

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Efectos de la Temperatura, Concentración de la Solución Nutritiva y la Posición de la Planta en el Crecimiento de Lechuga (*Lactuca sativa* L.) Cultivada en Aeroponia

Por:

LEIDY COLÓN SOLANO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México.

Septiembre de 2017.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Efectos de la Temperatura, Concentración de la Solución Nutritiva y la
Posición de la Planta en el Crecimiento de Lechuga (*Lactuca sativa* L.)
Cultivada en Aeroponía

Por:

LEIDY COLÓN SOLANO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar
Asesor Principal



Dr. Armando Hernández Pérez
Coasesor

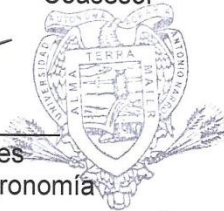


Dra. Juana Cruz García Santiago
Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.



Coordinación
División de Agronomía

Septiembre de 2017.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por guiar mis pasos y llenarme de fortaleza en los momentos más difíciles, por darme la gran familia que tengo, por haberme permitido conocer a personas tan maravillosas en el transcurso de mi estancia en esta gran Universidad.

A mí Alma Mater, la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por haberme formado profesionalmente y dado la oportunidad de pertenecer a esta gran casa de estudios, gracias por darme la dicha de conocer a grandes personas que llevaré siempre en mi corazón y por ser mi segunda casa en todos estos años.

A mi asesor **Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar** por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo, por compartir sus conocimientos, sabiduría y lo más importante, amistad, confianza y consejos, gracias por ser un gran profesor.

Al **Dr. Armando Hernández Pérez** por compartir sus conocimientos, experiencias, por su amistad, por apoyarme y ser parte de mis asesores.

A la **Dra. Juana Cruz García Santiago** por compartir sus conocimientos, contribuir y ser parte de mis asesores en este trabajo.

Al **Lic. Francisco Ortiz Serafín** por brindarme su amistad y su apoyo durante mi estancia en la Universidad.

Al **Dr. Sergio Sánchez** por compartir sus conocimientos, y amistad durante mi estancia en la Universidad.

Al **Ing. José Ángel Daniel** por compartir sus conocimientos, apoyo y amistad durante mi estancia en la Universidad.

A todos los maestros que formaron parte de mi formación académica gracias por su apoyo, sus experiencias y conocimientos compartidos.

A mis amigos **Leonel, Alejandro, Néstor y Samuel** por el gran apoyo que me brindaron en mi proyecto, gracias por su amistad y por haber formado parte de familia durante mi estancia.

DEDICATORIA

Este trabajo fue dedicado en especial para mis padres **María Reina Solano Carranza (+)** y **Tobías Colon Ávila (+)**. Por darme la vida, por su amor incondicional, por guiar mi camino desde el cielo, aunque no estuvieron conmigo a lo largo de mi formación los tengo presente en todo momento.

A mis hermanos **Leobardo, Moise, Omar, Mayeli, Erisbey, Reina, Yeimin Y Benigno** por todos los momentos compartidos, por su amor, los consejos y apoyo incondicional que me han brindado.

A mis abuelitos **Edelmira Carranza Chávez** y **Andrés Solano Carranza (+)** por sus consejos, amor y apoyo en todo momento de mi vida profesional.

A mis tíos por su apoyo, en especial a **Leonel Solano Carranza** por su amor y por haberme impulsado en todo momento.

A mis primos por su amistad, amor y cariño por formar parte de mi vida.

A mis sobrinos por todo ese amor, por ser un cachito de mí.

A mis cuñadas y cuñados por ser compañeros de vida de mis hermanos, por todo ese amor hacia ellos.

Con todo mi amor

Leidy

RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el efecto de la temperatura, concentración de la solución nutritiva y la posición de la planta en el medio de crecimiento de lechuga cv Lulú en aeroponía. Se probaron dos concentraciones de la solución de Steiner (50 % y 75%), dos temperaturas (24 y 28°C) de la misma y tres posiciones de la planta (orientación, superior y poniente) en la cama aeropónica, obteniéndose en total 12 tratamientos.

Los tratamientos se establecieron con un diseño de bloques completos al azar con un arreglo factorial de 2 x 2 x 3, utilizando 3 repeticiones por tratamiento; cada repetición consistió de 12 plantas, resultando un total de 432 plantas. Se muestrearon 3 plantas por repetición, de las cuales se evaluaron las siguientes variables: altura de la planta, ancho de hoja, longitud de raíz, calidad visual, volumen de raíz, peso fresco de hojas, peso fresco de raíz, peso seco de hojas, y peso seco de raíz. De acuerdo al ANOVA y la prueba de comparación de medias, las plantas tratadas con soluciones a una concentración de 50% y temperatura de 24°C y la posición orientación fueron las que presentaron mayor altura pues tuvo un incremento de 7.2% comparando con las plantas de la posición del lado superior y poniente. El peso fresco de raíz tuvo una disminución de 12.8% con respecto al lado superior y el volumen de la raíz tuvo una disminución del 8.7% con respecto al lado superior de las camas de cultivo, sin embargo, las plantas tratadas con una concentración de 50%, y temperatura de 28°C, posición del lado orientación, poniente y superior no se observó efecto en ninguna variable.

