



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE RÁBANO (*Raphanus sativus* L.) CV.
CHAMPION CULTIVADO EN SOLUCION NUTRITIVA CON TRES SUTRATOS
INORGÁNICOS Y DOS DENSIDADES DE SIEMBRA**

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE

B I O L O G O

PRESENTA

SERGIO RADILLO BECERRA

DIRECTOR DE TESIS: DR. GUMERCINDO H. DE LA CRUZ GUZMAN

Los Reyes Iztacala, Tlalnepanitla, Estado de México, agosto de 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos que estuvieron siempre al pendiente de mi desarrollo académico, a mis compañeros y amigos del Laboratorio 9 de la UMF con los cuales intercambiaba ideas, con ellos hacía mi estancia más divertida a la hora de estar trabajando con todos los proyectos que realice con gran esfuerzo y dedicación. A mi novia por formar parte importante de mi superación académica y personal desde que la conocí. A mis profesores por haber aceptado a un estudiante del cual no conocían su forma de trabajar, que siempre estuvo al pendiente de sus observaciones y con muchas ganas de estar superándose constantemente para no defraudarlos.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a la Universidad Nacional Autónoma de México y a todos los que conforman el Laboratorio 9 de Ecofisiología Vegetal de la UMF de la FES Iztacala por brindarme las herramientas necesarias para la realización de este proyecto.

Quiero agradecerle al profesor Gumerindo H. De La Cruz Guzmán por ayudarme en todo lo posible para la realización de este proyecto así como en la confianza que me dio animándome a no desistir y seguir adelante.

A los profesores Alberto Arriaga Frías, Manuel Mandujano Piña, Antonia Trujillo Hernández y Ana Lilia Muñoz Viveros por sus valiosas aportaciones.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
CONTENIDO.....	iii
CUADROS	vi
FIGURAS	viii
1.0 RESUMEN	1
2.0 INTRODUCCIÓN	2
3.0 REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Generalidades <i>Raphanus sativus</i> L.	4
3.1.1 Descripción botánica y ubicación taxonómica	4
3.1.2 Usos y propiedades nutritivas	5
3.1.3 Importancia económica.....	6
3.1.4 Rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.) ‘Champion’	8
3.2 Generalidades de Hidroponía	9
3.2.1 Breve Historia de la hidroponía.....	9
3.3 Sistemas hidropónicos	11
3.3.1 Cultivo en flotación.....	11
3.3.2 Cultivo en sustrato	12
3.4 Descripción de sustratos.....	14
3.4.1 Propiedades fisicoquímicas de tezontle, agrolita y vermiculita	14
3.5 Solución nutritiva.....	16
3.5.1 Fertilizantes para preparar solución nutritiva	17
3.5.2 Fertilizantes que contienen macronutrientes: peso molecular, valencia y peso equivalente.....	18

3.5.3 Balance entre aniones y cationes con fertilizantes comerciales	19
3.5.4 Procedimiento para realizar los cálculos de la solución nutritiva Steiner (1984).	19
3.5.5 Micronutrientes	21
3.6 Densidad de siembra	23
4.0 OBJETIVOS	24
4.1 General	24
4.2 Particulares	24
5.0 HIPOTESIS	25
5.1 General	25
5.2 Particulares	25
6.0 MATERIALES Y MÉTODOS	26
6.1 Siembra, trasplante y diseño de tratamientos	26
6.2 Análisis estadístico.....	31
7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
7.1 Variables ambientales.....	32
7.2 Propiedades físicas, pH y conductividad eléctrica de los sustratos	33
7.3 Germinación.....	34
7.4 Conductividad eléctrica en el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'	35
7.4.1 Número de hojas.....	36
7.4.2 Área foliar	37
7.4.3 Altura de la planta	38
7.4.4 Conductancia estomática y temperatura foliar	38
7.4.5 Relación Unidades SPAD vs concentración de clorofila	40
7.4.6 Concentración de clorofila	42

7.4.7 Biomasa fresca, biomasa seca y contenido de humedad	42
7.5 Efecto de dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos en el crecimiento y rendimiento de rábano ‘Champion’	43
7.5.1 Número de hojas.....	43
7.5.2 Área foliar	44
7.5.3 Altura de la planta	46
7.5.4 Conductancia estomática y temperatura foliar	47
7.5.5 Estimación de clorofila con unidades SPAD	47
7.5.6 Biomasa fresca, biomasa seca y contenido de humedad	48
8.0 CONCLUSIONES.....	50
9.0 REFERENCIAS.....	51
10.0 ANEXO.....	60
10.1 Procedimiento para preparar 20 L de solución nutritiva Steiner (1984)	60
10.2 Ecuaciones de propiedades físicas de los sustratos.....	64

CUADROS

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de tezontle, agrolita y vermiculita (Martínez y Roca, 2011).....	14
Cuadro 2. Fertilizantes utilizados para preparar soluciones nutritivas (Santos y Ríos, 2016).....	17
Cuadro 3. Fertilizantes utilizados para preparar de solución nutritiva Steiner.....	19
Cuadro 4. Concentración de iones en la solución nutritiva Steiner (1984).....	19
Cuadro 5. Concentración de aniones y cationes, en porcentaje y meq L ⁻¹ , de la solución Steiner (1984) con CE de 2 dS m ⁻¹	20
Cuadro 6. Ajuste para preparar la solución nutritiva con el agua de la FES-Iztacala. Ojo cambie titulo.....	20
Cuadro 7. Balance con los fertilizantes comerciales. Los valores de la diferencia coinciden con los de la suma.	21
Cuadro 8. Cantidades necesarias de fertilizante para la preparación de solución nutritiva Steiner (2 dS m ⁻¹).....	21
Cuadro 9. Compuestos que contienen micronutrientes y cantidad requerida por litro de solución nutritiva.....	22
Cuadro 10. Propiedades físicas y químicas de tezontle, agrolita y vermiculita.	33
Cuadro 11. Germinación de rábano ‘Champion’ en tezontle, agrolita y vermiculita.	35
Cuadro 12. Conductancia estomática (mmol m ⁻² s ⁻¹) de rábano ‘Champion’ fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas.	39
Cuadro 13. USPAD y concentración de clorofila (µg cm ⁻²) en hojas de rábano ‘Champion’.	40
Cuadro 14. Correlación Pearson.....	41
Cuadro 15. Ecuaciones que relacionan las USPAD con la concentración de clorofila.	41
Cuadro 16. Biomasa fresca, biomasa seca y contenido de humedad en plantas de rábano ‘Champion’, fertirrigadas con solución nutritiva a tres conductividades eléctricas.	42

Cuadro 17. Numero de hojas de rábano ‘Champion’ cultivado con dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos.	44
Cuadro 18. Área foliar de rábano ‘Champion’ cultivado con dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos.	45
Cuadro 19. Altura de las plantas de rábano ‘Champion’ cultivado con dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos.	46
Cuadro 20. Estimación de clorofila con unidades SPAD en hojas de rábano ‘Champion’ cultivado con tres sustratos inorgánicos y dos densidades de siembra.	47
Cuadro 21. Biomasa fresca, biomasa seca, longitud de raíz y volumen de bulbo en plantas de rábano ‘Champion’ cultivado con tres sustratos inorgánicos y dos densidades de siembra.	48

FIGURAS

Figura 1. Principales estructuras que componen a la planta de rábano.....	5
Figura 2. Fluctuación del precio y rendimiento de rábano en los últimos 25 años en el campo mexicano.	7
Figura 3. Variedades de rábano diferenciadas por color, forma y tamaño.	8
Figura 4. Rábano ‘Champion’ cultivado hidropónicamente en sustrato tezontle.	9
Figura 5. Lechugas sobre unicel en el sistema hidropónico de flotación.....	11
Figura 6. Sistema NFT casero con tubos de PVC en el cultivo de lechuga.	12
Figura 7. Bolsas de polietileno oscuras para cultivos.....	12
Figura 8. Bolsa de cultivo con sistema de riego por goteo.	13
Figura 9. Contenedores plásticos con diferentes sustratos en el cultivo de rábano.	13
Figura 10. Tezontle (A), agrolita (B) y vermiculita (C).	15
Figura 11. Disponibilidad de nutrientes en función del pH.	17
Figura 12. Caja plástica (polietileno de alta densidad) de 40 x 70 x 15 cm.	26
Figura 13. Diseño de tratamientos para el cultivo de rábano ‘Champion’ con tres conductividades eléctricas de la Sol. Nut.	27
Figura 14. Germinadores de unicel con 200 cavidades.	27
Figura 15. Distribución de tratamientos para el cultivo de rábano ‘Champion’ con dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos.....	28
Figura 16. Drenando agua del sustrato tezontle en vasos transparentes.	29
Figura 17. De izquierda a derecha, charolas de tereftalato de polietileno (PET) con tezontle, agrolita y vermiculita, cada una con 20 semillas distribuidas de manera equidistante.	30
Figura 18. Temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa en el interior de invernadero de agosto de 2016 a mayo de 2017.....	32
Figura 19. Numero de hojas de rábano ‘Champion’ fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas.	36
Figura 20. Área foliar de rábano ‘Champion’ fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas..	37

Figura 21. Altura de rábano ‘Champion’ fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas.....	38
Figura 22. Temperatura foliar de rábano ‘Champion’ fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas.	40
Figura 23. Materiales necesarios para la preparación de la solución nutritiva Steiner.	60
Figura 24. Cuatro fertilizantes y un ácido como macronutrientes, bolsa de producto comercial para micronutrientes.	60
Figura 25. Balanza granataria para el pesaje de las sales fertilizantes.	61
Figura 26. Cubeta de 20 L a media capacidad con agua de la llave.	61
Figura 27. Dilución individual de cada una de las sales fertilizantes y micronutrientes.....	62
Figura 28. Medición del pH inicial y final después de agregar ácido nítrico y fosfórico.	62
Figura 29. Agregando fertilizantes al agua con el pH ajustado..	63
Figura 30. Pasó final de la preparación de la solución nutritiva.....	63

1.0 RESUMEN

Durante el periodo de agosto de 2016 a mayo de 2017, se evaluó el efecto de la conductividad eléctrica, las propiedades físicas de tres sustratos y dos densidades de siembra en el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'. El cultivo se realizó en el invernadero de la unidad de morfología, FES-Iztacala, UNAM. En el interior, la temperatura fluctuó de 6 a 43 °C, la humedad de 15 a 90 % y la radiación fotosintéticamente activa de 50 a 800 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Se realizaron dos ciclos de cultivo, en el primero, el fertirriego se realizó con solución nutritiva Steiner preparada a 0.8, 1.2 y 1.7 dS m^{-1} , en el segundo se aplicó fertirriego a 1.7 dS m^{-1} , como sustratos se utilizaron tezontle, agrolita y vermiculita con densidades de siembra de 70 y 140 plantas m^{-2} . Las variables evaluadas fueron: Número de hojas (NH), área foliar (AF), altura de la planta (h), conductancia estomática (g_s), unidades SPAD asociadas a la concentración de clorofila y la biomasa fresca de raíces, bulbos y hojas, además de la longitud de raíces y el volumen del bulbo. El fertirriego con solución nutritiva preparada con conductividad eléctrica de 1.7 dS m^{-1} mejoró el NH, el AF y la h. La (g_s) no fue afectada por la conductividad eléctrica de la solución nutritiva. Se obtuvieron ecuaciones para estimar la concentración de clorofila a, b y total a partir de unidades SPAD. Los sustratos que mejoran la germinación son agrolita y vermiculita, mientras que tezontle favorece el crecimiento y la biomasa seca de raíces. El rendimiento de rábano 'Champion', evaluado como biomasa fresca y seca no fue modificado por los sustratos utilizados, pero sí por la conductividad eléctrica de la solución nutritiva y por las densidades de siembra. El crecimiento de rábano 'Champion' mejora si la germinación se realiza en agrolita o vermiculita y se trasplanta en tezontle para su desarrollo. El volumen del bulbo o la biomasa fresca y seca es igual si se utilizan cualquiera de los tres sustratos, sin embargo, la densidad de siembra de 70 plantas m^{-2} con fertirriego de 1.7 dS m^{-1} incrementan el crecimiento y el rendimiento de rábano 'Champion'.

Palabras clave: Conductividad eléctrica, propiedades físicas de sustratos, unidades SPAD, concentración de clorofila, biomasa fresca y seca.

2.0 INTRODUCCIÓN

Los invernaderos con cubierta plástica representan una alternativa de producción agrícola para el cultivo de hortalizas ya que pueden cultivarse en espacios extensos (hectáreas) o reducidos (algunos metros cuadrados). Dentro de los invernaderos se tiene control de parámetros como la nutrición vegetal, temperatura, humedad relativa, densidad de siembra y la prevención o combate de plagas de forma sencilla en comparación con cultivos a cielo abierto (Hernández, 2013). En este sistema de cultivo se fomenta una alimentación sana en el medio rural, periurbano y urbano, donde el hábito de consumo está siendo orientado a la adquisición de vegetales frescos y de buena calidad como el rábano (Urrestarazu *et al.*, 2005).

En México, el rábano representa el 0.15 % del total de hortalizas que se cultivan, con un rendimiento promedio de 6.3 t ha⁻¹. Su cultivo en espacios pequeños o traspatio contribuye al ahorro familiar y representa un área de oportunidad para productores a pequeña escala ya que una exposición a la radiación solar directa por 4 h es suficiente para su buen desarrollo, con temperaturas óptimas entre 18 y 22 °C. Para cosecharse requiere de 28 a 70 días. *Raphanus sativus* tiene alto contenido de antioxidantes, vitaminas y minerales que mejoran la salud de quien lo consume (Gómez *et al.*, 2008; López *et al.*, 2012).

El desarrollo y rendimiento de los cultivos estará influenciado por las propiedades físicas y químicas del sustrato, la conductividad eléctrica de la solución nutritiva, la densidad de siembra y la incidencia de plagas o enfermedades (Aguilar *et al.*, 2005; Mikel, 2010; Beltrano y Giménez, 2015). Las propiedades de los sustratos pueden alterar o favorecer la retención de humedad, capacidad de aireación, disponibilidad de la solución y en la capacidad de absorción de nutrientes. La conductividad eléctrica influye de forma negativa o positiva debido a la concentración de solutos en la solución de riego. Para la producción de rábano se pueden utilizar soluciones nutritivas con conductividades eléctricas entre 0.9 y 1.9 dS m⁻¹ (Salermo, 2005). Con respecto a la densidad de siembra, un buen crecimiento con una mayor expansión de hojas y raíces se presenta cuando no hay

otras plantas competidoras en la cercanía; sin embargo, cuando hay mayor densidad, la planta que crece más rápido que su vecina, utilizara la mayor cantidad de recurso disponible e incrementará su tasa de crecimiento en general (Jollife y Gaye, 1995).

Con base en lo anterior, surge la necesidad de evaluar las propiedades físicas de agrolita, vermiculita y tezontle como sustratos para el cultivo de rábano, así como definir la conductividad eléctrica y densidad de siembra que favorezcan el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'.

3.0 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Generalidades *Raphanus sativus* L.

Los rábanos pertenecen a la familia de las crucíferas y generalmente se cultivan en climas templados con altitudes que oscilan entre 190 y 1240 msnm. Es un cultivo anual, su producción se basa principalmente en la obtención de su raíz la cual es carnosa, de varios tamaños y colores. Generalmente se cultivan las variedades: Oleifer con semillas oleaginosas y uso forrajero, caudatus con vainas picantes y uso para condimento, sativus de bulbos pequeños entre 3 y 5 o grandes entre 7 y 9 cm de diámetro para su consumo en ensaladas. *Raphanus sativus* es originario de Europa y Asia. Es una de las hortalizas más comercializadas en invierno y forma parte esencial de la comida tradicional japonesa teniendo un consumo promedio de 500 mil toneladas al año, las raíces se pueden consumir crudas, cocidas, enlatadas o secas (Pérez y Pérez, 2004; Zaki *et al.*, 2012).

3.1.1 Descripción botánica y ubicación taxonómica

Raphanus sativus es una planta que posee hojas basales, pecioladas, de lámina lobulada con uno a tres pares de segmentos laterales con bordes dentados (Figura 1A) y abundantes tricomas en la parte abaxial. Presenta un tallo reducido el cual aumenta en forma de roseta brevemente antes de la floración (Figura 1B), posteriormente elonga el tallo alcanzando una altura de 50 a 100 cm. El eje de la raíz primaria (bulbo) se compone de dos partes anatómicamente distintas, la parte superior se origina del hipocotilo por lo cual no cuenta con raíces laterales como ocurre con la parte inferior que consiste en verdadero tejido de raíz (Figura 1C) (Casimir, 2001; Zaki *et al.*, 2012; Vicent, 2013).

