidos en el sustrato, una fracción puede quedar precipitada formando sales y otra puede quedar adsorbida en el mismo, de estos, una parte puede ser resolubilizada por medio de un extracto de solución acuosa; por motivos prácticos, esta fue la fracción que se cuantificó en este estudio.

El análisis de varianza de los macronutrientes del sustrato que fueron resolubilizados, muestra que existen diferencias significativas entre las formulaciones para todos los nutrientes; también hubo diferencias significativas

entre las condiciones de acolchado y sin acolchado plástico, para N, P y K (Cuadro 49).

**Cuadro 49. Cuadrados medios y significancia estadística de macronutrientes resolubilizados del sustrato calculados por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Fuente de variación	GL	N	P	K	Ca	Mg
Repetición	2	0.005	0.0001	0.001	0.07	0.01
Formulación	5	0.22*	0.001*	0.88*	1.76*	3.71*
Error a	10	0.002	0.0006	0.06	0.11	0.03
Condición	1	0.05*	0.001*	0.84*	0.56	0.10
FormulaciónXCondición	5	0.09*	0.0006*	0.10	0.42	0.19
Error b	12	0.005	0.0004	0.09	0.39	0.13
CV (%)		14.6	14.8	14.7	23.6	22.7

\*: Significativo P=0.05. GL: grados de libertad. CV: coeficiente de variación. Condición: acolchado plástico y sin acolchar.

De acuerdo con las comparaciones de medias del Cuadro 50, de manera general las cantidades de N, K, Ca y Mg resolubilizadas en el sustrato regado con las formulaciones convencionales de solución nutritiva fueron menores que las de las formulaciones alternativas. Savvas *et al.* (2009) sostienen que puede existir acumulación de los iones o radicales menos consumidos por la planta como  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  sobre todo cuando hay presencia de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en el agua de riego. En el caso de las formulaciones alternativas es posible que un mayor porcentaje de los nutrientes se quedaran precipitados o adsorbidos en el sustrato debido a la baja solubilidad de las fuentes empleadas y por lo tanto no lograron solubilizarse.

En el caso de P, el sustrato regado con la formulación convencional al 80 %, fue el que tuvo la mayor cantidad de P resolubilizado, y la formulación alternativa al 80 % la menor. Quizá el contenido de P en el sustrato fue menor debido a que se disolvió poco y quizá no fue liberado de manera adecuada en la rizósfera.

**Cuadro 50. Comparación de medias de macronutrientes resolubilizados del sustrato calculadas en gramos por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Formulación	N	P	K	Ca	Mg
Convencional al 100 %	0.52 b	0.04 bc	2.43 ab	3.03 ab	0.93 bc
Convencional al 80 %	0.29 c	0.06 a	1.70 c	1.98 d	0.68 c
Convencional variable	0.31 c	0.05 abc	2.20 abc	2.45 bcd	1.13 b
Alternativa al 100 %	0.44 b	0.05 abc	2.66 a	2.16 cd	2.46 a
Alternativa al 80 %	0.49 b	0.02 d	1.75 c	2.80 abc	2.26 a
Alternativa variable	0.83 a	0.03 cd	1.96 bc	3.41 a	2.23 a
DMS	0.10	0.01	0.50	0.68	0.38

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.

De acuerdo con Ansorena (1994), puede ocurrir acumulación de sales en el sustrato por varios motivos: a) Por la aplicación de fertilizantes poco solubles o de liberación lenta, b) Cuando la cantidad de fertilizante aplicado en el fertirriego es superior al consumo de la planta, c) Cuando hay poco sobre-riego para lavar el exceso de sales menos consumidas por la planta, d) Cuando el sustrato tiene alta capacidad de adsorber iones y de liberarlos más tarde en el cultivo como el caso de las turbas.

Es posible que, en el riego por goteo aplicado en contenedores, como las camas, que exponen mucha superficie de sustrato a la evaporación, los goteros dejen áreas secas circundando a los bulbos de mojado donde ocurre precipitación de sales por evaporación de la solución nutritiva; son sales que posiblemente se acumulan a lo largo del ciclo de cultivo, pues como no se moja el sustrato por arriba de estas superficies, no hay resolubilización de las mismas.

Las cantidades de macronutrientes en el sustrato al final de ciclo de cultivo en ocasiones pueden ser modificadas por aportes debidos a la constitución química particular del sustrato. En el caso de la arena de tezontle, a pesar de que se considera un material inerte debido a que presenta una CE muy baja (del orden de 0.15 dS m<sup>-1</sup>), Trejo-Téllez *et al.* (2013), indican que suele presentar variaciones en su contenido de nutrientes dependiendo de su origen. De acuerdo

con un estudio de Saldaña (2017), el contenido de nutrientes solubles del extracto de saturación de un tezontle nuevo con características similares a las de este estudio fue de: 42 mg L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 0 mg L<sup>-1</sup> de P, 186 mg L<sup>-1</sup> de K, 99 mg L<sup>-1</sup> de Ca y 72 mg L<sup>-1</sup> de Mg, aunque el autor atribuye estas cantidades a una posible contaminación del sustrato. Por otra parte, Burés (1997) reporta cantidades de 6 mg L<sup>-1</sup> de N, 9 mg L<sup>-1</sup> de P, 52 mg L<sup>-1</sup> de K, 330 mg L<sup>-1</sup> de Ca y 24 mg L<sup>-1</sup> de Mg en un tezontle nuevo.

En el caso del presente trabajo no se realizó un análisis del extracto de saturación del tezontle nuevo, antes de iniciar el ciclo de cultivo. Para futuros estudios de balance de nutrientes, semejantes al aquí realizado, se considera muy importante conocer las posibles aportaciones que puede hacer el sustrato.

Respecto a la comparación entre las condiciones de acolchado y no acolchado, se encontró un efecto significativo, en donde las cantidades de N, P y K resolubilizadas del sustrato en la condición acolchada fueron menores en comparación a las de la condición sin acolchar (Cuadro 51).

**Cuadro 51. Comparación de medias de macronutrientes resolubilizados en el sustrato calculadas en gramos por planta de jitomate en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, en dos condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.**

Condición	N	P	K	Ca	Mg
Acolchado	0.44 b	0.04 b	1.96 b	2.51 a	1.56 a
Sin acolchar	0.52 a	0.05 a	2.27 a	2.76 a	1.67 a
DMS	0.05	0.005	0.22	0.45	0.26

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia Mínima Significativa.

La energía con la que un catión es retenido en la superficie de un coloide depende varios factores como el radio iónico, la valencia, la distancia entre cargas y la naturaleza del coloide (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013), considerando esta energía, el orden de retención sería: Ca<sup>++</sup> > Mg<sup>++</sup> > K<sup>+</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, quizá esto influyó para que las cantidades de Ca y Mg resolubilizadas en el sustrato en ambas condiciones fueran similares.

De acuerdo con Tscheschke *et al.* (1974) y Atherton y Rudich (1986) la acumulación de sales ocurre cuando, en una zona dada de la superficie del sustrato el régimen de irrigación es menor que la cantidad de evaporación. Esta acumulación se da en la parte superior del medio de crecimiento debido a su precipitación por la evaporación del agua de la solución de la superficie (Argo y Biernbaum, 1995). El uso de acolchado produce una reducción significativa de la evaporación del agua en la superficie del suelo o sustrato, especialmente en sistemas donde se emplea riego por goteo, también reduce la acumulación de sales debido al efecto de capilaridad (FAO, 2013), propiciando una distribución más uniforme para los nutrientes entre las partículas del sustrato, permaneciendo más disponibles debido a las condiciones de mayor nivel de humedad en la rizósfera (Lamont, 1993); esto podría explicar la concentración mayor de nutrientes en el sustrato sin acolchar ya que a menor humedad existe mayor precipitación, sobre todo cuando existen riegos espaciados como en este estudio. Cuando existe un riego nuevo las sales solubles son las primeras en volverse a resolubilizar y por lo tanto ocupan el volumen de agua disponible y las menos solubles no se solubilizan como el caso de los sulfatos en las formulaciones alternativas como ocurrió posiblemente en este experimento.