Palabras Clave: concentración, temperatura, posición, lechuga, aeroponía.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	iii
INDICE GENERAL.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	3
III. OBJETIVOS	3
3.1 Objetivo general.....	3
IV. HIPOTESIS	4
V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
5. 1 Lechuga.....	4
5.1.1 Origen.....	4
5.1.2 Importancia	5
5.2 Nutrición.....	5
5.2.1 Fertilización	5
5.2.2 Demandas nutrimentales	6
5.2.3 Curvas de extracción	7
5.3 Efectos de la CE.....	7
5.4 Efectos del pH	8
5.5 Hidropónia.....	8
5.5.1 Sistemas hidropónicos.....	8
5.5.2 Raíz flotante.....	9
5.5.3 Sistema NFT	9
5.5.4 Sistema aeropónico.....	9
5.5.5 Sustratos en la hidroponía	11
5.5.6 Solución nutritiva	11
5.6 Efectos de la temperatura	12
5.7 Efectos de la radiación.....	13
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14

6.1 Ubicación del sitio experimental	14
6.2 Diseño del sistema aeropónico	14
6.3 Material vegetativo	15
6.4 Tratamientos	16
6.5 Manejo del pH y CE en la solución nutritiva.....	18
6.6 Control de enfermedades	18
6.7 Variables analizadas	18
6.8 Diseño experimental y análisis estadístico	18
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
7.1 Altura.....	21
7.2 Ancho.....	22
7.3 Calidad visual	23
7.4 Longitud de raíz	24
7.5 Peso fresco de hoja	25
7.6 Peso fresco de raíz.....	26
7.7 Volumen de raíz	27
7.8 Peso seco de raíz y hojas.....	28
7.9 Interacción de concentración y posición.....	29
7.10 Interacción de la concentración, temperatura y posición.....	30
7.11.1 RADIACIÓN PAR	31
7.11.2 RED	32
7.11.3 FAR RED.....	32
7.11.4 RED/FAR RED	33
VIII. CONCLUSIONES	34
IX. LITERATURA CITADA	35

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Dosis de fertilización y época de aplicación de acuerdo con la demanda fisiológica de cultivo de lechuga.....	6
Cuadro 2. Principales fuentes de fertilización comercial para elaboración de una solución nutritiva.....	6
Cuadro 3. Tratamientos utilizados para evaluar la concentración, temperatura y posición de las camas de cultivo.....	17
Cuadro 4. Composición de la solución nutritiva.....	17
Cuadro 5. Manejo del pH y CE durante el ciclo del cultivo.....	18
Cuadro 6. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en un sistema aeropónico semi-automatizado.....	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño del sistema aeropónico para la producción de lechuga.....	15
Figura 2. Instalación de las plantas de lechuga a la estructura del sistema aeropónico.....	16
Figura 3. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo, en la altura de las plantas de lechuga en un sistema aeropónico.....	21
Figura 4. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el ancho de las plantas de lechuga en un sistema aeropónico.....	22
Figura 5. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en la calidad de las plantas del cultivo de lechuga en el sistema aeropónico.....	23
Figura 6. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en la longitud de raíz de las plantas de lechuga en un sistema aeropónico.....	24
Figura 7. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el peso fresco de la hoja de la planta de lechuga en un sistema aeropónico.....	25
Figura 8. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el peso fresco de la raíz de la planta de lechuga en un sistema aeropónico.....	26
Figura 9. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el volumen de raíz de la lechuga en un sistema aeropónico.....	27

Figura 10. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el peso seco de raíz de la lechuga bajo un sistema aeropónico.....28

Figura 11. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las plantas en la cama de cultivo en el peso seco de la hoja de la lechuga en un sistema aeropónico.....29

Figura 12. Interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la posición de las plantas en la cama de cultivo de lechuga en un sistema aeropónico.....29

Figura 13. Interacción entre la concentración y temperatura de la solución nutritiva en el cultivo de lechuga en aeroponía.....30

Figura 14. Interacción entre la temperatura de la solución nutritiva y la posición de las plantas en las camas de cultivo de lechuga en un sistema aeropónico.....30

Figura 15. Radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) de las camas de cultivos evaluadas en diferentes fechas durante el ciclo del cultivo.....31

Figura 16. Radiación RED de las camas de cultivo evaluadas durante diferentes fechas durante el ciclo del cultivo.....32

Figura 17. Radiación FAR RED de las camas de cultivo evaluadas durante diferentes fechas del ciclo del cultivo.....32

Figura 18. Radiación RED/FAR RED de las camas de cultivo evaluadas durante diferentes fechas en el ciclo del cultivo.....33

I. INTRODUCCIÓN

El desafío de producir más alimentos con menor superficie ha motivado la adopción de la agricultura protegida en muchas regiones del mundo. La producción de hortalizas en ambientes protegidos se ha incrementado en los últimos años, y de este un porcentaje se produce mediante hidropónia. En este sistema de producción las principales hortalizas cultivadas son: tomate, pimiento, pepino, lechuga, fresa, espinaca, chile habanero, especias y plantas medicinales (Intagri, 2017).