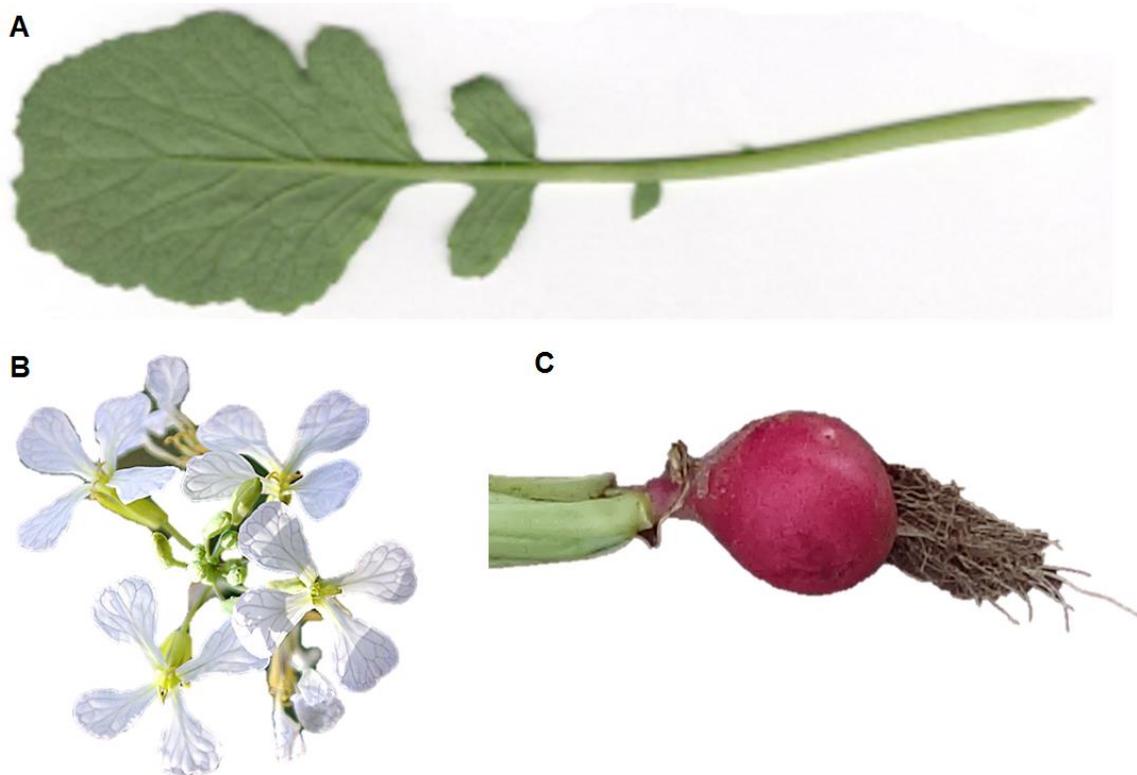


Figura 1. Principales estructuras que componen a la planta de rábano. A) Hoja peciolada, B) Inflorescencia, C) Bulbo.

Raphanus sativus se ubica taxonómicamente de la siguiente manera (Tropicos, 2018).

Reino: Plantae

División: Magnoliophita

Clase: Equisetopsida

Orden: Brassicales

Familia: Brassicaceae

Género: *Raphanus*

Especie: *Raphanus sativus* L.

3.1.2 Usos y propiedades nutritivas

La cosecha y consumo del rábano data de tiempos prehistóricos, de las primeras civilizaciones de las cuales se tiene conocimiento de su manejo es del

pueblo egipcio donde se aprovechaba el aceite de la semilla y pertenecía a la dieta obligada para los obreros, se le atribuyen propiedades nutritivas y farmacológicas debido a su alto contenido en vitaminas y minerales (Terri *et al.*, 2014); 100 g de materia fresca de rábano contienen 0.86 g de proteínas, 30 Unidades internacionales (UI) de vitamina A, 30 mg de vitamina B1, 20 g de vitamina B2 y 24 mg de vitamina C. Por lo antes mencionado, al rábano se le atribuyen efectos diuréticos y digestivos (Ramírez y Pérez, 2006).

La raíz principal se come cruda en ensaladas, salsa y aperitivos, también se pueden cortar en rodajas y combinarlas con papas fritas. En la cocina europea, el rábano negro es su preferido y en la cocina oriental se prefieren rábanos gigantes (*Raphanus sativus* L. var. *Longipinnatus*), su raíz principal es de sabor suave y es utilizado en sopas, salsas y platos de carne. Este rábano también conocido por el nombre de 'Daikon' se consume rallado o en pastel, siendo muy importante para las tradiciones culinarias de Japón, China y Corea.

En México, el rábano no alcanza significativa importancia como otras hortalizas, pero se utiliza en platillos como el pozole, el mole verde. La fiesta popular 'La Noche de Rábanos' llevada a cabo en el estado de Oaxaca desde 1897, donde horticultores y floricultores inspirados realizan diseños de figuras con los rábanos, la flor inmortal (*Xeranthemum inapertum*) y al totomoxtle (hoja que cubre al elote).

3.1.3 Importancia económica

En el año agrícola 1990-1991, la superficie sembrada con rábano fue de 2448 ha en los 32 estados del país, las entidades que presentaron mayor superficie sembrada fueron Puebla, Sonora, Baja California y Jalisco, con 585, 372, 325 y 179 ha respectivamente, juntos representan el 60 % de la producción del país. El rendimiento promedio fue de 5 t ha⁻¹ (INEGI, 1997). En el año agrícola de 2006-2007 la superficie sembrada de rábano fue de 4130 ha, la superficie cosechada fue de 3757 ha con una producción total de 35227 t (INEGI, 2007).

La producción agrícola total del país en 2016 fue de 42379347.2 t ha⁻¹, el cultivo de rábano abarcó el 0.0054 % de t ha⁻¹ del total nacional. Puebla es el estado con mayor producción de rabanito, 724.09 t ha⁻¹, y de rábano, Jalisco con 303.24 t ha⁻¹ (SIAP, 2016) (Figura 2).

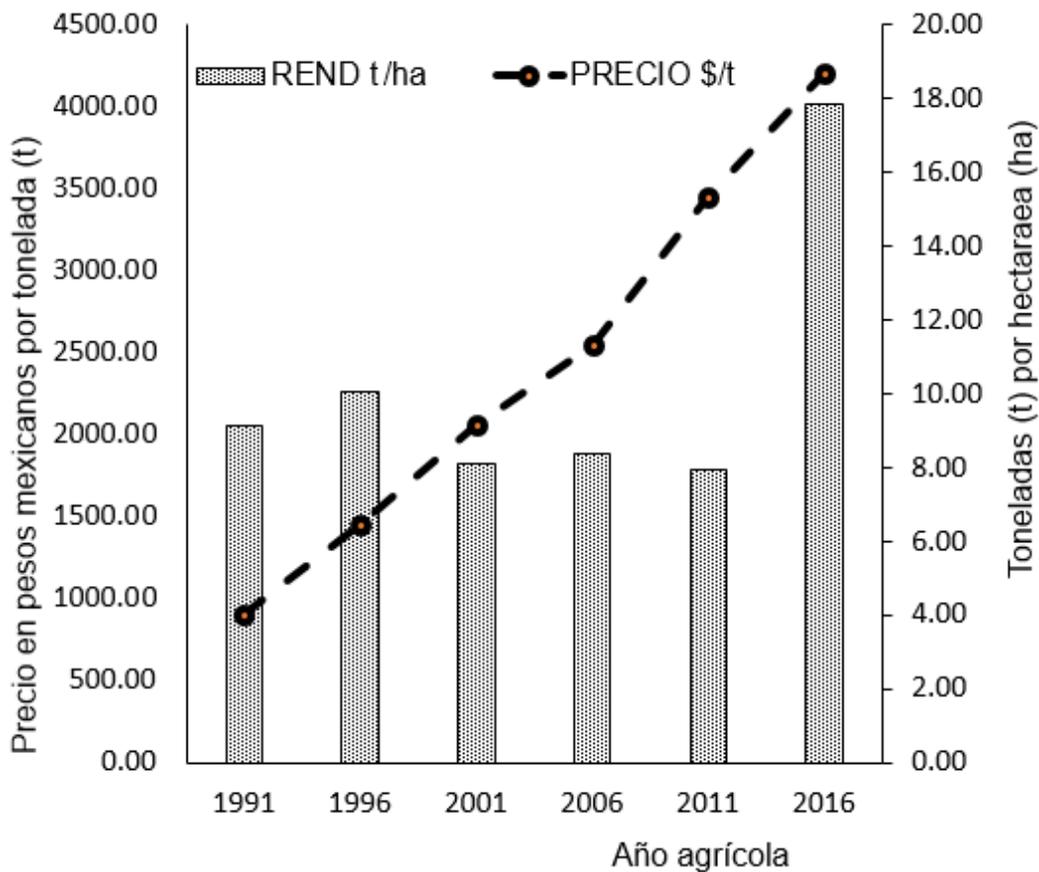


Figura 2. Fluctuación del precio y rendimiento de rábano en los últimos 25 años en el campo mexicano. Datos obtenidos de SIAP y trabajados para la obtención del gráfico.

El cultivo de rábano se realiza principalmente en suelo. Algunos estados que producen rábano en sistemas protegidos son Oaxaca, Ciudad de México y Yucatán con una superficie cosechada de 0.265, 0.241 y 0.173 ha respectivamente (SAGARPA, 2016).

3.1.4 Rábano (*Raphanus sativus* L.) 'Champion'

En el mercado existen diferentes variedades cultivadas que se diferencian en tamaño, forma y color, los rábanos esféricos con 2 a 3 cm de diámetro y los alargados de 10 a 15 cm de altura, con rizodermis que puede ser negra, morada, roja, amarilla y blanca, el tejido comestible siempre será de un tono blanquecino con excepción de algunas variedades asiáticas donde adquiere un tono rosado. Algunas de las variedades blancas que más se cultivan son la 'Daikon', 'Icicle' y 'Round White', entre las variedades rojas recomendables para su cultivo se cuentan 'Crunchy Red', 'Red Baron', 'Red Devil', 'Fuego', 'Early Scarlet Globe' y 'Cherry Belle' (Masabni, 2016) (Figura 3).



Figura 3. Variedades de rábano diferenciadas por color, forma y tamaño. Modificado de Google imágenes.

La variedad 'Champion' es de polinización abierta, produce un bulbo redondo de tamaño mediano, color rojo intenso y buena conservación postcosecha, ya que se mantiene firme y crujiente. Su follaje es mediano, ideal para su presentación en manojos. Es una hortaliza de amplia adaptación a las áreas productoras (Figura 4).



Figura 4. Rábano 'Champion' cultivado hidropónicamente en tezontle. Imagen propia.

3.2 Generalidades de Hidroponía

La palabra hidroponía deriva de la etimología griega hidro (agua) y ponos (labor o trabajo) lo cual nos habla de un trabajo que se lleva a cabo en agua, aunque actualmente la palabra hace referencia al cultivo sin suelo.

El cultivo sin suelo es un sistema de producción en donde la planta es fertirrigada con solución nutritiva (con macro y micro nutrientes esenciales disueltos) y se utiliza un sustrato (material inerte para el soporte de la planta, desarrollo de la raíz y retención de humedad) (Gutiérrez, 2011). El desarrollo actual de los cultivos hidropónicos está enfocado a la utilización del mínimo espacio y reducción del consumo de agua con gran producción y calidad (Beltrano y Giménez, 2015).

3.2.1 Breve Historia de la hidroponía

La primera información escrita referente a la hidroponía data de los años 1600, cuando Jan Baptista Van Helmont realizó el experimento del retoño de sauce, el cual consistió en pesar el sauce en dos tiempos con 5 años de distancia, todo el tiempo fue regado con agua de lluvia. Concluyó que hay sustancias dentro del agua de lluvia que aportan lo necesario para el crecimiento de las plantas.

En 1699, John Woodward realizó un experimento que consistió en cultivar 77 plantas en soluciones acuosas diferentes. De esta forma desarrolló las primeras soluciones nutritivas con concentraciones diferentes. Las mejores diluciones fueron las que contenían más cantidad de suelo y agua sucia. Debido a esto infirió que el suelo es responsable de la materia que constituye a las plantas y que el agua sirve como transporte. La fisiología vegetal avanzó notablemente, en Europa se demostró que la absorción de minerales y agua ocurre por las raíces y que la transpiración, liberación de oxígeno, absorción de CO₂ y la influencia de la luz solar son eventos que participan de manera activa en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Desde el siglo XVI hasta nuestros días se ha mantenido constante una cascada de conocimiento para la descripción del funcionamiento de las plantas. Nicolás De Saussure indicó que los elementos que constituyen a las plantas son obtenidos del agua, el suelo y el aire. Sachs y Knop demostraron la factibilidad del cultivo de plantas en medios inertes con solución nutritiva. En la década de los 30 W. F. Gericke llamó por primera vez a la técnica basada en el crecimiento vegetal sobre sustrato inerte con solución nutritiva 'Hydroponic'. Diez años después, demostró la utilidad de los cultivos hidropónicos en islas incultivables del pacífico, proveyendo de alimentos a tropas norteamericanas (Alcántar y Trejo, 2009).

Después de la segunda guerra mundial, el cultivo hidropónico se extendió en plan comercial siendo adoptada en países como Italia, Francia, España, Alemania, Israel y Holanda. En México el primer espacio dedicado al cultivo de la hidroponía fue construido a finales de los 70's en Tlancualpicán, Chiautla, Puebla. Se le llamó Unidad de Investigación Hidroponica Tonatl (UIHT), que operó como centro de investigación, formación profesional y producción comercial para financiar proyectos de investigación (Alcántar y Trejo, 2009).

En México, el establecimiento de la hidroponía ha sido lenta, debido a que el desarrollo de esta tecnología no fue realizada en nuestro país, sin embargo, la madurez mundial que hoy en día tiene el cultivo sin suelo, es benéfico para los países menos adelantados ya que pone en marcha procesos de desarrollo (Longar *et al.*, 2013).

3.3 Sistemas hidropónicos

3.3.1 Cultivo en flotación

Este sistema hidropónico se caracteriza por tener las raíces de la planta sumergidas parcial o totalmente en solución nutritiva. La oxigenación es de vital importancia para el desarrollo de la planta.

- El cultivo en flotación consiste en tanques impermeables así como de una superficie flotante que funcione como soporte para las plantas. Esta superficie debe de cubrir la solución evitando el contacto directo con la luz del sol, para evitar el crecimiento de organismos fotosintéticos no deseados. Este cultivo debe contar con algún sistema de aireación si su producción es a gran escala (Figura 5).



Figura 5. Lechugas sobre unicel en el sistema hidropónico de flotación. Modificado de Google imagenes.

- Cultivo en película de nutrientes (Nutrient film technique o NFT). La técnica de película de nutrientes consiste en la recirculación de una película de solución nutritiva a través de las raíces de la planta. Este sistema debe de tener un extremo alto para la llegada del bombeo de la solución y una pendiente $\leq 5\%$ para el flujo de la solución nutritiva. El volumen de la solución se debe mantener constante, el pH y la conductividad eléctrica se monitorean semanalmente (Figura 6).



Figura 6. Sistema NFT casero con tubos de PVC en el cultivo de lechuga. Imagen propia.

3.3.2 Cultivo en sustrato

El cultivo en sustrato brinda un balance a la raíz con respecto a las propiedades fisicoquímicas de los sustratos y la solución nutritiva, aunque también podría funcionar únicamente como medio de soporte para la planta. Dependiendo el tipo de contenedor y su disposición espacial se pueden diferenciar las técnicas de cultivo en sustrato, destacando tres.

- Cultivo en macetas de Bentley. Responde a la idea de implementar métodos más baratos, pero igualmente eficientes en un cultivo hidropónico, se utilizan bolsas de polietileno negro grueso como macetas, con un sustrato y un sistema de riego por goteo (Figura 7).



Figura 7. Bolsas de polietileno oscuras para cultivos. Modificada de Google imágenes.

- Cultivo en barras y bolsas de cultivo. Es una técnica reciente para el cultivo de hortalizas y especies ornamentales con alto valor económico, este sistema contiene una mezcla de sustratos listos para ser utilizados. Generalmente las barras se distribuyen en hileras y son colocados en canaletas para reciclar el exceso de solución nutritiva (Figura 8).



Figura 8. Bolsa de cultivo con sistema de riego por goteo. Modificado de Google imágenes.

- Cultivo en contenedores. Son sistemas cerrados donde se deben conocer las propiedades físicas del sustrato para optimizar el fertirriego. Éstos pueden adecuarse al espacio disponible y a las posibilidades de cada persona o grupo (Figura 9).



Figura 9. Contenedores plásticos con diferentes sustratos en el cultivo de rábano. Imagen propia.

3.4 Descripción de sustratos

Un sustrato es un material distinto al suelo, puede ser natural o sintético. Su función es dar soporte y anclaje al sistema radical de la planta (Díaz, 2004).