Con el acolchado plástico ocurre que el agua evaporada en la superficie del sustrato se condensa en su cara inferior y desciende de nuevo al sustrato mojándolo uniformemente, lo que contribuye a resolubilizar sales precipitadas y arrastrarlas hacia dentro del sustrato, evitando que queden retenidas (Gutiérrez, 1985).

En el Cuadro 52 se muestran las cantidades de nutrientes del sustrato que fueron resolubilizadas respecto al total aportado con cada formulación de solución nutritiva. También se expresan como porcentajes de nutrientes resolubilizados en relación al total aportado.

**Cuadro 52. Cantidades y porcentajes de nutrientes resolubilizados del sustrato calculados por planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva.**

Nutriente	Formulación	Aportado en la solución nutritiva (g)	Resolubilizado en el sustrato (g)	Nutrientes resolubilizados respecto al total aportado (%)
<b>N</b>	Convencional 100 %	13.9	0.52	4
	Convencional 80 %	11.1	0.29	3
	Convencional variable	13.9	0.31	2
	Alternativa 100 %	13.9	0.44	3
	Alternativa 80 %	11.1	0.49	4
	Alternativa variable	13.9	0.52	4
<b>P</b>	Convencional 100 %	3.5	0.04	1
	Convencional 80 %	2.8	0.06	2
	Convencional variable	2.7	0.05	2
	Alternativa 100 %	3.5	0.05	1
	Alternativa 80 %	2.8	0.02	1
	Alternativa variable	2.7	0.03	1
<b>K</b>	Convencional 100 %	17.4	2.43	14
	Convencional 80 %	13.9	1.70	12
	Convencional variable	15.4	2.20	14
	Alternativa 100 %	17.4	2.66	15
	Alternativa 80 %	13.9	1.75	13
	Alternativa variable	15.4	1.96	13
<b>Ca</b>	Convencional 100 %	17.4	3.03	17
	Convencional 80 %	13.9	1.98	14
	Convencional variable	13.7	2.45	18
	Alternativa 100 %	17.4	2.16	12
	Alternativa 80 %	13.9	2.80	20
	Alternativa variable	13.7	3.41	25
<b>Mg</b>	Convencional 100 %	3.5	0.93	27
	Convencional 80 %	2.8	0.68	24
	Convencional variable	2.7	1.13	42
	Alternativa 100 %	3.5	2.46	70
	Alternativa 80 %	2.8	2.26	81
	Alternativa variable	2.7	2.23	83

Se observa que la resolubilización de N y P en el sustrato es mínima, pues no supera el 5 % de lo aportado con ninguna de las formulaciones probadas. Por otro lado, la resolubilización de K en el sustrato oscila entre el 12 y el 15 % de lo aportado y para Ca el porcentaje de resolubilización en el sustrato oscila entre 12 y 25 %. En todos estos casos el porcentaje de resolubilización es similar entre formulaciones convencionales y alternativas.

Lo más destacado fue el alto porcentaje de Mg aparentemente resolubilizado en el sustrato (desde 24 hasta 83 %) y su variación entre las distintas formulaciones. Los valores más bajos fueron para las soluciones convencionales, mientras que los más altos fueron para las alternativas, donde el porcentaje de resolubilización fue prácticamente el doble, alcanzando valores de hasta 83 % de lo aportado en todo el ciclo de cultivo. Sin embargo, no queda clara la causa de estas diferencias, por lo que se sugiere realizar un experimento expofeso.

Si se comparan las formulaciones al 80 % extrapolando la cantidad resolubilizada en el sustrato por hectárea por año, se tendría una diferencia importante de pérdidas al año que favorece económicamente a la formulación convencional (Cuadro 53).

**Cuadro 53. Extrapolación y comparación de las cantidades de nutrientes que fueron resolubilizados en el sustrato de un cultivo de jitomate con dos formulaciones.**

Nutriente	Formulación convencional al 80 %	Formulación alternativa al 80 %
<b>N</b>	0.29 g/planta 31 kg/ha/ciclo 93 kg/ha/año	0.49 g/planta 52 kg/ha/ciclo 156 kg/ha/año
<b>P</b>	0.06 g/planta 6 kg/ha/ciclo 18 kg/ha/año	0.02 g/planta 2 kg/ha/ciclo 6 kg/ha/año
<b>K</b>	1.70 g/planta 180 kg/ha/ciclo 540 kg/ha/año	1.75 g/planta 185 kg/ha/ciclo 555 kg/ha/año
<b>Ca</b>	1.98 g/planta 210 kg/ha/ciclo 630 kg/ha/año	2.8 g/planta 297 kg/ha/ciclo 891 kg/ha/año
<b>Mg</b>	0.68 g/planta 72 kg/ha/ciclo 216 kg/ha/año	2.26 g/planta 239 kg/ha/ciclo 717 kg/ha/año

En cuanto a la comparación de las condiciones de acolchado plástico y no acolchado, se aprecia que el porcentaje de resolubilización de nutrientes fue ligeramente menor en el sustrato manejado bajo acolchado (Cuadro 54), pero nuevamente cabe hacer la aclaración de que por las restricciones que se tuvieron en el diseño del experimento, el manejo de los riegos que se dio con el acolchado

no permite comparaciones confiables. Se sugiere un experimento con ese objetivo de comparación para tener datos confiables.

**Cuadro 54. Cantidades y porcentajes de nutrientes resolubilizados en el sustrato calculados por planta de jitomate cultivada en un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha, con distintas formulaciones de solución nutritiva en condiciones de acolchado y sin acolchar.**

Nutriente	Condición	Aportado en la solución nutritiva (g)	Resolubilizado en el sustrato (g)	Nutrientes resolubilizados respecto al total aportado (%)
<b>N</b>	Acolchado	12.9	0.44	3
	Sin acolchar	12.9	0.52	4
<b>P</b>	Acolchado	3	0.04	1
	Sin acolchar	3	0.05	2
<b>K</b>	Acolchado	15.5	1.96	13
	Sin acolchar	15.5	2.27	15
<b>Ca</b>	Acolchado	15	2.51	17
	Sin acolchar	15	2.76	18
<b>Mg</b>	Acolchado	3	1.56	52
	Sin acolchar	3	1.67	56

### 3.3.5.5. Balance final del sistema

En este apartado se agruparon las cantidades de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) de las secciones anteriores: nutrientes aportados con la solución nutritiva, absorbidos por la planta, lixiviados en el drenaje y resolubilizados en el sustrato, con el objetivo de explorar su balance final en los distintos componentes del sistema. Como ejemplo se consideró el análisis de la formulación convencional al 80 % por resultar la más ventajosa para el productor.

El balance final de los macronutrientes en el sistema es el resultado de la siguiente ecuación:

$$\text{Balance final en el sistema} = \text{Nutrientes aportados} - (\text{Nutrientes absorbidos por la planta} + \text{Nutrientes lixiviados} + \text{Nutrientes resolubilizados en el sustrato}).$$

A pesar de que los nutrientes aportados son en su mayoría provenientes de la solución nutritiva, también puede haber ciertas cantidades proporcionadas por el agua de riego o por el sustrato las cuales, de acuerdo al análisis de agua, están representadas en el Cuadro 55.

**Cuadro 55. Cantidad de macronutrientes aportados en 69 L de agua de riego para una planta de jitomate durante un ciclo de 85 días de trasplante a fin de cosecha.**

Nutriente	Análisis de agua (mg L <sup>-1</sup> )	Aportado con el riego (g)
<b>K</b>	7.8	0.54
<b>Ca</b>	27.8	1.91
<b>Mg</b>	14.7	1.01

Por otra parte, los nutrientes totales retenidos en el sustrato pueden estar de manera adsorbida o precipitada en forma de sales. Una parte de ellos puede recuperarse mediante resolubilización al poner un extracto de saturado o sobresaturado, otra parte no se puede recuperar con este método, pero se puede hacer una estimación por diferencia.

El método de resolubilización que se empleó en este estudio fue por medio de un extracto de saturación del tezontle con una cantidad conocida de agua, esto para intentar volver a solubilizar las sales retenidas durante todo el ciclo de cultivo para su estimación. Los resultados obtenidos del balance completo están representados en el Cuadro 56.