La producción de cultivos en invernadero suele acompañarse de tecnología hidropónica, donde en vez de suelo se utiliza un sustrato (peat moss, fibra de coco, perlita, lana de roca, etc.) y los fertilizantes se agregan mediante una solución nutritiva (SN) en el riego (Sánchez y Escalante, 1988); en este sistema puede usarse o no un sustrato como soporte en las plantas (Urrestarazu, 2004). Esta tecnología favorece a los agricultores que cuentan con poco espacio, suelos muy erosionados y problemas de plagas y enfermedades.

El aspecto más importante en la hidropónia es la SN, de ella depende la nutrición de las plantas y, por ende, la calidad y cantidad de la producción (Lara, 1999). La temperatura es un factor importante de la SN. Dado que la SN proporciona todos los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas, es importante que la solución esté en las condiciones adecuadas para que estos nutrientes puedan ser absorbidos por la planta. Si no se tiene cuidado en el manejo de la temperatura en la SN puede ocasionar deficiencias nutritivas, esto depende de cada cultivo, pero se sabe que la mayoría de las plantas se desarrolla bien cuando la temperatura de la zona radical se encuentra entre 20 y 25°C. Hay plantas cuyas temperaturas óptimas son un poco más altas, como el tomate y el chile, que les favorece una temperatura de 27°C, sin embargo, plantas como la lechuga desarrollan problemas nutricionales a estas temperaturas (Favela, *et al.*, 2006).

La aeropónia es una técnica de la hidropónia en la cual las raíces se encuentran suspendidas en el aire, dentro de un medio oscuro sin hacer uso de suelo, las raíces son asperjadas continuamente con una nube de SN por nebulizadores, esta

técnica es muy recomendada ya que mejora los cultivos gracias al movimiento continuo de la SN y mantiene el sistema radicular aireado. Las ventajas de esta técnica son: una producción de excelente calidad, permite el ahorro de agua y fertilizantes, mayor densidad de población en poco espacio, perfecto control de pH y CE, uniformidad en el cultivo, ciclos más cortos y por ende una mayor producción en todo el año. Las desventajas de la aeroponía son: el costo de producción inicial es elevado, depende de la energía eléctrica constante y de cuidados extremos, aun así, la aeroponía puede ser una excelente técnica para la producción de plantas en sistemas protegidos (Barbado, 2005).

La lechuga es una de las hortalizas de hoja de mayor importancia en México, es el cuarto vegetal cultivado hidropónicamente después del tomate, pepino y chile dulce, esta hortaliza de hoja verde es la protagonista de las ensaladas, posee grandes beneficios nutrimentales. Está constituida por un 95% de agua y contiene una alta cantidad de fibra, minerales y vitaminas, así como lactucina, un sedante natural y tranquilizante del sistema nervioso (SAGARPA, 2016). La lechuga se consume en todo el mundo. En México se cosecha una gran variedad de este cultivo, la mayor producción de este cultivo se concentra en los meses de agosto y septiembre, con más de 40 mil toneladas anuales, y Estados Unidos es el principal mercado para exportación (SAGARA, 2016).

El SIAP (2015), reportó que en México cuenta con una superficie de siembra del cultivo de lechuga en suelo y a cielo abierto de 20,680.83 ha, con una producción de 437,561.70 toneladas y un rendimiento promedio de 21.57 ton ha⁻¹. Estos rendimientos podrían incrementar con la técnica en aeroponía.

Con base a lo anterior, el objetivo de la presente investigación, fue determinar los efectos de la temperatura en diferentes concentraciones de la SN, así como la posición de la planta en la unidad aeropónica para la producción de lechuga.

II. JUSTIFICACIÓN

Mediante el presente estudio se pretende encontrar una forma de producción de lechuga de igual o mejor calidad que el obtenido con los sistemas de producción que actualmente se manejan, reduciendo los ciclos y costos de producción mediante un adicionamiento de temperatura en la SN y haciendo un uso eficiente de fertilizante con diferentes SN en el sistema aeropónico.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar los efectos de la temperatura en diferentes concentraciones de la SN y en la posición del medio de crecimiento para la producción de lechuga aeropónico.