Elegir un buen sustrato es esencial para el óptimo desarrollo de las plantas, dado que el volumen del contenedor (maceta, bolsa, parcela o cajas plásticas) es limitado, el sustrato debe poseer propiedades físicas y químicas que permitan un buen desarrollo a lo largo del ciclo de vida de las plantas (Martínez y Soriano, 2014).

3.4.1 Propiedades fisicoquímicas de tezontle, agrolita y vermiculita

Entre las propiedades físicas de los sustratos están densidad real, granulometría, densidad aparente, porosidad y capacidad de aireación. La densidad real es la relación de la masa de las partículas y el volumen que estas ocupan. Las partículas que conforman al sustrato suelen tener distintos tamaños, la granulometría se determina con de tamices cuya apertura está graduada en micras. La densidad aparente se define como la relación entre las partículas (secas o húmedas) y el volumen aparente que ocupan sin considerar los espacios entre las partículas. Los valores de algunas propiedades físicas o químicas de los sustratos y su relación con su calidad para el cultivo de las plantas se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de tezontle, agrolita y vermiculita (Martínez y Roca, 2011).

Sustrato	Propiedades fisicoquímicas						
	DA (kg dm ⁻³)	Porosidad	Aireación	RH ^z	pH	CIC	Estabilidad
Tezontle	0.7-1.3	Buena	Alta	Buena	6.5	>20	Alta
Agrolita	0.08-0.12	Alta	Buena	Buena	7.7	<20	Baja
Vermiculita	0.09-0.14	Alta	Alta	Buena	5-7	>20	Baja

^zDA, densidad aparente; RH, retención de humedad; CIC, capacidad de intercambio catiónico.

Bures, (2001) separa a los sustratos en químicamente activos y químicamente inertes. Los químicamente activos tienen alta capacidad de intercambio catiónico

(CIC) y presentan interacción con la solución nutritiva. Se utilizan cuando los cultivos presentarán riegos espaciados durante su fase fenológica. Los químicamente inertes tienen baja o nula CIC, no interaccionan con la solución nutritiva y se utilizan cuando la frecuencia de riego evita el estrés hídrico en los cultivos.

Agrolita, vermiculita y tezontle son ejemplos de sustratos inorgánicos o químicamente inertes. El tezontle es un material rojizo u oscuro, de origen volcánico muy poroso. Sus propiedades físicas dependen del tamaño de las partículas, estructuralmente es considerado como estable a lo largo del tiempo. La agrolita proviene de la perlita que con tratamiento térmico resulta en un material granulado y de baja densidad (Ramos, 2014). La vermiculita es un material de origen mineral, estructuralmente compuesto de laminillas conformadas por silicatos de aluminio, magnesio y hierro (Figura 10).



Figura 10. Tezontle (A), agrolita (B) y vermiculita (C). Imagen propia.

Para el cultivo de hortalizas se requieren sustratos que retengan humedad, que sean estériles, estables con buena oxigenación, de fácil manejo y que sus propiedades físicas no se alteren (Mora, 1999).

Sonnevel y van den Bos, (1995) evaluaron el crecimiento y la calidad de rábano cultivado en arena y lana de roca, regado con diferentes concentraciones de solución nutritiva con un intervalo de 1 a 6 dS m⁻¹. El experimento se realizó en invierno y verano. En verano el riego con solución nutritiva a conductividad eléctrica (CE) de 2 dS m⁻¹ mostró mayor crecimiento y calidad, mientras que, en invierno, la mejor solución nutritiva fue la de 2 a 4 dS m⁻¹. Los minerales absorbidos fueron los

mismos en ambas épocas del año, la cantidad de agua absorbida fue mayor en invierno.

3.5 Solución nutritiva

La solución nutritiva se define como una mezcla de fertilizantes disueltos en el agua de riego, con concentraciones y relaciones iónicas que favorezcan la absorción de los elementos esenciales sin restricción alguna. Existen soluciones nutritivas como Knop, Robbins, Hoagland-Arnon, Resh, Graves y Steiner entre otras. Todas se basan en el principio de relaciones mutuas entre aniones y cationes (Steiner, 1961).

La concentración de aniones o cationes influye en la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva. Soluciones con $CE \geq 2.0 \text{ dS m}^{-1}$ están más concentradas y tienen potencial osmótico menor, lo que implica mayor esfuerzo por las raíces para absorber la solución, comparado con las de 0.5 dS m^{-1} cuyo potencial osmótico es mayor y las raíces absorben el agua con mayor facilidad (Fabela *et al.*, 2006; Trejo y Gómez, 2012).

Para el cultivo rábano, la solución de fertirriego debe tener conductividad eléctrica entre 1.2 y 1.5 dS m^{-1} (SAGARPA, 2012; Park y Hong, 1996).

El pH, que se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrogeno, es importante para la solución nutritiva, ya que la disponibilidad mayor de los elementos esenciales ocurre en intervalos de pH entre 5.5 y 6.5 (Figura 11).



Figura 11. Disponibilidad de nutrientes en función del pH. Modificado de Google imágenes.

3.5.1 Fertilizantes para preparar solución nutritiva

Los fertilizantes utilizados para preparar soluciones nutritivas deben estar disponibles en el mercado y ser accesibles para el productor. De manera general los fertilizantes que se utilizan en la industria agrícola se clasifican en nitratos, sulfatos, fosfatos, cloruros y ácidos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Fertilizantes utilizados para preparar soluciones nutritivas (Santos y Ríos, 2016).

Fertilizante	Formula química	Peso molecular (g mol ⁻¹)
Nitratos		
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	80

Nitrato de calcio	$5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3$	1080.5
Nitrato de potasio	KNO_3	101
Nitrato de magnesio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	256
Sulfatos		
Sulfato amónico	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	132
Sulfato potásico	K_2SO_4	174
Sulfato de magnesio	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246
Fosfatos		
Fosfato monoamónico	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	115
Fosfato monopotásico	KH_2PO_4	136
Cloruros		
Cloruro de potasio	KCl	74.5
Cloruro cálcico	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	219
Ácidos		
Ácido nítrico	HNO_3	63
Ácido fosfórico	H_3PO_4	98

Los fertilizantes deben contener todos los elementos esenciales que las plantas requieren para su crecimiento. Se clasifican en macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (Mo, B, Cl, Fe, Mn, Zn, Cu). Las raíces los absorben en forma aniónica, NO_3^- , H_2PO_4^- , Cl^- , SO_4^{2-} , MoO_4^{2-} , catiónica NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} o como compuesto, H_3BO_4 .

3.5.2 Fertilizantes que contienen macronutrientes: peso molecular, valencia y peso equivalente

Los macronutrientes se encuentran en las plantas en concentraciones $\geq 1\%$ (Salisbury y Ross, 1992). Para calcular la cantidad de fertilizante que se requiere pesar al preparar la solución nutritiva, es necesario conocer su peso molecular, número de valencia y peso equivalente (Cuadro 3).

Cuadro 3. Fertilizantes utilizados para preparar de solución nutritiva Steiner.

Fertilizante	Formula del compuesto	PM ²	V	PE
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236	2	118
Nitrato de potasio	KNO ₃	101	1	101
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	174	2	87
Sulfato de magnesio	MgSO ₄ ·7H ₂ O	246	2	123
Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	98	3	32
Ácido nítrico	HNO ₃	63	1	63

²PM, peso molecular; V, valencia; PE, peso equivalente.

3.5.3 Balance entre aniones y cationes con fertilizantes comerciales

De acuerdo con el principio de electroneutralidad, la carga total de una solución acuosa debe de ser cero, por lo que el agua de riego siempre tendrá que estar balanceada. Un ejemplo de ello es la solución nutritiva Steiner (1984) cuyo balanceo esta dado conforme a la relación entre los fertilizantes comerciales, las formas catiónicas y aniónicas de los macronutrientes y sus concentraciones (meq L⁻¹) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Concentración de iones en la solución nutritiva Steiner (1984).

Solución Nutritiva Universal Steiner						
Iones	Aniones			Cationes		
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻²	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²
%	60	5	35	35	45	20

La suma, en porcentaje de aniones es de 100 al igual que la de cationes lo cual indica que hay un balance entre ambos.

3.5.4 Procedimiento para realizar los cálculos de la solución nutritiva Steiner (1984).

- Definir la conductividad eléctrica (CE) a la cual se va a preparar la solución nutritiva. En este caso, 2 dS m⁻¹.

- b) Obtener la concentración (meq L⁻¹) de cada anión y catión de la solución nutritiva Steiner, el valor de la CE se divide entre 10 y el resultado se multiplica por cada uno de los valores en porcentaje de los aniones y cationes de la solución universal Steiner (1984) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Concentración de aniones y cationes, en porcentaje y meq L⁻¹, de la solución Steiner (1984) con CE de 2 dS m⁻¹.

Solución nutritiva universal Steiner						
	aniones			cationes		
Iones	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻²	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²
Porcentaje (%)	60	5	35	35	45	20
meq L ⁻¹ a 2 dS m ⁻¹	12	1	7	7	9	4

La suma de aniones es 20 meq L⁻¹ y la de cationes también, es decir, existe un balance entre ambos.

- c) El agua de la FES Iztacala tiene pH de 7.93, contiene 1.5 y 1.0 meq L⁻¹ de calcio y magnesio respectivamente (Laboratorio de calidad de aguas, UICSE, 2005). Para preparar la solución nutritiva se realizó el ajuste correspondiente (Cuadro 6).

Cuadro 6. Ajuste para preparar la solución nutritiva con el agua de la FES-Iztacala. Ojo cambie titulo

Solución nutritiva Universal Steiner						
	aniones			cationes		
Iones	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻²	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²
meq L ⁻¹	12	1	7	7	9	4
meq L ⁻¹ en el agua	0	0	0	0	1.5	1
Diferencia	12	1	7	7	7.5	3

- d) Las diferencias que se obtuvieron en el cuadro 6 son utilizadas para realizar el balance entre aniones y cationes con los fertilizantes comerciales (Cuadro 7).

Cuadro 7. Balance con los fertilizantes comerciales. Los valores de la diferencia coinciden con los de la suma.

Solución nutritiva Universal Steiner						
Fertilizantes	Aniones			Cationes		
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻²	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²
Diferencia	12	1	7	7	7.5	3
Nitrato de calcio	7.5				7.5	
Nitrato de potasio	3			3		
Sulfato de potasio			4	4		
Sulfato de magnesio			3			3
Ácido fosfórico		1				
Ácido nítrico	1.5					
Suma	12	1	7	7	7.5	3

e) Para obtener la cantidad de fertilizante se multiplican los valores obtenidos (meq L⁻¹) por el peso equivalente (PE) de cada compuesto (Cuadro 8).

Cuadro 8. Cantidades necesarias de fertilizante para la preparación de solución nutritiva Steiner (2 dS m⁻¹).

Fertilizante	Formula del compuesto	PM ²	V	PE	meq L ⁻¹	g L ⁻¹
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	236	2	118	7.5	0.885
Nitrato de potasio	KNO ₃	101	1	101	3	0.303
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	174	2	87	4	0.348
Sulfato de magnesio	MgSO ₄ .7H ₂ O	246	2	123	3	0.369
Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	98	3	32	1	32 µL
Ácido nítrico	HNO ₃	63	1	63	1.5	94.5 µL

²PM, peso molecular; V, valencia; PE, peso equivalente

3.5.5 Micronutrientes

Los micronutrientes se requieren en concentraciones ≤ 0.1 % (Salisbury y Ross, 1992). Son importantes porque realizan una función particular en el metabolismo de las plantas: Hierro, es componente estructural de muchas enzimas

y juega un papel importante en las reacciones redox. Manganeso, es constituyente de algunas enzimas y activador de descarboxilasas y deshidrogenasas de la respiración. Zinc, es componente esencial y activador de numerosas enzimas, también es necesario para biosíntesis de la clorofila y ácido indol acético. Cobre, es el principal activador de la super óxido dismutasa y constituyente de las plastocianinas. Boro, participa en el metabolismo y transporte de carbohidratos y en la síntesis de la pared celular. Molibdeno, participa en la asimilación de nitrógeno. Cloro es requerido durante la fotosíntesis y división celular. Níquel, es constituyente importante de la enzima ureasa.

Para que los micronutrientes estén presentes en la solución nutritiva pueden aplicarse en forma de mezcla comercial como Ultrasol o Tradecorp AZ. En este caso, la etiqueta indica la cantidad de micronutrientes a agregar por litro de solución. Tradecorp AZ indica 32 mg L⁻¹.

En el caso de que los micronutrientes se apliquen en forma individual, La cantidad a aplicar se muestra en el cuadro 9.

Cuadro 9. Compuestos que contienen micronutrientes y cantidad requerida por litro de solución nutritiva.

Compuesto	Micronutrientes				
	Formula química	PM del compuesto	PM del micronutriente	mg L ⁻¹ Requeridos por el cultivo	Cantidad de reactivo (mg L ⁻¹)
Ácido bórico	H ₃ BO ₃	61.81	10.81	0.5	2.8
Sulfato de Manganeso	MnSO ₄ .H ₂ O	168.93	54.93	0.7	2.2
Sulfato de zinc	ZnSO ₄ .7H ₂ O	287.39	65.39	0.09	0.4
Sulfato de cobre	CuSO ₄ .5H ₂ O	249.54	63.54	0.02	0.08
Molibdato de sodio	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	241.91	95.94	0.04	0.1
Quelato de fierro	EDTA	345.84	55.84	3.00	42.85

Para obtener la cantidad de micronutrientes, en mg L⁻¹, el peso molecular del compuesto se divide entre el peso molecular del elemento y el resultado se multiplica por la cantidad requerida por el cultivo.

El procedimiento para preparar la solución nutritiva se muestra en el apéndice (10.1).

3.6 Densidad de siembra

La población óptima en el cultivo es la cantidad máxima de plantas capaces de producir altos rendimientos por unidad de superficie, esto permite cultivar de forma eficiente y aprovechar mejor los recursos (Pasantes, 1972).

Con respecto a la densidad de siembra, un rápido crecimiento y una mayor expansión de hojas y raíces se presenta cuando no hay otras plantas competidoras en la cercanía; cuando hay mayor densidad, una planta que crece más rápido que su vecina, utilizará mayor cantidad de recursos disponibles e incrementará su tasa de crecimiento en general (Jollife y Gaye, 1995).

La competencia por la luz está dada por el dosel de un cultivo, el cual está conformado por el complejo arreglo espacial de las hojas que lo conforman, este actúa como captador de radiación, como intercambiador de vapor de agua y CO₂. El dosel vegetal también ejerce una influencia sobre la temperatura, concentración de vapor, fotosíntesis, transpiración, elongación celular, crecimiento y rendimiento (Montemayor *et al.*, 2006).

El rendimiento está dado por la capacidad que tiene el cultivo de acumular biomasa como materia fresca y seca en los órganos vegetales que serán cosechados, este incremento de biomasa garantiza el rendimiento de nuestros cultivos. La biomasa se acumula y distribuye en los vegetales según sean las características genóticas del cultivar que fácilmente son afectadas por el ambiente y su interacción. Así, la cinética de crecimiento y distribución de biomasa asignada a raíces, tallos y hojas se verán gobernadas por área foliar, número de hojas, altura de la planta, concentración de clorofila, clima, sustrato y su disponibilidad de nutrimentos (Heemst, 1986; Bakker *et al.*, 1995; Barrientos, 2015).

4.0 OBJETIVOS

4.1 General

Evaluar la conductividad eléctrica de la solución nutritiva, las propiedades físicas de tres sustratos inorgánicos y dos densidades de siembra en el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'.

4.2 Particulares

Determinar el efecto de tres conductividades eléctricas (0.8, 1.2 y 1.7 dS m⁻¹) de la solución nutritiva Steiner en el crecimiento (altura, número de hojas, área foliar) y rendimiento (biomasa fresca y seca) de rábano 'Champion'.

Determinar el efecto de las propiedades físicas (porosidad, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad) de tezontle, agrolita y vermiculita en el establecimiento de rábano 'Champion'.

Identificar cual densidad de siembra, 70 y 140 plantas m⁻² modifica el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'.

5.0 HIPOTESIS

5.1 General

La conductividad eléctrica de la solución nutritiva, las propiedades físicas de tres sustratos y dos densidades de siembra modifican la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de aireación o retención de humedad y la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa, las cuales pueden modificar el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion' en condiciones de invernadero.

5.2 Particulares

La conductividad eléctrica de la solución tiene relación directa con la cantidad de fertilizantes disueltos, conductividades eléctricas diferentes pueden influir el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'.

Los sustratos tienen propiedades físicas que modifican la porosidad, aireación y capacidad de retención de humedad, las cuales pueden influir en el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'.

La densidad de siembra puede sobreponer el follaje de las plantas e interferir con la radiación fotosintéticamente activa, esto puede tener efecto negativo en el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'.