**Cuadro 56. Balance final de macronutrientes en un sistema de cultivo de jitomate durante un ciclo de cultivo de 85 días de trasplante a fin de cosecha cultivado con la formulación de solución nutritiva convencional al 80 %.**

Nutriente	Total aportado en la solución nutritiva	Absorbido por la planta	Lixiviado en el drenaje	Resolubilizado en el sustrato	Retenido en el sustrato (precipitado, adsorbido o perdido)
<b>N</b>	11.1 (100 %)	3.34 (30 %)	0.83 (7.4 %)	0.29 (2.6 %)	6.6 (60 %)
<b>P</b>	2.8 (100 %)	1.55 (55 %)	0.08 (3 %)	0.06 (2 %)	1.1 (40 %)
<b>*K</b>	14.4 (100 %)	6.7 (47 %)	2.16 (15 %)	1.7 (12 %)	3.84 (26 %)
<b>*Ca</b>	15.81 (100 %)	3.18 (20 %)	5.08 (32 %)	1.98 (12 %)	5.57 (36 %)
<b>*Mg</b>	3.8 (100 %)	1.26 (33 %)	2.78 (73 %)	0.68 (18 %)	0.92 (+24 %)

\* Para el análisis se consideraron las cantidades ya presentes de estos nutrientes en el agua de riego. El balance de macronutrientes fue calculado en g/planta y en % respecto al total aplicado.

### Nitrógeno

Del total del N aportado, alrededor del 30 % fue absorbido por la planta, 7.4 % se lixivió en el drenaje y 2.6 % fue resolubilizado del sustrato, lo que resulta en un 60 % de N que podría haber quedado retenido en el sustrato o ser perdido por volatilización.

Pineda *et al.* (2011) en un estudio similar en jitomate registraron porcentajes de absorción de N por la planta de 25 % a los 40 días después del trasplante (ddt), de 47 % a los 59 ddt y de 80 % a los 74 ddt, almacenado en el sustrato 1.9 % y 18 % perdido en el drenaje, esto durante el periodo de floración a inicio del cuajado de frutos. Por otra parte, Sonneveld y Voogt (2009) mencionan que un cultivo de jitomate en sustrato en invernadero con condiciones de libre drenaje la eficiencia puede ser de 57 %.

A pesar de que la eficiencia de absorción en este estudio fue menor a las reportadas por Pineda *et al.* (2011) y Sonneveld y Voogt (2009), esto puede estar

relacionado con el despunte de la planta por arriba del tercer racimo realizado a los 80 ddt ya que éste detiene el crecimiento de la planta y la absorción de nutrientes se reduce tal como mencionan Tanaka *et al.* (1974) y Terabayashi *et al.* (2004). Por otra parte, de acuerdo con Bock (1984) y Fageria (2009) hasta el 50 % del N que se pierde por medio de la aplicación de fertilizantes puede ser causado por lixiviación, desnitrificación o por volatilización de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NH}_3$ . De acuerdo con Raviv y Lieth, (2008) el  $\text{NO}_3^-$  posee baja afinidad a superficies cargadas positivamente por lo que no es afectado por reacciones de adsorción o precipitación en el sustrato.

En el caso de este estudio se puede considerar que haya ocurrido pérdida de N debido a alguna de las siguientes situaciones:

1) Por volatilización del nitrógeno presente en el sustrato. El N puede ser perdido en forma de gases, por volatilización de  $\text{NH}_3$  que se da cuando los fertilizantes son aplicados en la superficie, o las sales precipitadas afloran, especialmente en condiciones alcalinas sobre todo debido a temperaturas elevadas en el medio. Bajo condiciones anaeróbicas el nitrato puede ser reducido a formas de N volátil tal como  $\text{N}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$  (Mengel y Kirkby, 2001). También, de acuerdo con Van den Ende (1989a), Sonneveld y Voogt (2009) puede existir un porcentaje de N perdido por desnitrificación al tomar las muestras de sustrato después de estar secas al aire por un largo periodo de tiempo, tal como sucedió en este estudio.

2) Por medio de pérdidas de la planta. Cuando existen condiciones de estrés como altas temperaturas y la planta entra en fotorrespiración, existe una pérdida de  $\text{NH}_3$ , ya que este se produce durante la vía del glicolato, aunque se sugiere que parte de este  $\text{NH}_3$  puede ser reasimilado (Keys *et al.*, 1978, Mengel y Kirkby, 2001) puede representar pérdidas importantes en hojas senescentes que no pueden reasimilarlo (Mengel y Kirkby, 2001). Tanto el  $\text{NH}_3$  como el  $\text{SO}_2$  pueden ser liberados a la atmósfera por medio de los estomas (Marschner, 2012). Estas pérdidas pueden ocurrir durante todo el crecimiento del cultivo, también se ha reportado que la mayor volatilización ocurre durante la etapa reproductiva (Francis *et al.*, 1997).

3) Depositado en la raíz. Pineda *et al.* (2011) registraron que una gran cantidad de materia seca y nutrientes son acumulados durante el desarrollo vegetativo por la raíz, es posible que durante el muestreo en este estudio no se haya logrado recuperar la totalidad de la raíz y con ella cierta cantidad de N no cuantificado quedó atrapado en el sustrato.

4) No cuantificado en el sustrato. Como se mencionó en la sección de los macronutrientes retenidos en el tezontle, es posible que el extracto de saturación que se manejó no haya permitido disolver un alto porcentaje de sales que previamente fueron precipitadas en la capa superficial del tezontle debido a la intensa evaporación que ahí se produce y a cambios en el pH.

Es posible que en este estudio situaciones como las mencionadas ayuden a explicar, al menos parcialmente los resultados de la distribución del N en el sistema. Sin embargo, hay que realizar estudios más profundos encaminados a determinar el motivo de las bajas eficiencias de absorción, ya que de acuerdo a los porcentajes de N en cada uno de los componentes del sistema se puede destacar que existe una gran cantidad de N que se pierde en el sistema en un manejo normal del cultivo.

## **Fósforo**

Del total de P aportado al sistema, alrededor del 55 % fue absorbido por la planta, 3 % fue perdido en el drenaje y 2 % fue resolubilizado del sustrato, resultando en un 40 % de P que posiblemente quedó precipitado o adsorbido en el sustrato. De acuerdo con Pineda *et al.* (2011) durante el desarrollo vegetativo registraron 38 % absorbido por la planta, 54.8 % retenido en el sustrato y 6.8 % perdido en el drenaje.

Aunque en este estudio el porcentaje de absorción por la planta fue mayor al reportado por Pineda *et al.* (2011), existe 40 % de P posiblemente fijado o adsorbido al sustrato y que no se resolubilizó con la metodología del extracto de saturación manejada. Silber *et al.* (1999) comentan que el tezontle posee

capacidad buffer por lo que puede absorber o liberar nutrientes especialmente P durante el periodo de crecimiento, por otra parte, el P también puede reducir su disponibilidad con cambios de pH (Heuvelink y Dorais, 2005).

### **Potasio**

El porcentaje de K absorbido por la planta fue 47 % en relación al aplicado; 15 % se perdió en el drenaje y 12 % se fue resolubilizado del sustrato, resultando en un 26 % de K que posiblemente quedó precipitado o adsorbido en el sustrato. De acuerdo con Pineda *et al.* (2011), registraron 39.3 % absorbido por la planta, 35.1 % retenido en el sustrato y 25.5 % perdido en el drenaje. Es posible que las cantidades faltantes en este estudio estén relacionadas, al igual que para otros iones, al método de extracción del laboratorio o a pérdidas relacionadas con el manejo del riego.

### **Calcio**

De la cantidad total de Ca aportada al sistema, el 20 % fue absorbido por la planta, 32 % lixiviado en el drenaje y 12 % fue resolubilizado del sustrato, resultando en un 36 % de Ca que posiblemente quedó precipitado o adsorbido en el sustrato. Es probable que el Ca haya reaccionado junto con el P y el S y haya precipitado y que una buena parte no se logró solubilizar en el extracto de saturación. Pineda *et al.* (2011), registraron 24.3 % absorbido por la planta, 38.8 % retenido en el sustrato y 36.8 % perdido en el drenaje.