3.2 Objetivos específicos

Evaluar el efecto de la temperatura de la SN en el desarrollo del cultivo de lechuga.

Evaluar el efecto de la concentración de la SN en el sistema aeropónico para producción de lechuga.

Determinar la interacción entre la temperatura, concentraciones de la SN y la posición del medio de crecimiento.

IV. HIPOTESIS

La temperatura, concentración de la SN y la posición de crecimiento afectaran el desarrollo y producción de la planta de lechuga.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5. 1 Lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) se encuentra dentro del grupo más importante de las hortalizas de hoja, siendo de gran interés en México. Este cultivo se utiliza para el consumo fresco, regularmente ensaladas; además de ser altamente conocida y cultivada en casi todo el mundo, es el cuarto vegetal más importante cultivado hidropónicamente después del tomate, pepino y chile dulce (Resh, 2006).

La producción de las hortalizas no se caracteriza por una alta concentración en pocas regiones, esto es debido a la gran facilidad para cultivarse, a la diversidad de climas con los que cuenta nuestro país, las tecnologías empleadas y la mentalidad empresarial de los productores. Estos factores tan simples colocan a México como un país potencialmente productivo en donde es posible obtener una amplia gama de productos en las diferentes épocas del año (Borrego *et al.*, 1999).

5.1.1 Origen

El origen de la lechuga parece no estar muy claro, aunque el botánico Vavilov mencionaba que el origen de la lechuga se situaba en el cercano oriente. Hoy en día no existe un acuerdo al respecto del origen debido a la aparición de un segundo antecesor de la *Lactuca scariola* L. que se encuentra en estado silvestre en la mayor parte de las zonas templadas (Mills *et al.*, 1996).

El cultivo de la lechuga se remota a una antigüedad de 2,500 años, siendo conocida por griegos y romanos. Las primeras lechugas de las que se tiene referencia son las de hojas sueltas, porque las acogolladas fueron conocidas en el siglo XVI.

5.1.2 Importancia

La lechuga es exportada principalmente a Estados Unidos de Norteamérica, donde tiene el mayor valor de compras en dólares. En México la producción anual de lechuga supera las 437 mil toneladas, siendo Guanajuato, zacatecas y Puebla los principales productores de esta verdura que posicionan a nuestro país en el noveno lugar de producción mundial (SAGARPA, 2016).

El estado de Guanajuato cuenta con una gran cantidad de productores que tiene situado un mercado de venta en Estados Unidos, teniendo vetas de oportunidad; es decir, sólo participan cuando pasa un fenómeno o la producción de Estados Unidos no cumple con las exigencias del mercado. Mientras que, en el estado de Puebla, la producción se destina solamente para satisfacer las necesidades del mercado nacional (ASERCA, 2011).

5.2 Nutrición

Para la adecuada nutrición de la lechuga es muy importante el tiempo y la forma de aplicar, esto es lo que determinara el incremento del rendimiento y la calidad de los cultivos.

5.2.1 Fertilización

La cantidad de nutrientes que absorbe la lechuga va a depender de la cantidad de biomasa producida por los distintos órganos de la planta (hojas, tallo, raíz) por lo que las extracciones van a variar dependiendo del tipo de lechuga, variedad, ciclo de cultivo, etc. (Pomares y Ramos, 2010).

Cuadro 1. Dosis de fertilización y época de aplicación de acuerdo con la demanda fisiológica del cultivo de lechuga.

DIAS DEL CULTIVO	N (Kg/ha)	P(Kg/ha)	K (Kg/ha)
0	10	5	10
5	15	5	10
15	25	10	40
25	50	15	40
35	25	10	
45	20	5	
Total	145	50	100

FUENTE: SAGARPA, (2011).

Cuadro 2. Principales fuentes de fertilizantes comerciales para la elaboración de una solución nutritiva.

FUENTE	FORMULA QUÍMICA	ELEMENTOS QUE APORTA	N-P-K
Nitrato de Potasio	KNO ₃	N y K	
Nitrato de Calcio	Ca(NO ₃) ₂	N y Ca	
Nitrato de Amonio	NH ₄ NO ₃	N	33.5-0-0
Sulfato de Amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	N y S	20.5-0-0
Fosfato Monoamónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	N y P	11-48-0
Fosfato Diamónico	(NH ₄) ₂ HPO ₄	N y P	18-46-0
Cloruro de Potasio	KCl	K	0-0-60
Superfosfato de Calcio Simple	CaH ₄ (PO ₄) ₂	P y Ca	0-20-0
Superfosfato de Calcio Triple	CaH ₄ (PO ₄) ₂	P y Ca	0-40-0
Ácido Fosfórico	H ₃ PO ₄	P	
Sulfato de Calcio (Yeso)	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Ca y S	
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄ ·7H ₂ O	Mg y S	
Sulfato Ferroso	FeSO ₄ ·7H ₂ O	Fe y S	
Sulfato de Manganeso	MnSO ₄ ·4H ₂ O	Mn y S	
Ácido Bórico	H ₃ BO ₃	B	
Tetraborato de Sodio	Na ₂ B ₄ O ₇	B y Na	
Sulfato de Cobre	CuSO ₄ ·5H ₂ O	Cu y S	
Sulfato de Zinc	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	Zn y S	

Fuente: Sánchez del Castillo, (1988).