6.0 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo, del 18 de agosto de 2016 al 19 de mayo de 2017, en el invernadero de la Unidad de Morfología y Función de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. Ubicada en avenida de los Barrios número 1, Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México. Las semillas de rábano 'Champion', las charolas de unicel para germinar, la agrolita y la vermiculita fueron adquiridas en una casa distribuidora de productos agrícolas en Texcoco, Estado de México. El tezontle se obtuvo de una casa distribuidora de materiales para la construcción y los contenedores de 40 x 70 x 15 cm (Figura 12) en una tienda de plásticos.



Figura 12. Caja plástica (polietileno de alta densidad) de 40 x 70 x 15 cm. Imagen propia.

6.1 Siembra, trasplante y diseño de tratamientos

Para evaluar el efecto de la conductividad eléctrica en el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion', nueve contenedores plásticos de 40 x 70 x 15 cm fueron llenados con 40 L de tezontle (partículas ≤ 5 mm) y humedecidas con 12.5 L de agua para llevarlos a capacidad de contenedor (CC). En cada contenedor se sembraron 77 semillas de rábano 'Champion' en forma equidistante y se mantuvieron, durante el ciclo de cultivo, entre 80 y 100 % de CC. Dos semanas después de la siembra, las nueve cajas se separaron en tres tratamientos para aplicar fertirriego con solución Steiner a tres conductividades eléctricas: a) 0.8, b) 1.2 y c) 1.7 dS m⁻¹ (Figura 13).

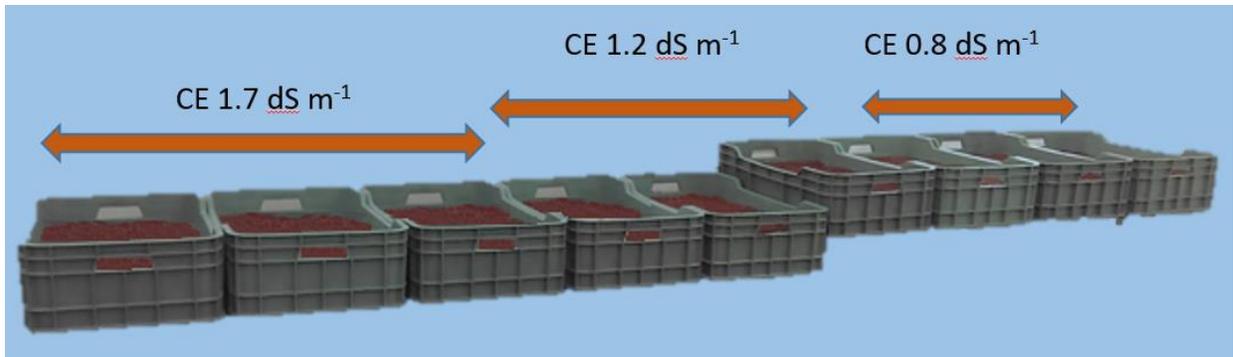


Figura 13. Diseño de tratamientos para el cultivo de rábano 'Champion' con tres conductividades eléctricas de la solución nutritiva. Unidades de muestreo, 3 por cada tratamiento.

Para evaluar el efecto de dos densidades de siembra, 70 o 140 plantas m^{-2} , equivalente a 20 o 40 plantas por contenedor, y tres sustratos inorgánicos, las semillas de rábano 'Champion' fueron germinadas en tezontle, agrolita y vermiculita contenidos en una charola de unigel con 200 cavidades (Figura 14).

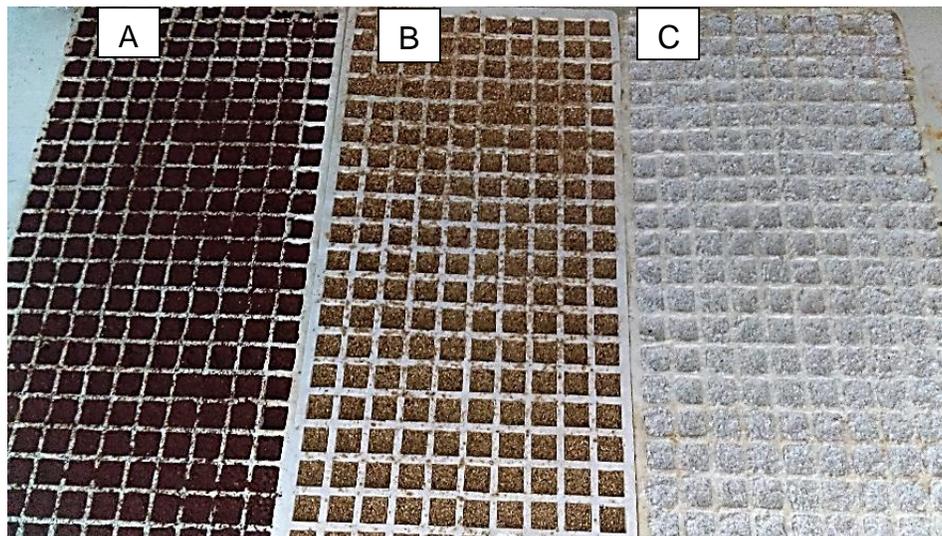


Figura 14. Germinadores de unigel con 200 cavidades. A, tezontle; B, vermiculita; C, agrolita.

Cuando el primer par de hojas estuvo bien desarrollado, se trasplantaron, 20 o 40 plántulas en seis contenedores plásticos de 40 x 70 x 15 cm conteniendo 20 L de tezontle, agrolita y vermiculita, de tal forma que las plántulas se mantuvieran, durante su ciclo de vida, en el mismo sustrato (Figura 15).

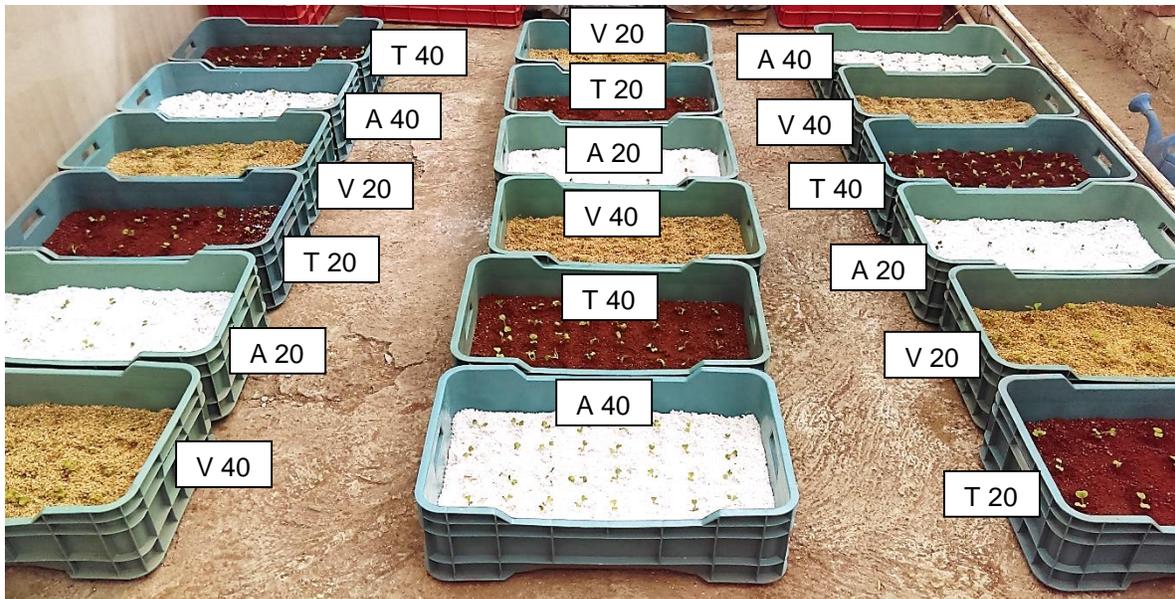


Figura 15. Distribución de tratamientos para el cultivo de rábano 'Champion' con dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos. Las unidades de muestreo están distribuidas al azar. A, agrolita; V, vermiculita; T, tezontle; 20 o 40, plantas por unidad experimental.

En cada unidad de muestreo, la humedad se mantuvo $\geq 80\%$ con solución nutritiva Steiner, CE, 1.7 d Sm^{-1} . Para eliminar el exceso de sales, cada semana se aplicó un riego con agua acidulada (pH, 5.0).

Evaluaciones:

a) Variables ambientales en el interior del invernadero. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%) e intensidad luminosa (lux) con dataloger, HOBO[®]. La intensidad luminosa (lux) fue convertida a pies candela (Fc), después fueron sumados los datos que corresponden a las mediciones de un día y divididos entre las 24 horas. Convertir Fc en PAR ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$), para esto, se multiplico por el factor de luz solar 0.20. Para convertir PAR en luz integrada diaria (DLI = $\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$) hay que multiplicar PAR y el factor 0.0864.

b) Propiedades físicas de tezontle, agrolita y vermiculita. Los sustratos fueron secados a 95°C por 24 h en un horno marca Reavel, modelo REA-II2240. Por triplicado se pesó 1 L de cada sustrato contenidos en un vaso de unicel y se les agregó un volumen conocido de agua hasta saturar completamente cada sustrato.

En la base de cada vaso se realizaron tres perforaciones de 5 mm de diámetro para drenar libremente el exceso de agua por 8 h y se registró el volumen de agua drenada (Figura 16).



Figura 16. Drenando agua del sustrato tezontle en vasos transparentes.

*Se calculó densidad aparente, porosidad, capacidad de aireación, capacidad de retención de humedad, capacidad de contenedor y porosidad total con las ecuaciones propuestas por Villegas *et al.* (2017). Ver anexo 10.2.

c) pH y conductividad eléctrica (CE) en el lixiviado de cada sustrato con el equipo Waterproof Tester marca HANNA.

d) Porcentaje de germinación a partir de 20 semillas de rábano 'Champion' colocadas por quintuplicado en contenedores plásticos de 14 x 14 cm conteniendo tezontle, agrolita y vermiculita (Figura 17).

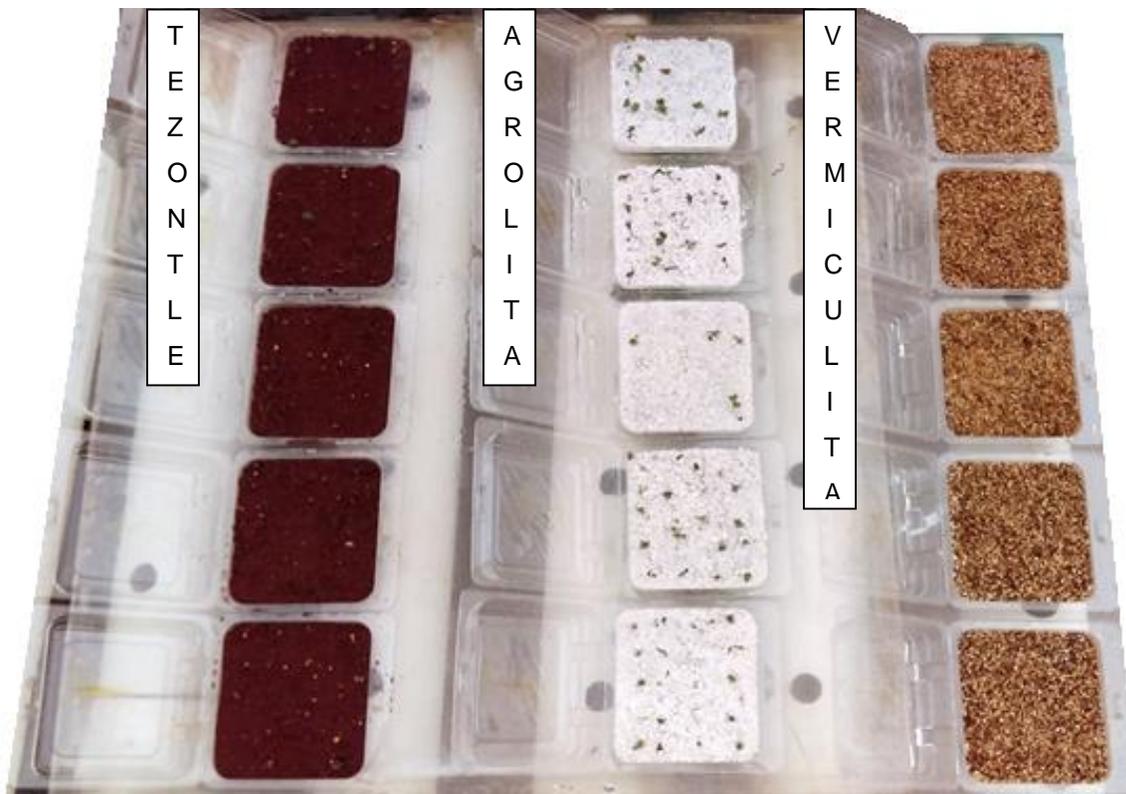


Figura 17. De izquierda a derecha, charolas de tereftalato de polietileno (PET) con tezontle, agrolita y vermiculita, cada una con 20 semillas distribuidas de manera equidistante.

Deforma semanal se evaluó:

- a) Numero de hojas
- b) Área foliar, con integrador de área foliar LI-COR® modelo Li-3000A.
- c) Altura de la planta con un flexómetro marca Truper®.
- d) Conductancia estomática con Porómetro de hoja, Decagon Devices, Inc.
- e) Unidades SPAD con Chlorophyll Content Meter marca Hansatech® modelo CL-01.
- f) Concentración de clorofila con acetona al 80 % (Bradley, 1987) en hojas de rábano 'Champion' con 6 tonalidades de color (amarillo a verde) para obtener

ecuaciones que relacionen la concentración de clorofila a, clorofila b o clorofila total con las unidades SPAD.

Durante la cosecha se evaluó:

- a) Biomasa fresca y seca de hojas, bulbo y raíz. Los pesos se registraron con una balanza digital modelo ES-1000H marca Velab® con 0.01 g de precisión. El secado del material se realizó a 80 °C por 24 h con un horno marca Reavel, modelo REA-II2240.
- b) Volumen del bulbo por desplazamiento de agua en una probeta graduada.
- c) Contenido de humedad = $100 - \left(\frac{PF-PS}{PF} \times 100 \right)$

6.2 Análisis estadístico

Los resultados se analizaron con estadística descriptiva, análisis de varianza de uno o dos factores y pruebas de comparación de medias (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), se utilizó el paquete estadístico SAS® 9.0 para Windows.

Los valores en porcentaje fueron transformados en arcoseno, para su análisis y después se volvieron a porcentaje para su interpretación en los cuadros o graficas.

7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Variables ambientales

De agosto de 2016 a mayo de 2017, la temperatura mínima fluctuó de 6 a 17°C, la promedio de 15 a 21 y la máxima de 25 a 43 °C. La humedad relativa mínima fue de 15 a 50, la promedio de 40 a 84 y la máxima de 61 a 94 %, mientras que la intensidad luminosa máxima fue de 172.04 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 18).

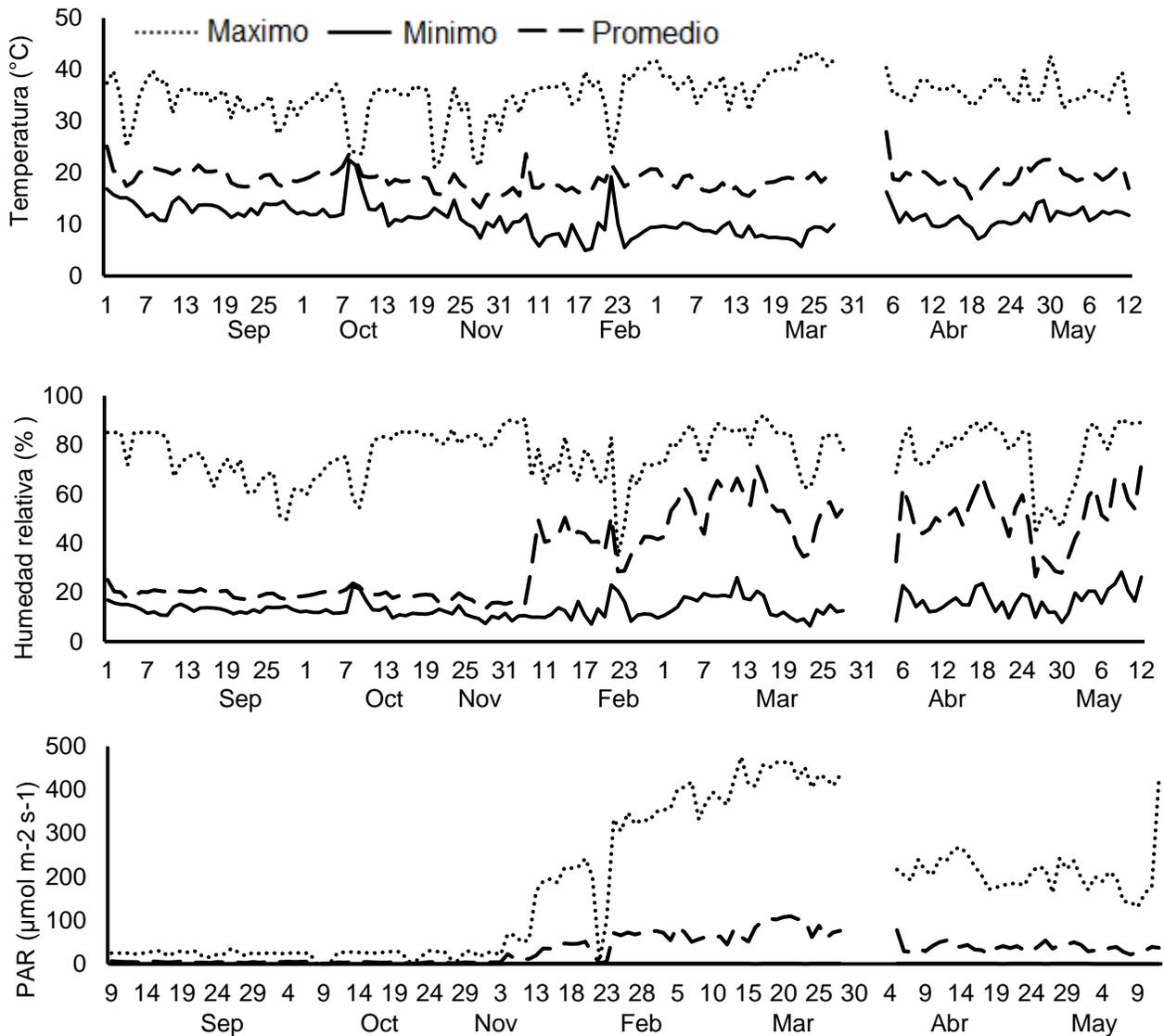


Figura 18. Temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa en el interior de invernadero de agosto de 2016 a mayo de 2017.