### **Magnesio**

El porcentaje de Mg absorbido por la planta en relación al total aportado fue 33 %; aparentemente 73 % se perdió en el drenaje y 18 % se resolubilizó del sustrato, resultando en 24 % de Mg de más dentro del sistema que posiblemente quedó precipitado o adsorbido en el sustrato. Es probable que este magnesio presente extra se deba a contribuciones provenientes del tezontle usado como sustrato y también a aportaciones del agua de riego, ya que su análisis reporta

14.7 mg L<sup>-1</sup> de Mg que en 69 litros gastados por planta corresponden a 1.01 g de Mg aportados por cada planta presente.

Por otra parte, el tezontle de acuerdo a su origen está constituido principalmente por Si y Al y en menor medida de Fe, Mn, Ca y Mg, el tezontle rojo a diferencia del amarillo y del negro posee un intemperismo intermedio (Raviv y Lieth, 2008), debido a su forma amorfa posee superficies de cargas permanentes y variables, también posee capacidad buffer por lo que puede absorber o liberar nutrientes (Silber *et al.*, 1999) aunado a lo anterior, su CIC es dependiente del pH y puede aumentar al aumentar el pH (Silber *et al.*, 1994), es probable que esto pueda explicar en parte el alto contenido de Mg en el sistema.

### **3.3.6. Eficiencia de absorción de agua y nutrientes**

En este apartado se analizó la eficiencia de absorción de agua (EAA), la eficiencia de absorción de nutrientes (EAN), así como la eficiencia del uso de agua (EUA) para producir 1 kg de fruto de jitomate, para lo cual se usó la formulación convencional al 80 % en condiciones sin acolchar y con acolchado plástico.

La importancia de los índices de eficiencia radica en que la EAA y EAN pueden ser usados como indicativos del comportamiento de las plantas cuando están sometidas a condiciones de estrés y esto a su vez se refleja en el rendimiento (Cunha-Chiamolera *et al.*, 2017). Por otra parte, la EUA puede ser usada para monitorear y comparar diferentes sistemas de crecimiento de las plantas como sistemas abiertos o con recirculación de solución nutritiva (sistemas hidropónicos cerrados) (Meric *et al.*, 2011).

#### **Eficiencia de absorción de agua (EAA):**

Considerando la cantidad de agua absorbida por la planta durante todo el ciclo de cultivo de 56 L/planta en promedio de la condición sin acolchar y con acolchado plástico (69 L aportados – 13 L drenados) y el rendimiento obtenido en la formulación convencional al 80 % fue de 2.11 kg/planta, la eficiencia de absorción resultó en 26 litros absorbidos por kg de fruto producido (Cuadro 58).

De acuerdo con Stanghellini *et al.* (2003) y Heuvelink y Dorais (2005) para producir 1 kg de fruto se requieren aproximadamente 60 L de irrigación en Israel, 40 L en un invernadero de plástico sin calefacción en España, 22 L en un invernadero de clima controlado en Holanda y 15 L cuando la solución nutritiva es reutilizada (sistema cerrado), la eficiencia obtenida en este estudio se encuentra dentro del rango reportado por Heuvelink y Dorais (2005) para condiciones similares del experimento.

**Eficiencia de absorción de nutrientes (EAN):**

La EAN, es resultado de la relación de nutrientes absorbidos por la planta / rendimiento obtenido, de tal manera que, para producir 1 kg de jitomate, las plantas necesitan absorber: 1.58 g de N, 0.73 g de P, 2.93 g de K, 1.42 g de Ca y 0.57 g de Mg en condiciones sin acolchar (Cuadro 58). Si se comparan estos resultados con las cantidades indicadas por los autores del Cuadro 57, se puede observar que las eficiencias obtenidas en este estudio se encuentran dentro del rango reportado en la literatura.

En cuanto al uso de acolchado, se puede observar una diferencia promedio de 12 % menor en las eficiencias de K, Ca y Mg de la condición acolchada.

**Cuadro 57. Gramos necesarios de macronutrientes absorbidos por las plantas de jitomate para producir 1 kg de fruto de acuerdo con varios autores.**

Nutriente	Heuvelink y Dorais (2005)	Cerdas (1988)	Quesada-Roldán y Bertsch-Hernández (2013)	Formulación convencional 80 %
<b>Nitrógeno</b>	2 - 6	2.96	3.22	1.58
<b>Fósforo</b>	0.43 - 0.86	0.57	0.24	0.73
<b>Potasio</b>	5 - 8.3	5.2	4.7	2.93
<b>Calcio</b>	-	2.5	2.25	1.42
<b>Magnesio</b>	1.74	0.98	0.58	0.57

### **Eficiencia en el uso de agua (EUA):**

En cuanto a la EUA, la cual consiste en la relación del agua aportada al sistema / rendimiento obtenido, considerando el aporte de agua total (69 L/planta) y el rendimiento (2.11 kg/planta), la eficiencia resulta en 32 litros gastados por kg de fruto obtenido (Cuadro 58). Cunha-Chiamolera *et al.* (2017) reportan una eficiencia de uso de agua de 20 L/kg de fruto, (eficiencia fue 40 % mayor). De acuerdo con Colla *et al.* (2005). La eficiencia en el uso de agua en un cultivo sin suelo está relacionada con las propiedades físicas del sustrato, en particular con el contenido de agua fácilmente disponible, quizá la menor eficiencia de este estudio se deba al tipo de sustrato usado. Cunha-Chiamolera *et al.* (2017) emplearon fibra de coco la cual retiene más humedad que el tezontle, por lo tanto, la disponibilidad de agua para la planta es mayor y el cultivo demanda menos aporte.

Según Baille (2001) la EUA se puede modificar al incrementar la eficiencia de transpiración, al reducir la evapotranspiración por medio de acolchado que reduzca el área de evaporación, al reducir la cantidad de drenaje perdido o reciclando la solución nutritiva entre otras. De acuerdo con Zribi *et al.* (2015), el acolchado puede incrementar la EUA entre 20 y 60 %, en este estudio no fue sobresaliente el uso del acolchado debido a las limitantes del experimento que diluyeron su efecto.

**Cuadro 58. Eficiencia de absorción de agua, nutrientes y eficiencia en el uso de agua para producir 1 kg de fruto de jitomate en un sistema cultivado con la formulación de solución nutritiva convencional al 80 % en condiciones de acolchado plástico y sin acolchar.**

Índice o macronutriente	Condición	Eficiencia
<b>Eficiencia de absorción de agua</b>	Acolchado	26 L
	Sin acolchar	27 L
<b>Eficiencia en el uso de agua</b>	Acolchado	32 L
	Sin acolchar	32 L
<b>Nitrógeno</b>	Acolchado	1.58 g
	Sin acolchar	1.58 g
<b>Fósforo</b>	Acolchado	0.66 g
	Sin acolchar	0.73 g
<b>Potasio</b>	Acolchado	3.41 g
	Sin acolchar	2.93 g
<b>Calcio</b>	Acolchado	1.67 g
	Sin acolchar	1.42 g
<b>Magnesio</b>	Acolchado	0.62 g
	Sin acolchar	0.57 g

Los resultados son el promedio de tres repeticiones.