5.2.2 Demandas nutrimentales

La demanda nutrimental de los cultivos usualmente se expresa en términos de kilogramos del nutrimento por tonelada del producto cosechado (Rodríguez *et al.*, 2001).

5.2.3 Curvas de extracción

La curva de extracción nutrimental determina la cantidad de nutrimentos extraídos por una planta, a través de su ciclo de vida.

El cultivo de la lechuga se desarrolla exclusivamente durante su etapa vegetativa donde la absorción de los nutrientes se orienta hacia la producción de materia seca en hojas y tallo. Los elementos que más absorbe la planta de la lechuga son nitrógeno y potasio, es muy sensible a deficiencia de calcio (Bertsch, 2003). La concentración de los nutrientes en la planta de lechuga varía dependiendo de la función del nutrimento, la etapa fenológica y el órgano. La absorción de nutrimentos en la lechuga puede dividirse en dos fases: La primera se prolonga desde la emergencia de la plántula hasta la formación de las primeras hojas internas. Después de esto, empieza la formación de hojas que la lleva hasta la segunda fase, la cual se extiende desde la formación de la roseta hasta el final del ciclo productivo (Díaz, 2003).

5.3 Efectos de la CE

En los sistemas hidropónicos el manejo de la SN es muy importante para la obtención tanto de altos rendimientos como de calidad, pues es la vía a través de la cual se proporcionan los nutrimentos necesarios para el desarrollo de la planta (Carrasco *et al.*, 2007). En estas soluciones, la conductividad eléctrica (CE) tiene una estrecha relación con la concentración total de sales de la SN (Lara, 1999). Es un estimador indirecto del potencial osmótico, y determina el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos (Bugarín *et al.*, 1998). Este parámetro debe ser monitoreado a lo largo del ciclo de producción (Carrasco e Izquierdo, 1996) citados por (Flores, 2011). La CE de la SN para la producción de lechuga debe de estar en el rango adecuado de 1.8 a 2.0 mS/cm⁻¹.

5.4 Efectos del pH

La asimilación de los elementos es afectada de modo marcado por el pH de la SN. Con pH de 5.0 a 6.5 la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de asimilabilidad. Por debajo de pH=5.0 puede presentar deficiencia de N, K, Ca, Mg y B, mientras que por encima de pH=6.5 pueden disminuir la asimilabilidad de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu (Cadaña, 2005). La lechuga está clasificada como una hortaliza ligeramente tolerante a la acidez, siendo su rango de pH de 5.8 a 6.5.

5.5 Hidropónia

La hidropónia es un conjunto de técnicas que consiste en cultivar plantas en un medio libre de suelo, permite en estructuras simples o complejas la producción de plantas, principalmente de tipo herbáceo (lechugas, acelgas, espinacas, etc.), aprovechando sitios o áreas como azoteas, suelos infértiles, terrenos escambrosos o invernaderos climatizados. A partir de este concepto se desarrollaron técnicas que se apoyan en sustratos sintéticos, orgánicos e inorgánicos, o en sistemas con aportes de soluciones de nutrientes estáticos o circulantes, sin perder de vistas las necesidades de la planta como la temperatura, humedad, agua y nutrientes (Resh, 1997).

5.5.1 Sistemas hidropónicos

Un sistema hidropónico, es aquel sistema de producción en el cual las raíces de las plantas son asperjadas con una SN y en el que, en vez de suelo, se puede usar o no un sustrato. Existen diferentes sistemas de cultivo sin suelo, todo depende del medio en el que se desarrollan las raíces. Son sistemas en donde la raíz está en contacto directo con la SN, algunos sistemas hidropónicos se pueden definir conforme el material utilizado dependiendo del cultivo (Montero, 2006).

5.5.2 Raíz flotante

En este sistema no se utiliza sustrato sólido, las raíces están sumergidas directamente en la SN. Se utilizan láminas de nieve seca a las que se les perforan agujeros en donde se asientan las plantas, y luego se ponen a flotar sobre la SN, la cual debe ser aireada periódicamente para brindarle oxígeno a las raíces.

Se puede decir que este sistema representa la verdadera hidropónia, ya que el trabajo se realiza en agua, a la que se le agregan los nutrimentos minerales (Díaz, 2003).