Los meses de septiembre a noviembre de 2016 corresponden al ciclo de cultivo donde se evaluó el efecto de la CE, mientras que el periodo de febrero a mayo de 2017 corresponde al ciclo de cultivo donde se determinó el efecto de dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos en el rendimiento de rábano 'Champion'.

Los valores de radiación fotosintéticamente activa fluctuaron desde 25 hasta 180 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$, suficiente para iniciar los eventos primarios de la fotosíntesis (Azcon-Bieto y Talon, 2008) ya que los puntos de compensación y saturación de luz para rábano 'Champion' son de 150 y 200 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente (Bukhov *et al.*, 1996; Matthew y Raymond, 2012).

Los valores de intensidad luminosa registrados por el datalogger se transformaron por medio de la fórmula de luz diaria integrada (DLI) y se obtuvo un valor que osciló entre 5.78 $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Torres y López (2010), mencionan que los cultivos en invernadero pueden ser de requerimientos bajos, 3 a 6 $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$; medios, 6 a 12 $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ y altos, 12 a 18 $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$. En este aspecto, la cantidad de luz que las hojas de rábano 'Champion' recibieron no causó efecto negativo en el rendimiento ya que genotípicamente, el cultivar está predispuesto a este tipo de condiciones ambientales.

7.2 Propiedades físicas, pH y conductividad eléctrica de los sustratos

Los valores de densidad aparente fueron de 0.12, 0.20 y 1.15 para, vermiculita, agrolita y tezontle respectivamente. La porosidad, porosidad total y la capacidad de retención de humedad tuvieron valores mayores en vermiculita, comparado con agrolita y tezontle, lo cual corrobora que éste último es el sustrato más pesado y vermiculita el más ligero. En cuanto a la capacidad de retención de humedad y capacidad de contenedor, la agrolita y vermiculita retienen más agua que el tezontle (Cuadro 10).

Cuadro 10. Propiedades físicas y químicas de tezontle, agrolita y vermiculita.

Sustratos	DA (g cm^{-3})	P (%)	CA (%)	CRH (%)	CC (mL^{-1})	PT (%)	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
Tezontle	1.148 a	41.3 c	9.8 c	31.5 b	315.00 b	56.430 c	6.97 a	946.33 a

Agrolita	0.201 b	56.66 b	16.36 b	40.30 a	403 a	91.031 b	6.19 b	33.00 b
Vermiculita	0.124 c	67.33 a	26.2 a	41.13 a	411.33 a	93.857 a	6.54 ab	28.67 b
DMS	0.0301	2.9167	5.1509	2.4771	24.771	1.1004	0.5131	181.54
CV	2.447	2.113	11.779	2.6267	2.6267	0.546	3.1183	21.5

²Letras iguales en cada columna indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, 0.05). Cada dato es el promedio de 3 repeticiones. DA, densidad aparente; P, porosidad; CA, capacidad de aireación; CRH, capacidad de retención de humedad; CC, capacidad de contenedor; PT, porosidad total; CE, conductividad eléctrica; DMS, diferencia mínima significativa; CV, coeficiente de variación.

En agrolita los valores de porosidad total, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad fueron similares a los reportados por Marfa *et al.* (1993), ellos mencionan valores de 94.8, 15.7 y 38.3 % respectivamente. En tezontle, Ojodeagua *et al.* (2008) reportan valores de 65.6, 17.4 y 27.9 % para porosidad total, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad. De éstas propiedades físicas, la vermiculita tiene los valores más altos en porosidad, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad 96, 18.5 y 45 % respectivamente y tezontle con la porosidad, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad más bajos (Martínez y Roca, 2011).

Con respecto a la CE, agrolita y vermiculita obtuvieron valores similares, sin embargo, en tezontle la CE fue de 0.94 dS cm⁻¹ 8 veces mayor a la reportada por Trejo *et al.* (2013) quienes obtuvieron 0.15 dS m⁻¹. Warnecke y Krauskopf, (1983) mencionan que la CE de los sustratos para cultivos hidropónicos se considera adecuada desde 0 hasta 2.0 dS m⁻¹. Si bien presentan algunas diferencias, los sustratos cuentan con lo necesario para el desarrollo radicular, la captación y disponibilidad de la solución nutritiva en el medio.

7.3 Germinación

La germinación de rábano 'Champion', al séptimo día, fue de 73 y 89% en vermiculita y agrolita, significativamente mayor que en tezontle cuya germinación fue de 63 % (Cuadro 11).

Cuadro 11. Germinación de rábano 'Champion' en tezontle, agrolita y vermiculita.

Sustrato	Tiempo después de siembra (d)				
	3	4	5	6	7
Tezontle	2.50 a	18.43 a	41.25 a	50.00 b	62.50 b
Agrolita	11.25 a	43.75 a	76.25 a	86.25 a	88.75 a
Vermiculita	1.66 a	20.00 a	56.66 a	65.00 ba	73.33 a
DMS	39.32	41.68	48.20	31.68	24.42
CV	192.27	51.11	29.90	19.15	13.22

²Letras iguales en cada columna indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, 0.05). Cada dato es el promedio de 5 repeticiones. DMS, diferencia mínima significativa; CV, coeficiente de variación. Para su análisis los datos fueron convertidos a arcoseno y después se volvieron porcentaje.

La germinación es estimulada por la hidratación de la semilla, agrolita y vermiculita tienen una capacidad de retención de humedad de 40 %, mientras que en tezontle es 30 %. Esto explica que en los sustratos con mayor retención de humedad la germinación haya sido ≥ 96 %. Resultados similares fueron obtenidos en frijol silvestre, en lechuga y pitahaya, al respecto, Nikolaos *et al.* (2009) observaron que al ser embebida la semilla de frijol silvestre esta duplicaba su peso, siendo la vermiculita el mejor en todos sus tratamientos. Por otra parte, Corres, (2006) concluye que las plantas de pitahaya responden adecuadamente a sustratos con buena aireación como la agrolita en comparación al suelo, obteniendo plántulas vigorosas en menor tiempo, por último, Gutiérrez *et al.* (2011) encontraron un porcentaje de germinación de lechuga en tezontle de 94 % debido a los poros que contribuyen a un buen drenaje, sin embargo, presenta otro tipo de poros que no permiten el intercambio de fluidos, estos retienen el 55 % al 70 % de humedad gravimétrica, por lo que obtuvo valores bajos en peso fresco y seco de la plántula de lechuga.

7.4 Conductividad eléctrica en el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'

Para determinar el efecto de la conductividad eléctrica en el crecimiento y desarrollo de rábano 'Champion', se evaluó semanalmente, número de hojas, área

foliar, altura de la planta, conductancia estomática, temperatura foliar, clorofila y unidades SPAD. En la cosecha se determinó la biomasa fresca y seca de raíces, bulbos y hojas, así como el volumen del bulbo.

7.4.1 Número de hojas

El número de hojas no fue afectado por la conductividad eléctrica de la solución nutritiva. En la quinta semana, después de la germinación, en las tres conductividades eléctricas (0.8, 1.2, 1.7 dS m⁻¹) el número de hojas fue de 6.1 sin diferencias significativas entre tratamientos (Figura 19).

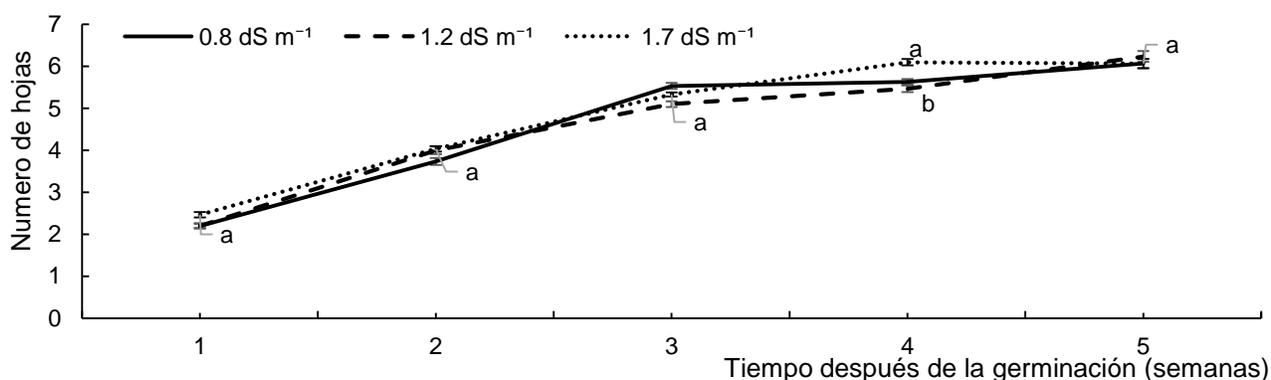


Figura 19. Número de hojas de rábano 'Champion' fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas. Cada dato es el promedio de 30 repeticiones \pm error estándar, letras iguales en cada tiempo de evaluación indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

El número de hojas fue similar al reportado por Ramírez y Pérez (2006), ellos indican que para rábano rojo comercial cultivado con biosólido mezclado con suelo y cosechado a los 38 días después de la siembra, un máximo de 9 hojas cuando se mezcla biosólido con suelo, el rábano tendrá menos de seis hojas cuando solo tiene biosólido. Laguna y Cisne (2011), para rábano Cherry Belle que tuvo de 5.35 a 6.25 hojas al momento de la cosecha, 25 días después de la siembra.

Las concentraciones de solución nutritiva Steiner (0.8, 1.2, 1.7 dS m⁻¹) no mostraron diferencias significativas en el número de hojas. Esto no significa que la eficiencia fotosintética para el llenado del bulbo es similar en el follaje de los tres tratamientos debido a la repartición de fotoasimilados.

7.4.2 Área foliar

En las dos primeras semanas, el área foliar no mostro diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, en la tercera y cuarta semana, después de la germinación, las plantas de rábano 'Champion' fertirrigadas con solución nutritiva Steiner a una conductividad de 1.7 dS m^{-1} tuvieron mayor área foliar comparado con las que se fertirrigaron con 0.8 y 1.2 dS m^{-1} . Para el tiempo de cosecha que coincidió con la quinta semana, el área foliar fue similar en cada uno de los tres tratamientos (Figura 20).

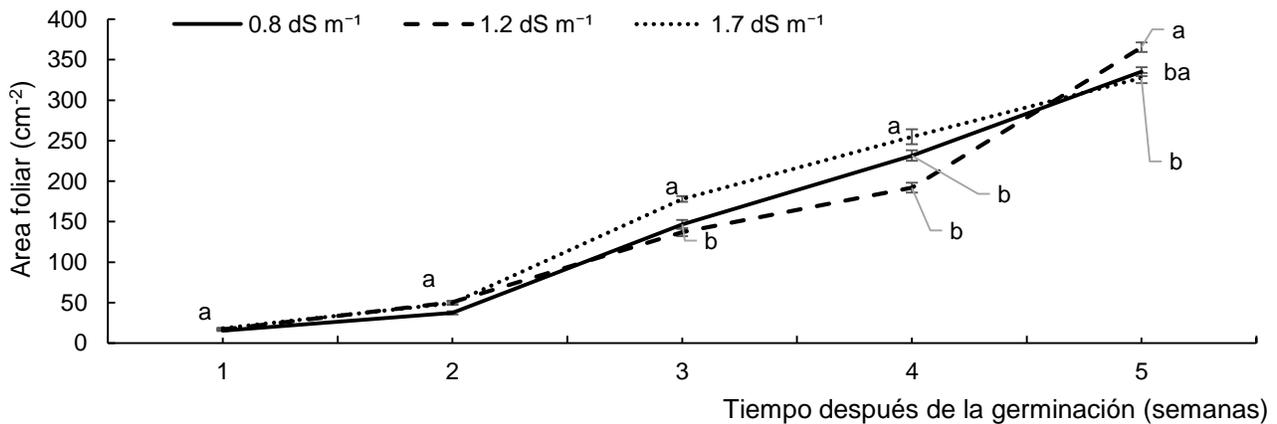


Figura 20. Área foliar de rábano 'Champion' fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas. Cada dato es el promedio de 30 repeticiones \pm error estándar, letras iguales en cada tiempo de evaluación indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

El área foliar tiene una relación directa con la eficiencia fotosintética, la solución nutritiva preparada a 1.7 dS m^{-1} promovió el incremento del área foliar, de manera indirecta, a la acumulación de fotoasimilados para el llenado del bulbo de rábano 'Champion' (Taiz y Zeiger, 2002).

Samarakoon *et al.* (2006), cultivaron lechuga hidropónicamente con solución nutritiva a CE de 1.4 , 2 y 3 dS m^{-1} , se obtuvo mayor área foliar con 1.4 dS m^{-1} , mencionan que al incrementar la CE se reduce el área foliar. Cepeda *et al.* (2014), observaron un aumento en el área foliar de lechuga var. Iceberg con 2.5 dS m^{-1} , con 2.19 , 2.84 y 3.3 dS m^{-1} fue menor. Para el caso de rábano 'Champion', el área foliar se incrementó con la solución más concentrada porque es la óptima para su crecimiento.

7.4.3 Altura de la planta

En las primeras dos semanas, la altura de la planta no mostró diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, en la tercera y cuarta semana después de la germinación, las plantas de rábano ‘Champion’ fertirrigadas con solución preparada a una conductividad eléctrica de 1.7 dS m^{-1} tuvieron mayor altura, 28 cm, comparada con las que fueron fertirrigadas con 0.8 y 1.2 dS m^{-1} las cuales tuvieron 23 cm de altura. En la semana cinco, los tres tratamientos tuvieron crecimiento similar (Figura 21).

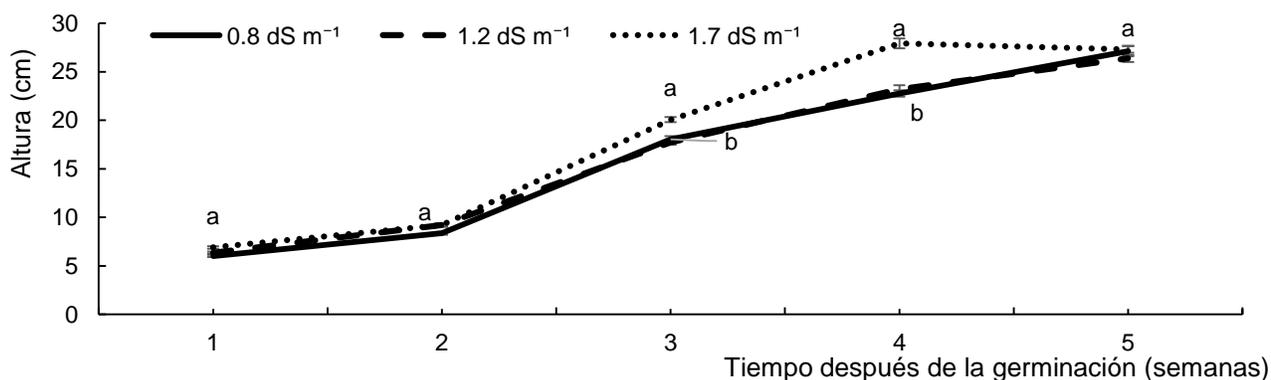


Figura 21. Altura de rábano ‘Champion’ fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas. Cada dato es el promedio de 30 repeticiones \pm error estándar, letras iguales en cada tiempo de evaluación indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Para el cultivo de rábano ‘Champion’ se reportan fertirriegos con solución nutritiva cuyas conductividades eléctricas varían de 1.5 a 2.5 dS m^{-1} , valores superiores dificultan la absorción de nutrientes ya que aumentan la presión osmótica de la solución nutritiva, mientras valores $\leq 0.5 \text{ dS m}^{-1}$ pueden ocasionar deficiencia nutrimental y disminución del bulbo (Trejo y Gómez, 2012). En este caso la solución con 1.7 dS m^{-1} mejoró la altura de rábano ‘Champion’.