### 3.4. Conclusiones

Bajo las condiciones en que se efectuó la presente investigación las principales conclusiones que se pueden derivar son las siguientes:

1. No hubo efectos significativos en las variables morfológicas ni en el crecimiento de las plantas por el uso de soluciones nutritivas con fuentes alternativas de fertilizantes que proporcionan la misma concentración de nutrientes en la solución. Tampoco los hubo por reducir la concentración del 100 al 80 % usando las mismas fuentes fertilizantes.
2. La formulación de solución nutritiva con fuentes alternativas promovió la aparición del desorden fisiológico conocido como pudrición basal del fruto, lo que disminuyó en cuatro el número de frutos comerciables por planta y el rendimiento comercial por planta en aproximadamente 400 g.
3. Las formulaciones al 80 % de la concentración normalmente usada rindieron igual que sus correspondientes al 100 %, lo que significa un posible ahorro para el productor de 20 % en los costos de fertilizantes a escala comercial.
4. No se encontraron diferencias en rendimiento o alguno de sus componentes por el uso del acolchado.
5. En general, las formulaciones que se hicieron variar en función de etapas fenológicas no mostraron un ahorro significativo de fertilizantes ni un impacto de magnitud estadística en rendimiento por planta o tamaño de fruto sobre la solución testigo correspondiente al 100 %.
6. Bajo las condiciones del presente experimento el acolchado apenas representó un ahorro del 5 al 7 % en fertilizantes.
7. La solución nutritiva convencional al 80 % de la concentración normal fue la que resultó más rentable desde el punto de vista económico ya que produjo el mismo rendimiento y calidad de fruto que la convencional al 100 %, pero con un ahorro de 20 % en fertilizantes.
8. En la solución nutritiva convencional al 80 % las eficiencias de absorción respecto al total aportado a lo largo de 85 días que duró el ciclo de cultivo de trasplante a fin de cosecha fueron: N = 30 %, P = 55 %, K = 47 %, Ca = 20 %

y Mg = 33 %. Cabe señalar que estas eficiencias se consideran bajas para un sistema hidropónico, aunque no se recircule la solución nutritiva lixiviada, como en el presente caso.

9. Las eficiencias de absorción con las formulaciones alternativas fueron más bajas para calcio y magnesio respecto a las formulaciones convencionales, lo que aporta elementos para justificar la aparición de frutos con pudrición basal en las plantas irrigadas con estas últimas.
10. Los porcentajes de nitrógeno y fósforo lixiviados en el drenaje fueron muy bajos (menores al 8 % del total aportado) en todas las formulaciones probadas; no fue así para potasio y calcio que alcanzaron 25 y 35 %, respectivamente, pero el magnesio alcanzó casi el 80 %, lo que se explica por aportaciones de este elemento en el agua de riego y, sobre todo, por aportaciones provenientes del sustrato original.
11. Una alta proporción de nutrientes aportados por las soluciones con las que se irrigaban las plantas, quedaron retenidos en el sustrato, bajando la eficiencia del sistema hidropónico en el uso de los fertilizantes.
12. A pesar de la reducción en la concentración de la solución nutritiva, las eficiencias de rendimiento en relación a los litros de agua y nutrientes absorbidos por kg de fruto producido están dentro de los rangos reportados para cultivos hidropónicos.

### **3.5. Consideraciones finales**

1. De los resultados obtenidos con la formulación convencional al 80 % se tienen elementos para sostener la hipótesis de que es posible reducir la concentración de nutrientes de la solución convencionalmente usada en un 20 % sin afectar el comportamiento agronómico, el rendimiento y la calidad de los frutos de jitomate. Esto significa un ahorro muy importante para el productor ya que puede alcanzar hasta de \$100,000 pesos de ahorro por hectárea al año.
2. La hipótesis de que, con el uso de una solución alternativa de menos costo, conteniendo la misma concentración de nutrientes que una solución convencional se puede lograr un comportamiento agronómico, rendimiento y calidad de fruto similar no pudo demostrarse por los problemas que se tuvieron en relación a la aparición de frutos con pudrición basal debido a limitaciones en la absorción de calcio. En futuras investigaciones se recomienda sustituir las fuentes alternativas de superfosfato simple y fosfonitrato de amonio por nitrato de calcio y fosfato monoamónico en la formulación alternativa. Esto puede elevar el costo de la solución nutritiva, pero seguirá siendo más económica que la formulación convencional con un impacto económico favorable al productor.
3. Dado que en el presente experimento la forma en que se arregló la infraestructura del riego para los tratamientos, afectó el logro de una valoración objetiva de la hipótesis planteada en el sentido de que el acolchado proporciona un ahorro significativo de solución nutritiva para la producción de jitomate en invernadero, se recomienda diseñar correctamente un experimento donde sea posible manipular los riegos por separado para la condición de acolchado y sin acolchar, esto para tener un mejor control de los tratamientos.
4. Se recomienda hacer un experimento expofeso donde se realice un análisis de nutrientes de tezontle nuevo o ya reciclado y lavado, así como del agua de riego para conocer detalladamente las posibles cantidades de nutrientes que pueden ser aportadas por estos componentes del sistema hidropónico.

5. En función de las bajas eficiencias de absorción en relación a lo aportado en el ciclo de cultivo y de las altas tasas de retención de nutrientes por el sustrato se hace necesaria la realización de estudios encaminados a determinar las causas de estos fenómenos y definir estrategias de manejo (entre ellas el acolchado manejado de manera correcta) para recuperar en el sistema, al menos una parte de estos nutrientes retenidos y buscar incrementar así la eficiencia de absorción.

### 3.6. Literatura citada

- Abad B. M., C. Carrión B. y P. Noguera M. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: Tratado de Cultivo Sin Suelo. Ediciones Mundi-Prensa. pp:113-158.
- Abad B. M., P. Noguera M. y C. Carrión B. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. En Cadahia C. (Ed.). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 299-354.
- Adams P. 1986. Mineral nutrition. *In: The Tomato Crop*. Eds. Atherton, J. G. y Rudich, J. Chapman y Hall, London. pp: 281-334.
- Adams P. 2004. Aspectos del manejo de los diferentes sustratos, su comparación, elección y factores medioambientales a considerar. pp: 239-262. En: Tratado de Cultivos sin Suelo. Urrestarazu G., M. (Ed.). 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. 914 p.
- Adams P. 1989. Some effects of root temperature on the growth and nutrient uptake of tomatoes in NFT. *In: ISOSC Proceedings*. pp: 73-82.
- Alcántar González G. y L. I. Trejo-Téllez. 2013. Nutrición de cultivos. Editorial del Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. México. 454 p.
- Alcántar González G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. México. 156 p.
- AMHPAC, Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A.C. 2017. <<https://www.amhpac.org/es/index.php/component/content/article/9-uncategorised/926-crece-43-agricultura-protegida-en-mexico>>. Consultado el 13 de diciembre de 2018.
- Ansorena M. J. 1994. *Sustratos. Propiedades y caracterización*. España, Madrid. Mundi-Prensa. 172 p.
- Argo R. W. and A. J. Biernbaum. 1995. The effect of irrigation method, water-soluble fertilization, preplant nutrient charge, and surface evaporation on early vegetative and root growth of poinsettia. *Journal of the American Society of Horticultural Sciences*, 120:163-169.
- Armenta-Bojórquez, A.D., G. A. Baca-Castillo, G. Alcántar-González, J. Kohashi-Shibata, J. G. Valenzuela Ureta y A. Martínez-Garza. 2001. Relaciones de nitratos y potasio en fertirriego sobre la producción, calidad y absorción nutrimental de tomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 7:61-75.
- Asher C. J. and D. G. Edwards. 1983. Modern solution culture methods. *In A. Lauchlin and R. L. Bielecki. Encyclopedia of Plant Physiology New Series*, Vol. 15. Inorganic Plant Nutrition. Springer. Berlin. pp: 94-119.
- Atherton J. G. and J. Rudich. 1986. *The Tomato Crop, a scientific basis for improvement*. Chapman and Hall. New York. 661 p.
- Baca Castillo G. A. de J., E. Rodríguez Cruz. y A. Quevedo Nolasco. 2016. La solución nutritiva en hidroponía. Editado por los autores. Texcoco, Edo de México. 208 p.
- Baille M. 2001. Water management in soilless cultivation in relation to inside and outside climatic conditions and type of substrate. *Italus Hortus*, 8:16-22.