5.5.3 Sistema NFT

El sistema de cultivo por NFT (Nutrient Film Technique) que traducido al español significa "la técnica de la película nutriente", es una de las técnicas más utilizadas en la hidropónia, la cual se basa en la circulación continua o intermitente de una fina lámina de SN a través de las raíces del cultivo, sin que éstas se encuentren inmersas en sustrato alguno, sino que simplemente quedan sostenidas por un canal de cultivo, en cuyo interior fluye la solución en donde no existe pérdida o salida al exterior de la SN, por lo que se considera un sistema de tipo cerrado. En cada canal hay agujeros donde se colocan las plantas, y estos canales están apoyados sobre mesas o caballetes con una ligera pendiente o desnivel que facilita la circulación de la solución (Carrasco e izquierdo, 1996; Correón, 2015).

5.5.4 Sistema aeropónico

La aeropónia es el proceso de cultivar plantas en un entorno aéreo o de niebla sin hacer uso de suelo. La palabra "aeropónia" viene de los términos griegos *aero* y *pones* que significan aire y trabajo. El principio básico de este sistema es hacer crecer las plantas en un entorno cerrado o semicerrado, realizando una micro aspersión en las raíces colgantes, creando una pulverización acuosa rica en nutrientes, la parte aérea de la planta están hacia arriba, y las raíces están separadas de la estructura de apoyo, el entorno de las raíces está libre de plagas y

enfermedades de tal modo que las plantas pueden crecer más saludables y más rápidamente que las plantadas en suelo (Durán, 2000).

Las ventajas y desventajas del sistema aeropónico son las siguientes:

Ventajas:

- ✓ La principal ventaja es la excelente aireación que les proporciona a las raíces
- ✓ Facilidad de controlar plagas y enfermedades
- ✓ Altos rendimientos por unidad de superficie
- ✓ Se utilizan concentraciones muy bajas de nutrientes
- ✓ Mayor calidad del producto
- ✓ Se evita la maquinaria agrícola
- ✓ Perfecto control de pH y CE
- ✓ Uniformidad en los cultivos

Desventajas:

- ✓ Depende de la energía eléctrica constante
- ✓ Se requieren cuidados extremos
- ✓ Costo inicial elevado

Beneficio de oxígeno en las raíces:

La presencia de oxígeno en las raíces es necesaria para que haya crecimiento saludable en la planta. Como los aeropónicos se cultivan con aire en combinación con micro gotas de agua, casi cualquier planta puede crecer hasta la madurez en el aire, siempre y cuando, cuente con suficiente oxígeno, agua y nutrientes. Algunos cultivos favorecen los sistemas aeropónicos sobre los hidropónicos, debido a que la aeración aumentada de los nutrientes, hace que llegue más oxígeno a las raíces de las plantas, estimulando su crecimiento y ayudando a prevenir la formación de patógenos. El aire limpio abastece de oxígeno, el cual es un purificador excelente para el entorno aeropónico. Para que las plantas tengan un crecimiento natural debe tener acceso sin restricción de aire. Debe permitir que las plantas crezcan de forma natural para un desarrollo fisiológico exitoso. Entre más confinado sea el sistema, mayor será la probabilidad de que la presión enferme la planta y a todo el sistema aeropónico (Pérez *et al.*, 1999).

5.5.5 Sustratos en la hidroponía

El sustrato es el medio inerte que tiene doble función: anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz, permitiéndoles la respiración, retener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan, las características de un sustrato es que tenga buena retención de humedad, intercambio catiónico moderado, libre de malas hierbas y buena aireación (Hernández *et al.*, 2012).

El empleo de los sustratos sólidos por los cuales circula la SN es la base del cultivo hidropónico. La granulación ha de ser tal, que permita la circulación de la SN y del aire. En general, la experiencia señala como mejores sustratos aquellos que permitan la presencia de 15 al 35% de aire y del 20 al 60% de agua en relación con el volumen total (Arcos *et al.*, 2011).

El sustrato debe ser liviano, con ciertos grados de porosidad, tamaño apropiado sin bordes cortantes y que sea químicamente inerte. Los sustratos pueden ser orgánicos (turba o musgo, compost, cascarilla de arroz, cascarilla de café, aserrín y viruta, fibra de coco, peat moss), inertes (arena río, grava cuarzo, ladrillo, perlita, vermiculita, piedra pómez) y sintéticos (geles, espuma sintética de polietileno, poliestireno, poliuretano y fenólica) (Morgan, 2007).

5.5.6 Solución nutritiva

Una SN es la base de la alimentación de las plantas para su desarrollo. La SN es el agua con los nutrimentos minerales esenciales disueltos en ella, en concentraciones y proporciones adecuadas para lograr un crecimiento y desarrollo óptimo. Para preparar una SN se debe considerar las siguientes variables: especie y variedad de la planta, desarrollo vegetativo, estación del año y clima. Existen soluciones generales o universales (Hoagland, 1940; Steiner, 1968; Cooper, 1996; Sánchez, 2000). No existe una solución óptima para todos los cultivos, ya que no todos tienen las mismas exigencias nutrimentales.