7.4.4 Conductancia estomática y temperatura foliar

La conductancia estomática se mantuvo sin diferencias entre tratamientos hasta la tercera semana después de la germinación. En la semana tres y cuatro, las plantas de rábano fertirrigadas con solución nutritiva, preparada a 0.8 dS m^{-1} , tuvieron mayores valores de conductancia estomática (Cuadro 12).

Cuadro 12. Conductancia estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de rábano 'Champion' fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas.

Tratamiento CE (dS m^{-1})	Tiempo después de trasplante (sem)			
	1	2	3	4
0.8	86.67a ²	45.03a	120.43a	88.00a
1.2	101.72a	50.02a	66.32a	62.27ba
1.7	109.18a	75.28a	33.02a	33.20b
DMS	45.77	30.81	41.35	38.29
CV	30.77	36.19	37.64	24.99

²Letras iguales en cada columna indican que no hubo diferencias significativas (Tukey $\alpha \leq 0.05$). Cada dato es el promedio de 6 repeticiones. CE, conductividad eléctrica; DMS, diferencia mínima significativa; CV, coeficiente de variación.

Los valores similares en las semanas uno, dos y tres indican que el crecimiento de rábano 'Champion' no fue afectado por la conductividad eléctrica de la solución nutritiva. Sin embargo, conforme se incrementa el área foliar y la fase fenológica se aproxima a la etapa reproductiva (semana 4), el fertirriego con la conductividad eléctrica menor favorece la conductancia estomática.

Africano y Pinzon, (2014), trasplantaron plántulas de rábanos sometidos a estrés salino a una CE de 7 dS m^{-1} , presentaron diferencias significativas en la conductancia estomática luego de 15 días bajo tratamiento, el tratamiento control obtuvo $110 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en comparación con $10 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de las que tuvieron estrés salino. Los valores de conductancia estomática, en este estudio, 33 a $110 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, pueden ser el reflejo de ajuste osmótico en *Raphanus sativus* L. 'Champion' por efecto ambiente del invernadero y no de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva.

A excepción de la primera semana, la temperatura foliar mostró diferencias significativas entre tratamientos, durante el experimento, la temperatura foliar siempre fue menor a la registrada dentro del invernadero (Figura 22).

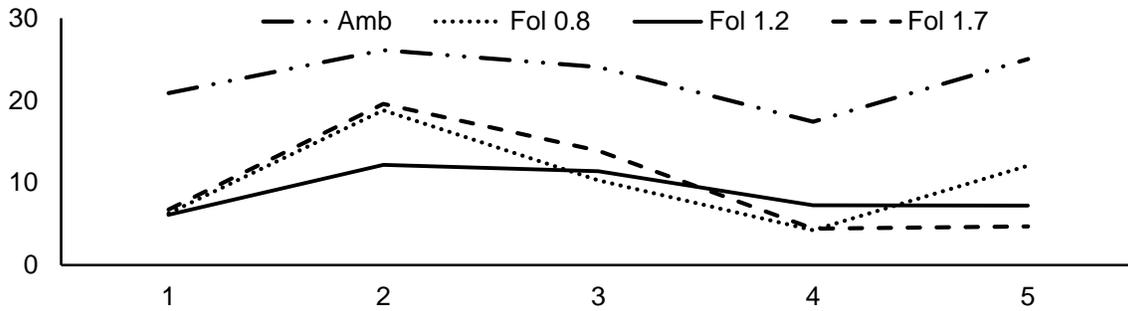


Figura 22. Temperatura foliar de rábano ‘Champion’ fertirrigado con solución Steiner preparada a tres conductividades eléctricas. Amb, temperatura ambiente; Fol, temperatura foliar. Cada dato es el promedio de 30 repeticiones \pm error estándar, letras iguales en cada tiempo de evaluación indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Jackson *et al.* (1981) midió en *Triticum sativum* L. la temperatura foliar durante la fase de maduración a medio día, cuando la temperatura ambiente era de 35 °C, obtuvo un promedio de 5 y un rango de 2 a 9 °C menos que la temperatura ambiente. López *et al.* (2009) mencionan que cuando una planta transpira sin estrés hídrico, el rango de temperatura foliar oscila de 1 a 4 °C menos que la temperatura ambiente.

En las hojas de rábano ‘Champion’, la temperatura foliar siempre fue de 4 a 12 °C menor a la temperatura ambiental, lo cual indica que no estuvieron en un déficit hídrico, permitiendo la captación CO₂ y radiación fotosintética, así como la producción de fotoasimilados y el libre flujo de nutrientes aportados por la solución nutritiva Steiner.

7.4.5 Relación Unidades SPAD vs concentración de clorofila

Los valores de Unidades SPAD (USPAD) y los de concentración de clorofila se incrementaron con el aumento de tonalidad de color (Cuadro 13).

Cuadro 13. USPAD y concentración de clorofila ($\mu\text{g cm}^{-2}$) en hojas de rábano ‘Champion’.

Tonalidad	SPAD	clorofila a	clorofila b	clorofila a/b	clorofila total
1 ^z	0.55	0.44	0.25	1.85	0.69
2	1.10	0.60	0.22	2.70	0.82
3	1.35	0.74	0.24	3.07	0.98
4	3.70	1.31	0.40	3.27	1.71
5	5.40	2.50	0.76	3.28	3.26
6	16.65	3.71	1.10	3.36	4.82

^z1 indica tonalidad amarillenta y 6 una tonalidad verde obscura.

Con los valores del cuadro 13, se realizó un análisis de correlación de Pearson (Cuadro 14).

Cuadro 14. Correlación Pearson

	USPAD	clorofila a/b	clorofila total	clorofila b	clorofila a
clorofila a	0.947	0.662	0.999	0.995	1.000
clorofila b	0.947	0.589	0.997	1.000	
clorofila total	0.948	0.646	1.000		
clorofila a/b	0.561	1.000			
USPAD	1.000				

La concentración de clorofila a, b y total fueron significativas al 95 % y tuvieron un coeficiente de correlación con las USPAD ≥ 0.89 . Con los valores de la pendiente y ordenada al origen de cada par de variables se construyeron ecuaciones que relacionan la concentración de clorofila con las USPAD (Cuadro 15).

Cuadro 15. Ecuaciones que relacionan las USPAD con la concentración de clorofila.

Estimación de Clorofila ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Ecuación	Pvalue
Ecuación	$y = m x + b$	
a	Clorofila 'a' = 4.44607 (SPAD) + (- 2.11436)	0.004
b	Clorofila 'b' = 16.06743 (SPAD) + (- 3.19968)	0.004
Total	Clorofila 'total' = 3.48771 (SPAD) + (- 2.36042)	0.0039

Uddling *et al.* (2007) y Cassol *et al.* (2008) encontraron una correlación directa, $R^2 = 0.64$, entre la cuantificación de clorofila con acetona al 80 % y las USPAD en hojas de papa, abedul, trigo y rábano. En este trabajo se realizó la misma correlación y se obtuvo una $R^2 = 0.94$ para clorofila a, b y total.

Las USPAD indican, en forma indirecta, la concentración de clorofila por la intensidad de color de las hojas, es un método no destructivo y rápido (minutos) de registrar. La cuantificación de clorofila con acetona al 80 % es un método destructivo que implica horas para su realización. Las ecuaciones propuestas en este trabajo permiten estimar la concentración de clorofila en rábano 'Champion', a partir de las USPAD.

7.4.6 Concentración de clorofila

En este trabajo se obtuvieron registros de USPAD en hojas de rábano 'Champion', en las semanas 1, 2, 3, 4 y 5 después de la germinación sin que se observaran diferencias significativas por efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva. Los valores de USPAD fluctuaron de 5.61 a 9.20, lo que equivale para clorofila total de 17.20 a 29.72 $\mu\text{g cm}^{-2}$.

Zhang *et al.* (2007) encontraron una fuerte variación estacional en el contenido de clorofila, debido a la etapa de crecimiento y expansión de las hojas. En este trabajo, la estimación de clorofila por USPAD se incrementó conforme transcurrió el ciclo fenológico de rábano 'Champion', pero no hubo efecto por la conductividad eléctrica de la solución nutritiva.

Aunque el nivel de concentración de nutrientes en solución nutritiva era diferente entre tratamientos, el rábano 'Champion' no se vio afectado en la concentración de clorofilas, lo que me hace suponer que el aumento o disminución de la concentración de clorofila no se vio afectada por la concentración de nutrientes en la solución nutritiva.

7.4.7 Biomasa fresca, biomasa seca y contenido de humedad

La biomasa fresca y el contenido de humedad de hojas o bulbos fue similar en, las plantas de rábano 'Champion', fertirrigadas con solución nutritiva de 1.2 o 1.7 dS m^{-1} . Sin embargo, las que se cultivaron con 0.8 dS m^{-1} tuvieron menor biomasa seca de bulbos (Cuadro 16).

Cuadro 16. Biomasa fresca, biomasa seca y contenido de humedad en plantas de rábano 'Champion', fertirrigadas con solución nutritiva a tres conductividades eléctricas.

Tratamientos	Biomasa fresca		Biomasa seca		Contenido de Humedad	
	Hojas	Bulbo	Hojas	Bulbo	Hojas	Bulbo
0.8 dS m^{-1}	11.66a ^z	4.16a	0.96a	0.22c	91.55a	94.72a
1.2 dS m^{-1}	12.36a	6.00a	0.85a	0.33b	92.92a	94.41a
1.7 dS m^{-1}	13.40a	8.67a	1.03a	0.49a	92.24a	94.24a
DMS	7.51	4.73	0.48	0.04	4.09	0.98

CV	24.05	29.94	20.40	38.88	21.06	7.12
----	-------	-------	-------	-------	-------	------

²Letras iguales en cada columna, dentro de cada factor, indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Cada dato es el promedio de 3 repeticiones; CE, conductividad eléctrica; DMS, diferencia mínima significativa; CV, coeficiente de variación.

González, (2017), no encontró diferencias en la biomasa seca de rábano 'Champion' fertirrigado con solución Steiner (1984), preparada con agua residual o con agua potable, ya que en ambas el balance final entre aniones y cationes fue similar. En este caso, la solución con conductividad eléctrica de 0.8 disminuyó la biomasa seca del bulbo, mientras que las de 1.2 y 1.7 dS m⁻¹ la incrementaron.

La longitud de raíces fluctuó entre 7.68 a 8.67 cm sin diferencia entre tratamientos. Ochoa y Mendoza (2015) registraron en rábano 'Crimson Giant' cultivados en suelo con diferentes enmiendas orgánica, raíces con longitud de 11.65 cm. La longitud menor en rábano 'Champion' puede atribuirse que los elementos esenciales estuvieron siempre disponibles en la rizosfera, mientras que las enmiendas orgánicas pudieron presentar deficiencias de algún elemento y así estimular la longitud de raíces.

7.5 Efecto de dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos en el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion'

Para determinar el efecto de dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos en el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion', se evaluaron semanalmente número de hojas, área foliar, altura de la planta y unidades SPAD. En la cosecha se determinó biomasa fresca y seca de raíces, bulbos y hojas, así como el volumen del bulbo.

7.5.1 Número de hojas

Las plantas de rábano 'Champion' cultivada en tezontle tuvieron mayor número de hojas comparadas con las que se cultivaron en vermiculita o agrolita. Con respecto a las densidades de siembra, el número de hojas fue similar hasta la semana cuatro, sin embargo, en la semana 5 y 6 las plantas con densidad de

siembra 70 plantas m⁻² tuvieron mayor número de hojas. La interacción sustrato*densidad fue significativa (Cuadro 17).

Cuadro 17. Numero de hojas de rábano ‘Champion’ cultivado con dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos.

Factores	Tiempo después del trasplante (semanas)					
	1	2	3	4	5	6
Sustrato						
Tezontle	2.00a ^z	3.94a	5.13a	6.22a	7.36a	8.50a
Agrolita	2.05a	2.77b	4.41b	5.50b	6.27c	7.05c
Vermiculita	1.72b	2.94b	4.38b	5.50b	6.61b	7.72b
DMS	0.26	0.59	0.45	0.52	0.32	0.46
CV	16.94	22.93	12.24	11.43	6	7.44
Densidad (plantas m ⁻²)						
70	2.00a	3.22a	4.81a	5.85a	6.92a	8.00a
140	1.85a	3.22a	4.48b	5.62a	6.57b	7.51b
DMS	0.17	0.4	0.31	0.35	0.22	0.31
CV	16.94	22.93	12.24	11.43	6.00	7.44
S*D	**	**	**	**	**	**

^zLetras iguales en cada columna, dentro de cada factor, indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Cada dato es el promedio de 9 repeticiones; DMS, diferencia mínima significativa; CV, coeficiente de variación; S*D, interacción sustrato densidad; **, indica interacción significativa.

El número de hojas es un parámetro importante ya que se encuentra relacionado con la radiación incidente y con la acumulación de fotoasimilados para el crecimiento de las plantas. Ochoa y Mendoza, (2015) y Kumar *et al.* (2016) reportan de 8 a 14 hojas en rábano. Sin embargo, en éste experimento, el rábano ‘Champion’ tuvo, al momento de la cosecha, entre 7 y 8 hojas.

7.5.2 Área foliar

Las plantas de rábano ‘Champion’ cultivadas en tezontle tuvieron mayor área foliar durante la semana 2 y 3, sin embargo, en las semanas posteriores no hubo diferencias entre sustratos. Con respecto a la densidad de siembra, el área foliar fue mayor en las semanas 4,5 y 6 con densidad de siembra 70 plantas m⁻². Excepto en

la semana uno, la interacción sustrato*densidad de siembra fue significativa (cuadro 18).

Cuadro 18. Área foliar de rábano 'Champion' cultivado con dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos.

Factores	Tiempo después del trasplante (sem)					
	1	2	3	4	5	6
Sustrato						
Tezontle	10.34a ^z	32.02a	59.93a	144.46a	177.96a	211.46a
Agrolita	9.97a	22.31b	49.61b	151.82a	189.2a	226.57a
Vermiculita	9.57a	22.78b	49.14b	132.85a	192.93a	253.01a
DMS	1.51	7.4	8.73	30.72	31.85	57.05
CV	18.81	35.73	20.49	26.24	21.16	30.72
Densidad (plantas m ⁻²)						
70	9.42b	24.21a	51.04a	159.57a	211.55a	263.52a
140	10.50a	27.20a	54.74a	126.51b	161.84b	197.17b
DMS	1.02	5.02	5.93	20.85	21.62	38.72
CV	18.81	35.73	20.49	26.24	21.16	30.72
S*D	NS	**	*	**	**	*

^zLetras iguales en cada columna, dentro de cada factor, indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Cada dato es el promedio de 9 repeticiones; DMS, diferencia mínima significativa; CV, coeficiente de variación; S*D, interacción sustrato densidad; * o **, indica interacción significativa; NS, no significativa.

Criollo y García, (2009), mencionan que el área foliar (AF) se incrementa con la densidad de siembra. No obstante, llega un momento en el cual el AF de la densidad inferior (50 plantas m⁻²) se equipara y sobrepasa al AF de la densidad de siembra mayor (200 plantas m⁻²).

En este caso, el cultivo con 70 plantas m⁻² tuvieron AF mayor a partir de la semana 4 después del trasplante. Este efecto está asociado a la distancia entre las plantas, ya disponen de mayor espacio para la expansión foliar. Además de que el genotipo típico de rábano no requiere mucha luz (3 a 6 mol m⁻² d⁻¹) por lo que tiende a poseer hojas con amplia área foliar.

7.5.3 Altura de la planta

La altura, hasta la semana 4, fue mayor en las plantas cultivadas en tezontle. En las semanas 5 y 6 no hubo diferencias entre los tres sustratos. Con respecto a la densidad de siembra, las plantas que crecieron con densidad de 140 plantas m⁻² tuvieron menor altura en las semanas 3, 4 y 5, en la sexta, ambas tuvieron altura similar. En las semanas 5 y 6, la interacción sustrato*densidad fue no significativa (Cuadro 19).

Cuadro 19. Altura de las plantas de rábano 'Champion' cultivado con dos densidades de siembra y tres sustratos inorgánicos.