- Bastida T. A. 2002. Sustratos Hidropónicos. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México. 72 p.
- Bertsch F. 2009. Absorción de nutrimentos por los cultivos. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 206 p.
- Biran I. and A. Eliassaf. 1980. The effect of container size and aeration conditions on growth of roots and canopy of Woody plants. *Scientia Horticulturae*, 12:385-394.
- Bock B. R. 1984. Efficient use of nitrogen in cropping systems. *In: Nitrogen in crop production*, R. D. Hauck (Ed.) pp:273-294.
- Boyer J. S. 1985. Water transport. *Annual Review of Plant Physiology*, 36:473-516.
- Bugarín-Montoya R., A. Galvis-Spinola, P. Sánchez-García y D. García-Paredes. 2002. Acumulación diaria de materia seca y de potasio en la biomasa aérea total de tomate. *Terra*, 20:401-409.
- Bunt A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hayman Ltd London, England. 309 p.
- Burés S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas. Madrid, España. 342 p.
- Burgueño H., F. Uribe. y M. Valenzuela. 1994. La Fertigación en cultivos hortícolas con acochado plástico. Extracción de nutrientes por los cultivos de Tomate y Bell Pepper en el Valle de Culiacán, Sin. Culiacán, Sinaloa. México. 42 p.
- Burman R. and L. O. Pochov. 1994. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Elsevier, Nueva York. 278 p.
- Camacho F. F. 2003. Técnicas de producción en cultivos protegidos. Editado por Caja Rural Intermediterranea, Cajamar. Almería. Tomo 1. 776 p.
- Cancino B. j., F. Sánchez del C. y P. Espinoza R. 2001. Efecto del despunte y densidad de población en dos variedades de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en hidroponia bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 26:73-74.
- Canovas M. F. 2001. Manejo del cultivo sin suelo. En: El cultivo del tomate. Ediciones Mundi-Prensa. pp: 43-91.
- Cerdas J. C. 1988. Análisis de crecimiento y de la absorción de nutrimentos en tomate (*Lycopersicum esculentum*) en Alajuela San José, escuela de Fitotecnia. 130 p.
- Challa H. and M. J. Bakker. 1999. Potential production within the greenhouse environment. *In Ecosystems in the world. Vol 20. Chapter 15: Greenhouse Ecosystems*. pp: 333-348.
- Chapman H. D. y P. E. Pratt. 1973. Métodos de análisis de suelos, plantas y agua. Traducido al español por Contin, A. Editorial Trillas. México, D.F. 195 p.
- Colla G. Y. R., M. Cardarelli, S. Fanasca, A. Salerno, C. M. Rivera, E. Rea and F. Karam. 2005. Water Use Efficiency of Greenhouse Summer Squash in Relation to the Method of Culture: Soil vs Soilless. *Acta Horticulturae*, 697: 81-86.
- Cornillon P. 1987. Influence de la température des racines sur le comportement du chrysanthème et du gerbera. *Revue Horticole*, 207:11-14.
- Cruz Crespo E., M. Sandoval Villa, V. H. Volke Haller, A. Can Chulim y J. Sánchez Escudero. 2012. Efecto de mezclas de sustratos y concentración de la

- solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de tomate. *Revista mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3:1361-1373.
- Cunha-Chiamolera T. P. L., M. Urrestarazu, A. B. Cecílio Filho and I. Morales. 2017. Agronomic and Economic Feasibility of Tomato and Lettuce Intercropping in a Soilless System as a Function of the Electrical Conductivity of the Nutrient Solution. *HortScience*, 52:1195-1200.
- De Boodt M. O. Verdonck and I. Cappaert. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37:2054-2062.
- De Rijck G. and E. Schrevens. 1997. Elemental bioavailability in nutrient solutions in relation to dissociation reactions. *Journal of Plant Nutrition*, 20:901-910.
- Díaz S. T., E. Espi G., A. Fontecha R., J. Jiménez G., J. López G. y A. Salmerón C. 2001. Madrid, España. Los filmes plásticos en la producción agrícola. pp: 275-283.
- Díaz-Pérez J. C. and K. Dean Batal. 2002. Colored Plastic Film Mulches Affect Tomato Growth and Yield Via Changes in Root-zone Temperature. *Journal of the American Society of Horticultural Sciences*, 127:127-136.
- Epstein E. and A. J. Bloom. 2005. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. Segunda edición. Sinauer Associates Inc. Sunderland, Massachusetts. 400 p.
- Fageria N. K. 2009. The Use of Nutrients in Crop Plants. CRC Press. Boca Ratón. Florida. 439 p.
- Farina E., C. Allera, T. Paterniani and M. Palagi. 2003. Mulching as a Technique to Reduce Salt Accumulation in Soilless Culture. *Acta Horticulturae*, 609:459-466.
- Fayad J., P. Fontes, A. Cardoso, F. Finger y F. Ferreira. 2002. Absorção de nutrientes pelo tomateiro cultivado sob condições de campo e de ambiente protegido. *Horticultura Brasileira*, 20:90-94.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). 2016. Panorama Agroalimentario. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. 35 p.
- Flores Coello J. S. 2016. Análisis de crecimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tres concentraciones de la solución nutritiva. Tesis de licenciatura en Agronomía en Horticultura Protegida. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Edo de Méx. 44 p.
- Fonteno W. 1994. Growing media. *In: Bedding Plants IV, A manual on the culture of bedding plants as a greenhouse crop*. Publishing. Batavia, Illinois, USA. 430 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2013. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops, principles for Mediterranean climate areas. FAO. Roma. 640 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2018. FAOSTAT (FAO Statistical Databases) Agriculture, Fisheries, Forestry, Nutrition. Rome, Italy. <<http://faostat.fao.org/site/609/default.aspx#ancor>> Consultado el 16 septiembre de 2018.
- Francis D. D., J. S. Schepers, and A. L. Sims. 1997. Ammonia exchange from corn foliage during reproductive growth. *Agronomy Journal*, 89:941-946.

- Furuta T., T. Mock and R. Coleman. 1977. Estimating the water needed for container-grown nursery stock. *American Nurseryman*, 145:68-73.
- Gallegos Vázquez C., E. Olivares Sáenz, R. Vázquez Alvarado, F. Zavala García. 2000. Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía. *Terra latinoamericana*, 18:133-139.
- Gandica-Omaña H. y H. Peña. 2015. Acumulación de materia seca y balance de nutrientes en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en ambiente protegido. *Bioagro*, 27:111-120.
- García C. A. 1996. Evaluación de Películas Foselectivas para acolchado de suelos en el Cultivo de Pepino. Tesis Licenciatura. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila. 132 p.
- García C. I, S. G. Briones. 2007. Sistemas de Riego por Aspersión y Goteo. (Ed.) Trillas. 127 p.
- García E. 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Offset Larios. México. 217 p.
- García M., M. Urrestarazu, M. C. Salas y I. Escobar. 1998. Evolución de la composición del drenaje en un sistema recirculante. *Actas de horticultura*, 21:231-239.
- García M. y M. Urrestarazu. 1998. La recirculación de la disolución nutritiva en el área mediterránea. Caja Rural de Granada. 171 p.
- Gardner F., R. Pearce and R. Mitchell. 1990. Physiology of Crop Plants. Iowa University Press. U.S.A. 327 p.
- Godoy Hernández H., J. Z. Castellanos Ramos, G. Alcántar González, M. Sandoval Villa y J. de J Muñoz Ramos. 2008. Efecto del injerto y nutrición de tomate sobre rendimiento, materia seca y extracción de nutrimentos. *Terra Latinoamericana*, 27:1-11.
- Gómez Hernández T. y Sánchez del C. F. 2003. Soluciones hidropónicas diluidas para la producción de jitomate a un racimo. *Revista Terra*, 21:57-63.
- Gutiérrez R. R. 1985. El Acolchamiento del Suelo en Horticultura. Tesis profesional. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 511 p.
- Harris Moran seed company. 2018 <[https://hmclause.com/wp-content/uploads/2015/10/MEXICO\\_Tomato\\_EICid\\_2015\\_SPA.pdf](https://hmclause.com/wp-content/uploads/2015/10/MEXICO_Tomato_EICid_2015_SPA.pdf)> Consultado el 30 de octubre de 2018.
- Heuvelink E. and M. Dorais. 2005. Crop growth and yield. CAB Publishing. Wallingford, UK. pp: 85-144.
- Huang W. Y. 2009. Factors Contributing to the Recent increase in U.S. Fertilizer Prices, 2002-08. Agricultural Resources Situation and Outlook Number AR-33. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, DC. 21 p.
- Ibarra J. L. y P. A. Rodríguez. 1991. Acolchado de suelos con películas plásticas. Primera edición. Editorial Limusa. México, D.F. 132 p.
- Inden H. and A. Torres. 2005. Comparison of four substrates on the growth and quality of tomatoes. *Acta Horticulturae*, 644:205-210.
- Jones J. B. 1999. *Tomato Plant Culture: in the Field, Greenhouse, and Home Garden*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 420 p.