La solución más conocida es la de Steiner, la cual consta de agua con oxígeno y de todos los nutrientes esenciales en forma iónica y, eventualmente de algunos compuestos orgánicos tales como los quelatos de fierro y de algunos otros micronutrientes que pueden estar presentes (Steiner,1968).

5.6 Efectos de la temperatura

El consumo hídrico y la absorción de minerales están influenciados por la temperatura de la solución contenida en el medio de cultivo (o el de la rizosfera). Su efecto es más negativo sobre la absorción mineral que sobre el consumo de agua, una mayor temperatura del medio radical supone una mayor absorción de sales (Urrestarazu *et al.*, 2002). La temperatura de la SN influye en la absorción de agua y nutrimentos. La temperatura óptima para la mayoría de las plantas es de aproximadamente 22 °C; en la medida que la temperatura disminuye, la absorción y asimilación de los nutrimentos también lo hace (Cornillon, 1988). La baja temperatura de la SN tiene mayor efecto en la absorción de fósforo que en la de nitrógeno y agua (Adams, 1994). Con temperaturas menores a 15 °C se presentan deficiencias principalmente de calcio, fósforo y hierro (Moorby y Graves, 1980). La baja temperatura favorece la deficiencia de calcio y la incidencia de pudrición apical de los frutos. Una de las causas de menor absorción de algunos nutrimentos cuando la temperatura de la SN es baja, se debe a que en esas condiciones la endodermis de la raíz se suberiza, con lo cual se reduce la permeabilidad y disminuye la absorción de agua y nutrimentos (Graves, 1983).

El control de la temperatura de la SN tiene poca importancia en los lugares de clima templado. En las zonas templadas es conveniente tener un sistema de calefacción para evitar temperaturas menores a 15 °C. La SN también debe protegerse de la radiación directa de los rayos solares para evitar su calentamiento, alteración química y microbiológica (Hothem *et al.*, 2003).

5.7 Efectos de la radiación

La capacidad de la radiación solar es de suma importancia para el invernadero, desafortunadamente, no toda la radiación que se recibe es aprovechada por las plantas. El requerimiento de las horas luz en las lechugas llega hacer de una intensidad de 8 wtt m^{-2} con una duración de 14 a 15 horas luz. Hee y Beom *et al.* (2001), recomiendan una intensidad de luz de 200 y 300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación del sitio experimental

El experimento se realizó en el periodo de mayo a junio de 2015, en las instalaciones del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, en un invernadero de tipo túnel donde las condiciones de temperatura mínima fueron de 17°C y máxima de 44°C, mientras que la humedad relativa osciló entre 30% y 57%.

6.2 Diseño del sistema aeropónico

El diseño del sistema aeropónico inició con la fabricación de tres estructuras de soporte, para lo cual, se utilizaron tubos metálicos cuadrangulares de una pulgada, cada estructura se soldó con medidas de 1.60 metros de largo, 0.80 metros de ancho y 1.20 metros de altura, a lo largo de la estructura, se usó tubos de separación cada 0.40 metros, posteriormente, las estructuras se pintaron con pintura anti-corrosiva para evitar daños por oxidación, ya que los tubos estaban en continuo contacto con el agua (Fig. 1). Las separaciones superiores y laterales de la estructura se cubrieron con placas de nieve seca, las cuales se forraron con plástico negro para evitar la pérdida de SN y proporcionar un ambiente oscuro y cerrado a las raíces. Además, en las placas de nieve seca se hizo una cavidad cada 20 cm, dentro de los cuales se colocaron las plantas de lechuga (Fig. 1). La instalación se hizo de tal forma que las placas de nieve seca cumplieran también la función de puertas, para que en cierto momento se quitaran y poder observar el desarrollo de las raíces o en su caso arreglar cualquier falla del sistema interno.

Para instalar el sistema de riego, se excavo el suelo para colocar cuatro tambos con una capacidad de 200 L cada uno, dentro de los cuales se colocaron las soluciones nutritivas. Además, se instaló una manguera a la mitad de la estructura por cada separación (cada 0.40 metros). A cada manguera se le colocaron ocho

nebulizadores, los cuales fueron los responsables de asperjar la SN en forma de neblina o nebulización a las raíces. A cada tanque se le instaló una bomba de ½ HP para bombear la SN a cada separación de la estructura. El apagado y encendido de cada bomba se controló con el uso de timers. En la parte inferior de la estructura se colocaron tinas de plástico rígido (40cm de ancho, 20 cm de profundidad y 80 cm de largo), las cuales se les perforó en la parte inferior para conectar la manguera que trasladaría la SN nuevamente al tanbo para almacenar y volver a nebulizarla en el posterior riego.