Factores	Tiempo después del trasplante (sem)					
	1	2	3	4	5	6
Sustrato						
Tezontle	5.56a ^z	8.96a	13.82a	17.83ba	22.40a	26.96a
Agrolita	4.35b	4.73c	11.41b	18.09a	22.09a	26.31a
Vermiculita	3.46c	6.19b	11.05b	14.88b	20.5a	26.23a
DMS	0.84	1.35	1.7	2.99	2.47	3.53
CV	23.49	25.29	17.49	21.93	14.14	16.55
Densidad (plantas m ⁻²)						
70	4.76a	6.18a	11.03b	15.91b	21.01a	26.12a
140	4.15b	7.07a	13.16a	17.97a	22.35a	26.88a
DMS	0.57	0.918	1.15	2.03	1.67	2.4
CV	23.49	25.29	17.49	21.93	14.14	16.55
S*D	**	**	**	*	NS	NS

^zLetras iguales en cada columna, dentro de cada factor, indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Cada dato es el promedio de 9 repeticiones; DMS, diferencia mínima significativa; CV, coeficiente de variación; S*D, interacción sustrato densidad; * o **, indica interacción significativa; NS, no significativa.

La altura de la planta depende de la acumulación de fotoasimilados que se producen durante la fotosíntesis y de la disponibilidad de nutrientes en el sustrato (Somarriba, 1998). Al momento de la cosecha, de rábano 'Champion', la altura osciló entre 31 y 37 cm, la cual coincide con lo reportado por Ochoa y Mendoza (2015). La altura mayor en el cultivo de 140 plantas m⁻² se explica por competencia

por la luz, ya que la densidad de siembra reduce la incidencia de la radiación fotosintéticamente activa y estimula la elongación del tallo (Taiz y Zeiger, 2012).

7.5.4 Conductancia estomática y temperatura foliar

Durante el ciclo del cultivo, los valores de conductancia estomática oscilaron entre 50 y 120 mmol m⁻² s⁻¹ y los de temperatura foliar entre 15 y 20 °C, sin mostrar diferencias entre sustratos o densidades de siembra.

7.5.5 Estimación de clorofila con unidades SPAD

La estimación de clorofila, evaluada con unidades SPAD, fue mayor en las plantas cultivadas en tezontle, con respecto a la densidad de siembra, no hubo diferencias. Excepto en la semana tres, la interacción sustrato*densidad de siembra fue significativa (Cuadro 20).

Cuadro 20. Estimación de clorofila con unidades SPAD en hojas de rábano ‘Champion’ cultivado con tres sustratos inorgánicos y dos densidades de siembra.

Factores	Tiempo después del trasplante (sem)					
	1	2	3	4	5	6
Sustrato						
Tezontle	8.73a ^z	9.08a	9.06a	10.36a	10.96a	12.00a
Agrolita	5.55b	7.16b	7.42b	7.54b	8a	8.83b
Vermiculita	8.49a	8.10ba	7.42b	7.38b	8.41a	10.59a
DMS	1.78	1.4	1.63	1.99	1.5	1.51
CV	29.09	21.54	25.44	29.41	20.41	17.9
Densidad (plantas m⁻²)						
70	8.24a	8.55a	7.88a	8.28a	9.05a	9.65b
140	6.93b	7.68a	8.06a	8.58a	9.20a	11.30a
DMS	1.2	0.95	1.1	1.35	1.02	1.027
CV	29.09	21.54	25.44	29.41	20.41	17.9
S*D	**	*	NS	**	**	**

^zLetras iguales en cada columna, dentro de cada factor, indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Cada dato es el promedio de 9 repeticiones; DMS, diferencia mínima significativa; CV, coeficiente de variación; S*D, interacción sustrato densidad; * o **, indica interacción significativa; NS, no significativa.

Calvo *et al.* (2008), evaluaron el efecto de cinco sustratos en el crecimiento, contenido foliar de nutrientes y clorofila en tres especies forestales. Los valores más

bajos de USPAD fueron encontrados en sustratos con baja capacidad de retención de humedad y ricos en nutrientes.

En este trabajo los valores mas altos de USPAD se encuentran relacionados al sustrato tezontle, la cantidad de nutrientes fertirrigados fue igual en todos los sustratos, en pero, la retención de humedad es menor en sustrato tezontle que en vermiculita y agrolita, probablemente existe otro factor presente en el sustrato tezontle que infiera en la concentración de clorofila de rábano ‘Champion’.

7.5.6 Biomasa fresca, biomasa seca y contenido de humedad

La biomasa fresca y seca bulbos, hojas y el volumen de los bulbos fueron similares en los tres sustratos, pero la biomasa seca de raíces fue mayor cuando se utilizó como sustrato al tezontle. De manera contrastante, la longitud de raíces fue mayor en agrolita o vermiculita que en tezontle.

Con respecto a la densidad de siembra, la biomasa fresca y seca de raíces, bulbos y hojas, así como la longitud de raíces y el volumen de los bulbos fueron mayores cuando el cultivo se realizó con densidad de siembra de 70 plantas m⁻². Las interacciones fueron tanto NS como significativas (Cuadro 21).

Cuadro 21. Biomasa fresca, biomasa seca, longitud de raíz y volumen de bulbo en plantas de rábano ‘Champion’ cultivado con tres sustratos inorgánicos y dos densidades de siembra.

Factores	Biomasa fresca (g)			Biomasa seca (g)			Longitud de raíz (cm)	
	Raíz	Bulbo	Hoja	Raíz	Bulbo	Hoja	Raíz	Bulbo
Sustrato								
Tezontle	0.28a	8.55a	13.14a	0.03a	0.44a	1.01a	3.91b	9.05a
Agrolita	0.22a	11.46a	12.65a	0.02b	0.61a	0.95a	4.30ba	11.83a
Vermiculita	0.35a	10.41a	13.61a	0.02b	0.53a	1.01a	5.00a	10.63a
DMS	0.14	5.94	3.85	0.009	0.3	0.28	0.91	5.99
CV	64.44	72.71	36.39	36.69	70.56	35.53	25.68	70.79
Densidad (Plantas m ⁻²)								
70	0.34a	13.38a	14.90a	0.03a	0.68a	1.11a	4.90a	13.74a
140	0.22b	6.90b	11.36b	0.02b	0.37b	0.86b	3.90b	7.27b
DMS	0.1	4.03	2.61	0.06	0.2	0.19	0.61	4.07
CV	64.44	72.71	36.39	36.69	70.56	35.53	25.68	70.79
S*D	*	*	NS	**	*	NS	**	*

²Letras iguales en cada columna, dentro de cada factor, indican que no hubo diferencias significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Cada dato es el promedio de 9 repeticiones; DMS, diferencia mínima significativa; CV, coeficiente de variación; S*D, interacción sustrato densidad; * o **, indica interacción significativa; NS, no significativo.

Sonnevel y van den Bos, (1995), evaluaron el crecimiento y la calidad de rábano cultivado en sustrato arena y lana de roca, con diferentes conductividades eléctricas de 1 a 6 dS m⁻¹, obtuvieron una respuesta desfavorable con el sustrato arena ya que provocó resistencia a la raíz para su desplazamiento y menor retención de agua, al momento de comparar biomasa seca se observaron diferencias entre sustratos y no en la CE de la solución.

Para incrementar la longitud de las raíces se requieren sustratos porosos con alta capacidad de retención de humedad, similares a la agrolita o la vermiculita (Ortega-Martínez *et al.*, 2010; Azcon-Bieto y Talón, 2008). En este caso, agrolita y vermiculita incrementaron la longitud de las raíces comparados con el tezontle, que sin embargo promovió el peso seco. Esto indica que las raíces, de rábano 'Champion', cultivadas en tezontle fueron más cortas y gruesas, mientras que las cultivadas en agrolita o vermiculita fueron delgadas y de mayor longitud.

Una alta densidad de siembra disminuye la radiación incidente y afecta el rendimiento del bulbo debido a que las hojas compiten por fotoasimilados (Paez *et al.*, 2000). Criollo y García (2009) mencionan que el tamaño del fruto disminuye cuando se incrementa la densidad de siembra a 175 plantas m⁻². En este trabajo, el rendimiento, evaluado como biomasa seca o fresca, fue mayor cuando el cultivo se realizó con la densidad de siembra de 70 plantas m⁻².

8.0 CONCLUSIONES

El fertirriego con solución nutritiva de 1.7 dS m^{-1} promueve el crecimiento y rendimiento de los bulbos de rábano 'Champion'.

En agrolita y vermiculita, la porosidad, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad que promueven la germinación y el crecimiento de las plántulas de rábano 'Champion'.

El rendimiento de rábano 'Champion', evaluado como biomasa fresca o seca, es similar si el cultivo se realiza en tezontle, agrolita o vermiculita.

Las raíces de rábano 'Champion' tienen mayor longitud y son más delgadas cuando se cultivan en agrolita o vermiculita, mientras que en tezontle son cortas y más gruesas.

El fertirriego con solución nutritiva Steiner preparada a una conductividad eléctrica de 1.7 dS m^{-1} y la densidad de siembra de $70 \text{ plantas m}^{-2}$, favorecen el crecimiento y rendimiento de rábano 'Champion', los sustratos no tienen efecto, por lo que puede utilizarse el que esté disponible, ya sea tezontle, agrolita o vermiculita.

9.0 REFERENCIAS

- Africano P.K.L., Pinzón S.E.H. 2015. Comportamiento fisiológico de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) sometidas a estrés por salinidad. Conexión Agropecuaria JDC. 4(2):13-24.
- Aguilar-García L., Escalante-Estrada J.A., Fucikovsky-Zak L., Tijerina-Chávez L., Mark Engleman E. 2005. Área foliar, tasa de asimilación neta, rendimiento y densidad de población en girasol. Terra Latinoamericana. 23(3):303-310.
- Alcántar G., Trejo T. 2009. Nutrición de cultivos. 1ra. ed. Colegio de Posgraduados - Mundi-Prensa. México. 454 pp.
- Azcon B., Talon M. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. 2da. ed. McGraw-Hill Interamericana. España. 669 pp.
- Bakker, J.C., Bot, G.P.A., Challa, H., Van de Braak, N.J. 1995. Greenhouse climate control: an integrated approach. Wageningen Academic Publishers. A.E. Wageningen, the Netherlands. 293 pp.
- Barrientos Llanos H., del Castillo Gutiérrez, C.R., García Cárdenas M. 2015. Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales. 2(1):76-86.
- Beltrano J., Giménez D. 2015. Cultivo en Hidroponía. Primera ed. Editorial de la Universidad de La Plata. Argentina. 181 pp.
- Bradley S.Moore. 1987. Methods in enzymology. pp. 350-382.
- Bukhov. N.G., Bondar. V.V., Drozdova. I.S., Kara. A.N., Kotov. A.A., Maevskaya. S.N. *et.al.* 1996. Development of storage roots in radish (*Raphanus sativus*) plants as affected by light quality. Journal of Plant Physiology. 149(4):405–412.
- Bures S. 2001. I Curso de Gestión de viveros forestales. Consejería de Medio Ambiente. Recuperado el 5/11/2017 de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/80-373_I_CURSO_DE_GESTION_DE_VIVEROS_FORESTALES/80-373/0_CURSO_DE_GESTION_DE_VIVEROS_FORESTALES.PDF
- Calvo-Alvarado J., Arias Aguilar D., Jiménez Rodríguez C., Solano Montero J.C. 2008. Efecto de cinco sustratos en el contenido foliar de nutrientes y

- crecimiento inicial de tres especies forestales empleadas en Mesoamérica. *Revista Forestal Kurú. Costa Rica.* 5(14):1-15.
- Casimir A-M. 2001. Respuesta del crecimiento y productividad de rábano (*Raphanus sativus*, L.), cilantro (*Coriandrum sativum* L.) y habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.) a fertilizante mineral y estiércoles de vaca y oveja en Nigua, República Dominicana. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agropecuarias y de Recursos Naturales en Diversificación Agrícola. Universidad Pedro Henríquez Ureña. Santo Domingo. República Dominicana. 112 pp.
- Cassol D., De Silva F.S.P., Falqueto A.R., Bacarin M.A. 2008. An evaluation of non-destructive methods to estimate total chlorophyll content. *Photosynthetica* 46(4):634–636.
- Cepeda-Guzmán A., Valdez-Aguilar L.A., Castillo-González A.M., Ruiz-Torres N.A., Robledo-Torres V., Mendoza-Villarreal R. 2014. Respuestas de lechuga a la conductividad eléctrica con riego superficial y subirrigación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 5(7):1233-1245.
- Corres A. 2006. Efecto del fertirriego en la propagación sexual y asexual de la pitahya (*Hylocereus undatus*) bajo cultivo sin suelo. Tesis de maestría. CIIDIR, IPN, Oaxaca de Juárez, Oaxaca. México. 115 pp.
- Criollo H., García J. 2009. Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas.* 3(2):210-222.
- Díaz S. 2004. Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernadero. Memorias del IV Simposio Nacional de Horticultura. Torreón, Coahuila. México. pp. 44-68. Recuperado el 30/12/2017 de <https://drive.google.com/file/d/0BwCPMluW7T8rUFNkbEI1TC1PUEE/view>.
- Fabela C., Preciado R., Benavides M. 2006. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila. México. 146 pp. Recuperado el 15/11/2017 de http://www.nutricaodeplantas.agr.br/site/downloads/unesp_jaboticabal/Manual_Soln_Nutritivas.pdf.

- Gómez-Alvarez R., Lázaro-Jerónimo G., León-Najera J.A. 2008. Producción de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.) en huertos biointencivos en el trópico húmedo de tabasco. *Revista Universidad y Ciencia*. 24(1):11-20.
- González M. 2017. Evaluaciones de soluciones nutritivas Steiner elaboradas con efluentes residuales en el cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.). Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. 41 pp.
- Gutiérrez T. 2011. Producción hidropónica de lechuga con y sin recirculación de solución nutritiva. Tesis de Maestría. Instituto de Horticultura. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 66 pp.
- Heemst, H. D. J. Van. 1986. The distribution of dry matter during growth of a potato crop. *Potato Research*. 29(1):55-66.
- Hernández H. 2013. Cultivo de chile pimiento (*Capsicum annum* L.) cultivar california wonder 300, en dos sistemas hidropónicos y tres densidades de siembra. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Tlalnepantla de Baz, Estado de México. 72 pp.
- INEGI. 1997. Cultivos anuales de México: VII Censo Agropecuario. México. Recuperado el 12/12/17 de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/380/702825117924/702825117924_7.pdf
- INEGI. 2007. Cultivos anuales de México: VIII Censo Agropecuario. México. Recuperado el 12/12/17 de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/anua_y_perenes/EUM/MCP_INEG07p8.pdf
- Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter Jr. P.J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*. 17(4):1133–1138.

- Jolliffe P.A., Gaye M-M. 1995. Dynamic of growth and yield components of bell peppers (*Capsicum annum* L.) to row covers and population density. *Scientia Horticulturae*. 62(1):153-164.
- Kumar S., Kumar S., Maji S., Kumar P. 2016. Effect of inorganic fertilizers and bio-fertilizers on Growth, yield and quality of radish (*Raphanus sativus* L.). *International Journal of Plant Sciences*. 11(1):71-74.
- Laguna M. y Cisne C. 2011. Efecto de biofertilizantes (EM-Boskashi) sobre el crecimiento y rendimiento del rábano (*Raphanus sativus*). Universidad Nacional Agraria. Nicaragua. La Calera. 1(1):26-29.
- Longar B.M.P, Pérez H.M.P.M., Ríos M.E. 2013. El estado de técnica de la hidroponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 4(5):803-809.
- López G., Damián H., Álvarez G., Parra I. y Zuluaga S. 2012. La economía de traspatio como estrategia de supervivencia en San Nicolás de los Ranchos, Puebla, México. *Revista de Geografía Agrícola*. (48-49):51-62.
- López L., Arteaga R., Vázquez P., López C. y Sánchez C. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento del riego en cultivos agrícolas. *Revista Agricultura Técnica en México*, 35(1):92-106.
- Marfa O., Martínez A., Orozco R., Serrano L., Martínez F.X. 1993. The use of fine-grade perlites in lettuce bag cultures. II. Physical properties, rheologic effects and productivity. *Acta Horticulturae*. 342(1):339-348.
- Martínez P. y Soriano F. 2014. Propiedades físicas y químicas de los sustratos. INIFAP. Desplegable para productores número 11. Tecomán, Colima. México. Recuperado el 14/02/18 de http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4215/010209125200067468_PROP_FISYQUIM_SUTRATOS.pdf?sequence=1.
- Martínez Pedro-Florian y Roca D. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 37-77.