- Jones J. B. 2005. Systems of hydroponic/soilless culture. pp: 117-121. *In: Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. CRS Press. USA. 440 p.
- Jorge S. M. y F. Sánchez del C. 2003. Densidades de población, arreglos de dosel y despunte en jitomate cultivado en Hidroponia bajo invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26:257-262.
- Juárez L. P., M. R. Bugarin, R. Castro B., A. L. Sánchez M., E. Cruz C., C. R. Juárez R., G. Alejo S. y R. Balois M. 2011. Estructuras Utilizadas en la Agricultura Protegida. *Revista Fuente*, 3:1-7.
- Kafkafi U. y Tarchitzky J. 2012. Fertirrigación, una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA), París, Francia y Horgen, Suiza, 149 p.
- Keys A. J., I. F. Bird, M. J. Cornelius, P. J. Lea and R. M. Wallsgrove. 1978. Photorespirator y nitrogen cycle. *Nature*, 275:1-743.
- Kirkby E. A. and K. Mengel. 1967. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea or ammonium nutrition. *Plant Physiology*, 42:6-14.
- Lamas N. M. A. 2011. Rentabilidad y financiamiento para la agricultura protegida. fideicomisos instituidos en relación con la agricultura, FIRA. Expo Agro Sinaloa.
- Lamont Jr. W. J. 1993. Plastic mulches for production of vegetable crops. *HortTechnology*, 3:35-39.
- Lara-Herrera A. 1999. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponia. *Terra*, 17:221-229.
- León G. H. M. 2001. Manual para el Cultivo de Tomate en Invernadero. Gobierno del Estado de Chihuahua. Chihuahua, México. 239 p.
- León R. E. 2009. Buena práctica Agricultura Protegida. Proyecto Centro de Desarrollo Rural FSG 963. Universidad del Valle de Guatemala y Fundación Soros Guatemala. Guatemala. 34 p.
- Lipari V. and A. Pastore. 1986. Effects of auxin on competition between trusses of the tomato plant. *Acta Horticulturae*, 191:171-177.
- López L. R., A. Arteaga R., M. A. Vázquez P., I. L. López C. y I. Sánchez C. 2009. Producción de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) basado en láminas de riego y acolchado plástico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15:83-89.
- Magdaleno-Villar J. J., A. Peña-Lomeli, R. Castro-Brindis, A. M. Castillo-González, A. Galvis-Spinola, F. Ramírez-Pérez y B. Hernández-Hernández. 2006. Efecto de soluciones nutritivas sobre el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12:223-229.
- Marschner H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants, 2nd ed. Academic Press. Nueva York. 889 p.
- Marschner P. 2012. Marchner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Elsevier. Estados Unidos. 651 p
- Méndez G. T., F. Sánchez del C., J. Sahagún C. y E. Contreras M. 2005. Doseles Escaleriformes Con Hileras De Plantas De Jitomate Orientadas En Dirección Este-Oeste. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11:185-192.

- Mengel A and K. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer academic publishers. 5th edition. Netherlands. 849 p.
- Meric M. K., J. H. Tuzel, Y. Tuzel and G. B. Oztekin. 2011. Effects of nutrition systems and irrigation programs on tomato in soilless culture. *Agricultural Water Management*, 99:19-25.
- Moreno R. A., J. Aguilar D. y A. Luévano G. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 15:763-774.
- Moreno Valencia M. M., A. Moreno Valencia, I. Mancebo Ciudad, J. Villena Ferrer y R. Meco Murillo. 2006. Materiales alternativos al acolchado plástico tradicional en cultivo de tomate en Castilla-La Mancha. VII Congreso SEAE Zaragoza. No. 79.
- Nakano Y., H. Sasaki, A. Nakano, K. Suzuki and M. Takaichi. 2010. Growth and yield of Tomato plants as influenced by nutrient application rates with quantitative control in closed rockwool cultivation. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 79:47-55.
- Noriega N. J. L. 2014. Efecto de la Concentración de la Solución Nutritiva, Frecuencia de Riego y Volumen del Sustrato en la Producción de Pepino. Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura. Departamento de Fitotecnia UACH. Chapingo, México. 119 p.
- Núñez-Ramírez F., R. L. Grijalva-Contreras, R. Macías-Duarte, F. Robles-Contreras y Duran Ceceña-Duran. 2012. Crecimiento, Acumulación y Distribución de Materia Seca en Tomate de Invernadero. *Biotechnia*, 14:25-31.
- Osuna R. J. M. 2011. Comparación de sistemas con y sin recirculación de la solución nutritiva en un cultivo hidropónico de jitomate. Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura. Departamento de Fitotecnia UACH. Chapingo, México. 94 p.
- Papadopoulos A. P. 1991 Growing greenhouse tomatoes in soil and in soilless media. Research Station. Harrow Ontario, Canadá. 79 p.
- Pardossi A., F. Malorgio, L. Incrocci, G. Carmassi, R. Magini, D. Massa and F. Tognoni. 2006. Simplified model for the water relations of soilless cultures. What they do or suggest for sustainable water use in intensive horticulture. *Acta Horticulturae*, 718:425-434.
- Pineda J., A. Ramírez-Arias, F. Sánchez del Castillo, A. M. Castillo-González, L. A. Valdez-Aguilar and J. M. Vargas-Canales. 2011. Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. *Acta Horticulturae*, 893:997-1005.
- Quesada-Roldán, G. y F. Bertsch-Hernández. 2013. Obtención de la curva de extracción nutrimental del híbrido de tomate FB-17. *Terra Latinoamericana*, 31:1-7.
- Quiñones P. H. 1997. Necesidades Hídricas de los Cultivos. Manual de Diseño de Zonas de Riego Pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 144 p.
- Raviv M. and J. H. Lieth. 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. Editorial Elsevier. 587 p.

- Resh H. M. 1995. Hydroponic Food Production: A Definitive Guide Book of Soilless Food-Growing Methods. Woodbridge Press Publishing Company. Santa Barbara, California. pp: 124-125.
- Resh H. M. 2006. Cultivos hidropónicos. 5ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 558 p.
- Resh H. M. 2013. Hydroponic Food Production A definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower. CRC Press Taylor y Francis Group. Boca Ratón. 551 p.
- Rodríguez D., J. Reza, J. Martínez, L. López-Duque and M. Urrestarazu. 2005. Development of a New Control Algorithm for Automatic Irrigation Scheduling in Soilless Culture. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 9:1-10 p.
- Salas M. C., M. Urrestarazu and D, Valera. 2000. Daily water uptake of tomato crop grown by NFT under semi-arid conditions as affected by solar radiation and other environmental factors. *Acta Horticulturae*, 537:52-55.
- Saldaña Yangüez E. A. 2017. Variación en propiedades Físico-Químicas en sustratos reutilizados y su influencia en crecimiento y desarrollo de fresa. Tesis como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. Edo. De México. 109 p.
- Sánchez del C. F. y E. Escalante R. 1988. Hidroponia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.
- Sánchez del C., F., R. Espinosa, P. y E. Escalante R. 1991. Producción súper intensiva de jitomate en hidroponia bajo invernadero: avances de investigación. *Revista Chapingo*, 78:62-68.
- Sánchez del C. F. y T. Corona S. 1994. Evaluación de cuatro variedades de jitomate bajo un sistema hidropónico a base de despuntes y altas densidades. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 1:109-114.
- Sánchez del C. F. y J. Ponce O. 1998. Densidades de población y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) cultivado en hidroponia. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 4:89-93.
- Sánchez del C. F., E. del C. Moreno P. y E. Cruz A. 2009. Producción de jitomate hidropónico bajo invernadero en un sistema de dosel en forma de escalera. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15:67-73.
- Sánchez del C. F., E. del C. Moreno P., R. Coatzin R., M. T. Colinas L. y A. Peña L. 2010. Evaluación Agronómica y Fisiotécnica de Cuatro Sistemas de Producción en Dos Híbridos de Jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 16:207-214.
- Sánchez del C. F., E. del C, Moreno P. and E. Contreras M. 2012. Development of alternative crop system for commercial production of vegetables in hydroponics tomato. *Acta Horticulturae*, 947:179-188.
- Sánchez del C. F., E. del C. Moreno P., M. A. Morales, A. Peña L. y M. Colinas L. 2012. Densidad de población y volumen de sustrato en plántulas de jitomate (*Lycopersicum esculentum* M.) *Agrociencia*, 46:255-266.
- Sánchez del C. F., C. O. Bastida, E. del C. Moreno P., E. Contreras M. y C. J. Sahagún. 2014. Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo

- hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20:239-252.
- Sánchez del C. F., E. del C. Moreno-Pérez, J. Pineda-Pineda, J. M. Osuna, J. E. Rodríguez-Pérez y T. Osuna-Encino. 2014. Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y son recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48:185-197.
- Sánchez del C. F. y E. del C. Moreno P. 2017. Diseño Agronómico y Manejo de Invernaderos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 405 p.
- Savvas D., N. Sigrimis, E. Chatzieustratiou and C. Paschalidis. 2009. Impact of a progressive Na and Cl accumulation in the root zone on pepper grown in a closed-cycle hydroponic system. *Acta Horticulturae*, 807:451-456.
- Schröder F.G., and J. H. Lieth. 2002. Irrigation control in hydroponics *In*: Savvas, D., Passam, H. Hydroponic production of Vegetables and ornamentals. Embryo Publications, Athenas Grecia. pp: 103-141.
- Schwentesius R. R. y M. A. Gómez C. 2000. Internacionalización de la Horticultura. Editorial Mundi-Prensa. Universidad Autónoma Chapingo. México. 200 pp.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2014. Atlas Agropecuario. México D. F.: SAGARPA.
- Siddiqi Y. M., J. H. Kronzucker, T. D. Britto and A. D. M. Glass. 1998. Growth of a tomato crop at reduced nutrient concentrations as a strategy to limit eutrophication. *Journal of Plant Nutrition*, 21:1879-1895.
- Silber A., B. Bar-Yosef, A. Singer and Y. Chen. 1994. Mineralogical and chemical composition of three tuffs from northern Israel. *Geoderma*, 63:123-144.
- Silber A., B. Bar-Yosef, and Y. Chen. 1999. pH-dependent kinetics of tuff dissolution. *Geoderma*, 93:125-140.
- Sinha R. K. 2004. Modern Plant Physiology. Alpha Science International Ltd. 620 p.
- Sonneveld C. and W. Voogt. 2009. Substrates: Chemical characteristics and preparation. *In*: Sonnevled, C., and W. Voogt (Eds.). Plant Nutrition of Greenhouse Crops. Springer. pp: 227-252.
- Stanghellini C., F.L.K. Kempkes and P. Knies. 2003. Enhancing environmental quality in agricultural systems. *Acta Horticulturae*, 609:277-283.
- Steiner A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*, 15:134-154.
- Suazo L. F., Zepeda B. R., Sánchez del C. F., Martínez H. J., Virgen V. J. y Tijerina Ch. L. 2014. Growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) affected by hydroponics, greenhouse and irrigation. *Annual Research & Review in Biology*, 4:4246-4258.
- Taiz L. y E. Zieger. 2006. Fisiología vegetal, vol I. Publicacions de la Universitat Jaume. España. 1338 p.
- Tanaka A., K. Fujita and K. Kikuchi. 1974. Nutrio-physiological studies on the tomato plant. I. outline of growth and nutrient absorption. *Soil Science and Plant Nutrition*, 20:57-68.
- Tejo P. 2002. Panorama de la agricultura de América Latina y el Caribe, 1990-2000. United Nations Publications. Comisión Económica para América

- Latina y el Caribe (CEPAL). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 219 p.
- Terabayashi S., I. Muramatsu, S. Tokutani, M. Ando, E. Kitagawa, T. Shigemori, S. Date and Y. Fujime. 2004. Relationship between the Weekly Nutrient Uptake Rate during Fruiting Stages and Fruit Weight of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Grown Hydroponically. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 73:324-329.
- Trejo-Téllez L. I., M. Ramírez-Martínez, F. C. Gómez-Merino, J. C. García-Albarado, G. A. Baca-Castillo y O. Tejeda-Sartorius. 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5:863-876.
- Tscheschke P., J. F. Alfaro, J. Keller and R. J. Hanks. 1974. Trickle irrigation soil water potential as influenced by management of highly saline water. *Soil Science*, 117:226-231.
- Urrestarazu G. M. 2004. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo. *In*: M. Urrestarazu (Ed.). Tratado de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa. Madrid. 914 p.
- Urrestarazu G. M. 2015. Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponia. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 267 p.
- Urrestarazu G. M. y M. del C. Salas S. 2004. Métodos de riego y fertirrigación en cultivo sin suelo. *En*: M. Urrestarazu (Ed.). Tratado de cultivo sin suelo. 3a Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 201 p.
- Urrestarazu M. y M. García. 1999. Influencia del manejo de la fertirrigación en sistema recirculante en el consumo de agua y nutriente en el cultivo de pepino. *Actas de Horticultura*, 26:447-452.
- Urrestarazu M. and P. C. Mazuela. 2005. Effect of slow-release oxygen supply by fertirrigation on horticultural crops under soilless culture. *Scientia Horticulturae*, 106:484-490.
- Van den Ende J. 1989a. Estimating the chemical composition of the soil solution of glasshouse soils. 1. Composition of soil solution and aqueous extracts. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 37:311-322.
- Vargas-Canales J. M., A. M. Castillo-González, J. Pineda-Pineda, J. A. Ramírez-Arias y E. Avitia-García. 2014. Extracción nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20:71-88.
- Vázquez I., F. Sánchez del C. y I. Miranda V. 2003. Producción de jitomate en hidroponia bajo invernadero. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Preparatoria Agrícola. México. 90 p.
- Vázquez R. J. C., F. Sánchez del C. y E. del C. Moreno P. 2007. Producción de jitomate en doseles Escaleriformes Bajo Invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13:55-62.
- Velasco H. E. y A. R. Nieto. 2006. Cultivo de Jitomate en Hidroponia e Invernadero. Segunda Edición. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 100 p.
- Villareal Romero M., R. S. García Estrada, T. Osuna Enciso y A. D. Armenta Bojorquez. 2002. Efecto de dosis y fuente de nitrógeno en rendimiento y

- calidad postcosecha de tomate en fertirriego. *Terra Latinoamericana*, 20:311-320.
- Von Elsner B., D. Briassoulis, D. Waaijenberg, A. Mistrionis, Chr. Von Zabeltitz, J. Gratraud, G. Russo and R. Suay-Cortes. 2000. Review of structural and functional characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75:1-16.
- Voogt W. 1988. The growth of beefsteak tomato as affected by K/Ca ratios in the nutrient solution. *Acta Horticulturae*, 222:155-165.
- Vox G., M. Teitel, A. Pardossi, A. Minuto, F. Tinivella and E. Schettini. 2010. Sustainable Greenhouse Systems. Nova Science Publishers. Inc. 79 p.
- Walters S. A., A. Harry R. and E. Schmidt M. 2005. Container cell volume and transplant age influences muskmelon development and yield. *Journal of Vegetable Science*, 11:47-55.
- Winsor G. W. y P. Adams. 1987. Glasshouse crops. Volumen 3 en Diagnosis of Mineral Disorders in Plants. H.M.S.O. Londres. 168 p.
- Zheng Y., T. H. Graham, S. Richard and M. Dixon. 2005. Can Low Nutrient Strategies Be Used for Pot Gerbera Production in Closed-Loop Subirrigation?. *Acta Horticulturae*, 691:365-372
- Zribi W., R. Aragüés, E. Medina and J. M. Faci. 2015. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control. *Soil & Tillage Research*, 148:40-45.