- Masabni J. 2016. Texas A&M Agrilife Extension. Recuperado el 6/11/2017 de <https://cdn-ext.agnet.tamu.edu/wp-content/uploads/2014/09/how-to-grow-radishes-spanish.pdf>
- Matthew A., Raymond M. 2012. Comparative Study of Lettuce and Radish Grown Under Red and Blue Light-Emitting Diodes (LEDs) and White Fluorescents Lamps. Center-Based Research Experience (CBRE). Recuperado el 20/01/18 de <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120015737.pdf>.
- Mikel F. 2010. Evaluación de sustratos de fibra de madera de pino frente a sustratos convencionales en cultivo hidropónico de tomate. Tesis de Ingeniero Agrícola en Explotaciones Agropecuarias. Universidad de Navarra. Pamplona. España. 78 pp.
- Montemayor T., Zermeño G., Olague R., Aldaco N., Fortis H., Salazar S., Rodríguez R., Vázquez-Vázquez C. 2006. Efecto de la densidad de siembra y estructura del dosel de maíz en la penetración de la radiación solar. *Revista Internacional de Botánica Experimental. phyton*. 75(1):47-53.
- Mora P. 1999. Sustratos para cultivos sin suelo o hidroponía. XI Congreso Nacional Agronómico. INDAGRO. San José. Costa Rica. Recuperado el 11/11/17 de http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_095.pdf.
- Nikolaos Tsougkrianis, Peña-Valdivia C.V., Trejo López C., Molina Galán J.D. 2009. El potencial de agua del sustrato en la germinación de maíces con tolerancia y sensibilidad a la sequía. *Agricultura Técnica en México*. 35(4):363-369.
- Ochoa G. y Mendoza R. 2015. Evaluar el efecto de enmiendas nutricionales sobre el crecimiento y rendimiento del rábano (*Raphanus sativus* L.) en época seca en la finca experimental Las Mercedes. Trabajo de Graduación. Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. 40 pp.
- Ojodeagua A., Castellanos R., Muñoz R., Alcántar G., Tijerina C., Vargas T. y Enríquez R. 2008. Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31(4):367-374.
- Ortega-Martínez L.D., Sánchez-Olarte J., Ocampo-Mendoza J., Sandoval-Castro E., Salcido-Ramos B.A., Manzo-Ramos F. 2010. Efecto de diferentes sustratos en

- crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicon esculentum* mill) bajo condiciones de invernadero. Ra Ximhai, 6(3):339-346.
- Páez A., Paz V., López J.C. 2000. Crecimiento y respuestas fisiológicas de plantas de tomate cv. Río Grande en la época mayo-julio. Efecto de sombreado. Revista Facultad de Agronomía (LUZ). 17(1):173-184.
- Park W. y Hong H. 1996. Selection of nutrient solution and substrates for radish (*Raphanus sativus* L. var. *salivus*) growth. Journal of Bio-Environment Control 5(2):236-247.
- Pérez G. y Perez R. 2004. *Raphanus sativus* (radish): their chemistry and biology. The Scientific World Journal. 4(1):811–837.
- Pesantes A. 1972. Ensayo sobre la densidad de siembra y comportamiento de cuatro variedades de trigo (*Triticum vulgare*) en la zona de milagro. Tesis de Licenciatura. Facultad de agronomía y veterinaria, Universidad de Guayaquil. República del Ecuador. 61 pp.
- Ramírez P.R., Pérez A.M. 2006. Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L.). Revista Facultad Nacional de Agronomía – Medellín. 59(2):3543-3556.
- Ramos T. 2014. Evaluación de sustratos hidropónicos sobre la eficiencia de la producción de raíces y rendimiento de lechuga romana, (*Lactuca sativa*). Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. México. 80 pp.
- SAGARPA. 2012. Estimación de las demandas de consumo de agua. Recuperado el 7/11/17 de http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_DEMANDAS%20DE%20AGUA.pdf
- SAGARPA. 2016. Superficie Agrícola Protegida. Recuperado el 5/11/17 de http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/superficie_agricola_protegida.aspx.

- Salermo A., Pierandrei F., Rea E., Colla G., Roupael Y., Saccardo F. 2005. Floating system cultivation of radish (*Raphanus sativus* L.): production and quality. *Acta Horticulturae*. 697(1):87-92.
- Samarakoon, U.C. Weerasinghe P., Weerakkody A. 2006. Effect of Electrical Conductivity (EC) of the Nutrient Solution on Nutrient Uptake, Growth and Yield of Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L.) in Stationary Culture. *Tropical Agricultural Research*. 18(1):13-21.
- Santos C. y Ríos M. 2016. Calculo de soluciones nutritivas, en suelo y sin suelo. Servicio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cabildo Insular de Tenerife. 133 pp. Recuperado el 9/11/17 de http://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/otro_622_soluciones_nutritivas.pdf.
- SIAP. 2016. Agricultura protegida: presente en 30 estados del país. Recuperado el 5/11/17 de <https://www.gob.mx/siap/articulos/agricultura-protegida-presente-en-30-estados-del-pais?idiom=es>.
- SIAP. 2016. Datos Abiertos. Estadística de producción Agrícola de 2016. Recuperado el 6/11/2017 de <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>.
- Somarriba R. 1998. Texto granos básicos. Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. P. 1-57.
- Sonneveld C. y van den Bos A. 1995. Effects of nutrient levels on growth and quality of radish (*Raphanus sativus* L.) grown on different substrates. *Journal of Plant Nutrition*. 18(3):501-513.
- Steiner A. 1961. A universal method for preparing nutrient solution of certain desired composition. *Plant and Soil* XV, (2):134-154.
- Taiz L. y Zeiger E. 2002. *Plant Physiology*. 3ra. ed. Sinauer Associates. 693 pp.
- Terry A., Tejeda P., Ruiz P. y Reynaldo E. 2014. Efectividad agrobiológica del producto bioactivo pectimorf® en el cultivo del rábano (*Raphanus sativus* L.). *Cultivos Tropicales*. 4(8):105-111.

- Torres A. y López R. 2010. Medición de Luz Diaria Integrada en Invernaderos. Purdue extension. Recuperado el 24/10/17 de <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ho/ho-238-sw.pdf>.
- Trejo T., Ramirez M., Gomez M., Garcia A., Baca C. y Tejeda S. 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. Revista mexicana de ciencias agrícolas. 5(1):863-876.
- Trejo-Tellez L.I. y Gómez-Merino F.G. 2012. Nutrient Solutions for Hydroponic Systems. Toshiki Asao, IntechOpen. Recuperado el 12/12/17 de <https://www.intechopen.com/books/hydroponics-a-standard-methodology-for-plant-biological-researches/nutrient-solutions-for-hydroponic-systems>.
- Tropicos. 2018. Taxonomy browser. Recuperado el 20/04/18 de <http://www.tropicos.org/NamePage.aspx?nameid=4100238>.
- Uddling J., Gelang-Alfredsson J., Piikki K. y Pleijel H. 2007. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. Photosynthesis Research. 91(1):37-46.
- Urrestarazu M, Mazuela P. y Gómez A. 2005. Inversiones en tecnología hortícola en México. Revista Horticultura Internacional. España. Recuperado el 11/12/17 de <http://www.horticom.com/pd/imagenes/61/430/61430.pdf>
- Villegas T., Domínguez P., Albavera P., Andrade R., Sotelo N., Martínez R., Aguilar C., Castillo C. y Magadan S. 2017. Sustratos como material de última generación. OmniaScience. Estado de México. 62 pp.
- Vincent F. 2013. Comportamiento agronómico de tres variedades de rábano (*Rhapanus Sativus*), con diferentes densidades de siembra aplicando abono orgánico líquido. Tesis de licenciatura. Unidad de estudios a distancia. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. 59 pp.
- Warnecke D., Krauskopf, D. 1983. Greenhouse growth media: Testing and nutrition guidelines, Extension Bulletin E-1736. Cooperative Extension Service, Michigan State University. Recuperado el 15/04/17 de <https://pdfs.semanticscholar.org/4328/00873c3aaa0942cf769bc4835730b56e2e71.pdf>

- Zaki H.E.M., Takahata Y., Yokoi S. 2012. Analysis of the morfological and anatomical characteristics of roots in tree radish (*Raphanus sativus*) cultivars that differ in root shape. The Journal of Horticultural Science and biotechnology. 87(2):172-178.
- Zhang Yongqin, Jing M. Chen, Sean C. Thomas. 2007. Retrieving seasonal variation in chlorophyll content of overstory and understory sugar maple leaves from leaf-level hyperspectral data. Canadian Journal of Remote Sensing. 33(5):406-415.

10.0 ANEXO

10.1 Procedimiento para preparar 20 L de solución nutritiva Steiner (1984)

A) Lavar perfectamente el contenedor (Cubeta de 20 L) y los recipientes (cinco vasos de precipitados de 1L) que se utilizaran para la preparación de la solución nutritiva con jabón biodegradable (Figura 23).



Figura 23. Materiales necesarios para la preparación de la solución nutritiva Steiner.

B) Tener a la mano los fertilizantes necesarios para preparar la solución (Figura 24).



Figura 24. Cuatro fertilizantes y un ácido como macronutrientes, bolsa de producto comercial para micronutrientes.

C) Pesar macro y micronutrientes para preparar 20 L de solución (Figura 25).



Figura 25. Balanza granataria para el pesaje de las sales fertilizantes.

D) Agregar agua a la mitad de volumen de la cubeta (Figura 26).



Figura 26. Cubeta de 20 L a media capacidad con agua de la llave.

E) Disolver por separado cada uno de los macronutrientes y la mezcla de micronutrientes en los vasos de precipitados (Figura 27).

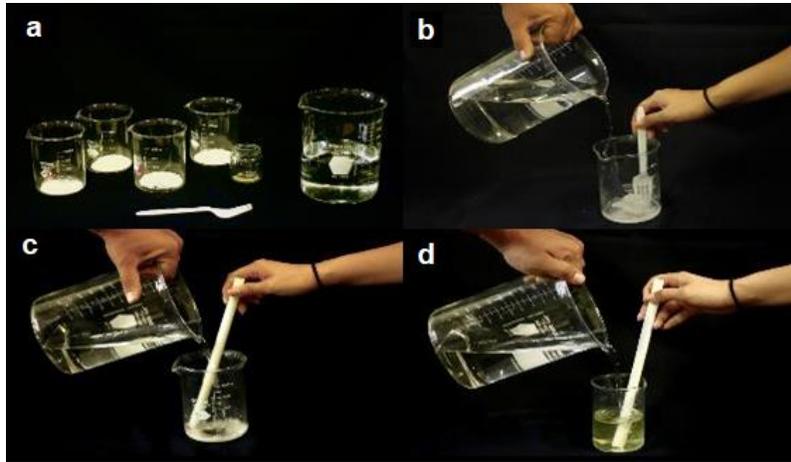


Figura 27. Dilución individual de cada una de las sales fertilizantes y micronutrientes. a, sales, agitador y agua; b, disolviendo sulfato de magnesio; c, disolviendo nitrato de calcio; d, disolviendo micronutrientes.

F) Para neutralizar los bicarbonatos presentes en el agua hay que agregar 1 mL de ácido nítrico concentrado (65.8 %, densidad 1.41). También será agregado el ácido fosfórico (85%, densidad 1.69) en la cubeta que se encuentra a media capacidad para hacer el ajuste del pH, precipitar carbonatos y agregar el primer Macronutriente de la solución nutritiva (Figura 28).



Figura 28. Medición del pH inicial y final después de agregar ácido nítrico y fosfórico.

G) Agregar los macronutrientes anteriormente disueltos y finalmente los micronutrientes (Figura 29).

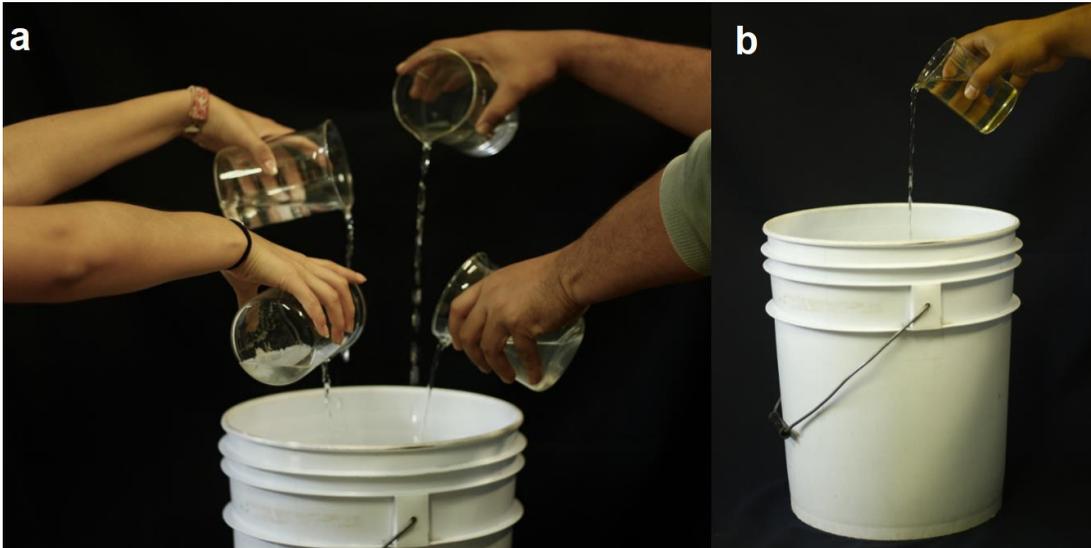


Figura 29. Agregando fertilizantes al agua con el pH ajustado. a, macronutrientes; b, micronutrientes.

H) Aforar la cubeta, agitar y corroborar el pH entre 5.6 y 6.6 (Figura 30).

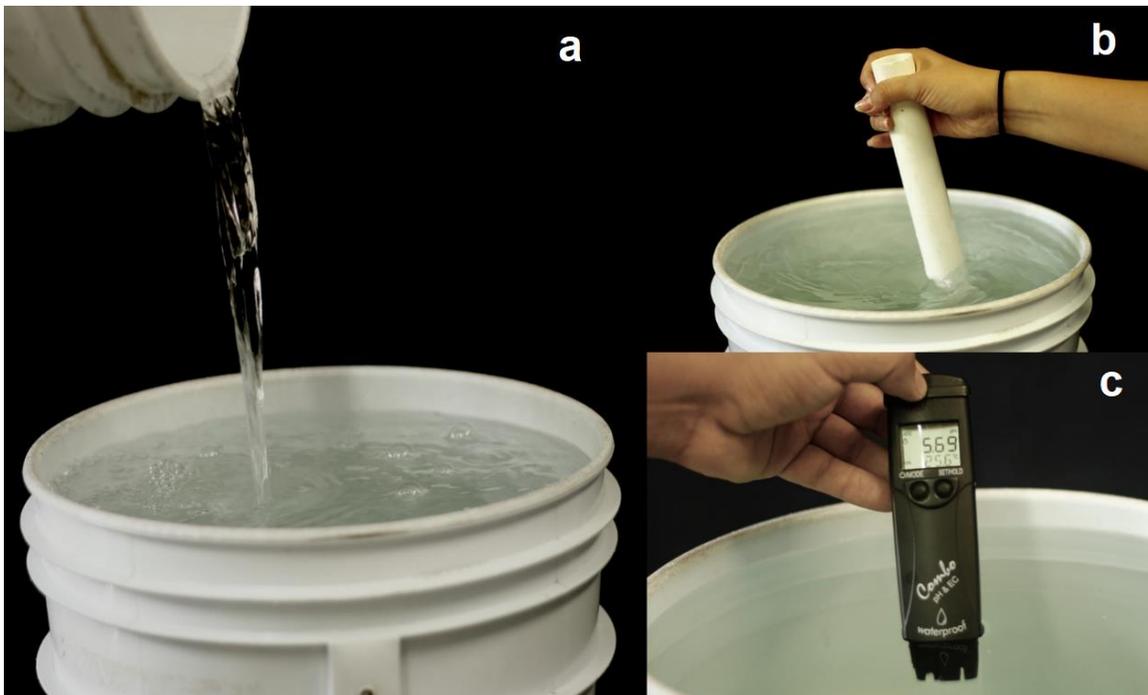


Figura 30. Pasó final de la preparación de la solución nutritiva. a, aforando la cubeta con capacidad de 20 L; b, agitando para asegurar homogeneidad en la solución; c, corroborando pH.

10.2 Ecuaciones de propiedades físicas de los sustratos

$$\text{Porosidad total (\%)} = \frac{Va + \frac{PH-PS}{Pa}}{Vc} \times 100$$

$$\text{Porosidad de aireación (\%)} = \frac{Va}{Vc} \times 100$$

$$\text{Capacidad de retención de humedad (\%)} = \frac{PH-PS}{Vc} \times 100$$

$$\text{Densidad aparente g L}^{-1} = \frac{PS}{Vc}$$

Donde:

Va = volumen de agua drenado (cm³)

PH = peso húmedo de la muestra (g)

PS = peso seco de la muestra (g)

Pa = peso específico del agua (1 g cm⁻³)

Vc = volumen de contenedor