Figura 1. Diseño del sistema aeropónico para la producción de lechuga.

6.3 Material vegetativo

El material vegetativo que se utilizó en el experimento fue plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) de tipo Orejona cv Lulú, las cuales fueron trasplantadas el 17 de mayo del 2015; antes de realizar el trasplante se lavaron las raíces de tal manera que no quedar sustrato en ellas. Se colocó una planta en cada cavidad de las placas de nieve seca (cada 20 cm), sujetándolas con un trozo de esponja para que quedaran fijas y evitar que se cayeran dentro de los cajones (Fig. 2).



Figura 2. Instalación de las plantas de lechuga a la estructura del sistema aeropónico.

6.4 Tratamientos

Los tratamientos evaluados en este trabajo fueron los siguientes; dos concentraciones de la SN propuesta por Steiner (1961): 50% y 75%; dos temperaturas de la SN: 24°C y 28°C y tres posiciones de crecimiento de las plantas de lechuga en la cama de cultivo del sistema aeropónico: oriente, superior y poniente (Cuadro 3 y 4).

La temperatura ambiente del agua era de 24°C, y para aumentar la temperatura a 28°C, se utilizó un equipo de termostato para peceras de la marca Sunny, el cual contaba con un micro chip para regular la temperatura de la SN, con esto se mantuvo constantes las temperaturas durante todo el experimento.

También se midió la radiación fotosintéticamente activa (PAR, en $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) incidente sobre las plantas, para lo cual se utilizó el medidor HOBO. Además, se midió la radiación rojo (RED), rojo lejano (FAR RED) y la relación rojo /rojo lejano (RED/FAR RED) incidente sobre las plantas con ayuda del equipo de la marca Quantum Meter rojo/rojo lejano. Estas mediciones se hicieron una vez por semana y con un horario fijo (12 del mediodía). Se hicieron cuatro lecturas por posición de las plantas (oriente, superior y poniente) a una altura de 30 cm. La altura se tomó de la superficie de la planta hacia la parte más apical.

Cuadro 3. Tratamientos utilizados para evaluar la concentración y temperatura de la solución nutritiva y la posición de las camas de cultivo.

TRATAMIENTOS	CONCENTRACIÓN (%)	TEMPERATURA (°C)	POSICIÓN
1	50	24	Oriente
2	50	24	Superior
3	50	24	Poniente
4	50	28	Oriente
5	50	28	Superior
6	50	28	Poniente
7	75	24	Oriente
8	75	24	Superior
9	75	24	Poniente
10	75	28	Oriente
11	75	28	Superior
12	75	28	Poniente

Cuadro 4. Composición de las soluciones nutritivas evaluadas.

Fuente	75%	50%
Ca(NO₃)₂	86.7g	57.8g
K₂SO₄	50.7g	33.37g
KH₂PO₄	20.8g	13.88g
KNO₃	34.0g	22.69g
HNO₃	84.2ml	84.2ml
Micro elementos	14.4g	14.4g

Para efectuar el riego se conectó cada bomba a un timer, el cual se programó para hacer el encendido y apagado del sistema de riego durante el día y la noche. La programación de los timer durante el día se realizó con intervalos de riego de 15 minutos de encendidos y 15 minutos apagados (7:00 am a 10:30 pm); mientras que, para regar en la noche, los intervalos fueron de 30 minutos encendidos y 30 minutos apagados (10:30 pm a 3:00 am). Las bombas se mantenían apagadas a partir de las 3:00 am y se encendía a las 7:00 am.

6.5 Manejo del pH y CE en la solución nutritiva

Se realizaron mediciones y ajustes de CE, pH y balance nutricional de la SN con ayuda de sensores marca HORIBA durante todo el ciclo del cultivo (Cuadro 5). Los ajustes se hacían 3 veces al día (7:00am, 12:00 am y 7:00 pm).

Cuadro 5. Manejo del pH y CE durante el ciclo del cultivo.

CONCENTRACIÓN	pH	CE
75%	5.97	1.58 mS
50%	5.95	1.35 mS

6.6 Control de enfermedades

Durante el manejo del cultivo se realizó una aplicación de fungicida, ya que durante el cultivo se presentó el hongo podredumbre gris (*Botrytis cinerea*), para su control se realizó una aplicación de hidróxido cúprico al 65% a razón de un ml/litro de agua vía fertirriego, la respuesta al fungicida fue satisfactoria.

6.7 Variables analizadas

El experimento se mantuvo durante 41 días después del trasplante. Al final del ciclo del cultivo se tomaron 3 plantas por repetición para evaluar las siguientes variables: altura de la planta, ancho de hoja, longitud de raíz, calidad de la planta (la cual se hizo en forma visual), volumen de raíz (utilizando una probeta), peso fresco de la hoja, peso fresco de la raíz, peso seco de la hoja y peso seco de la raíz.

6.8 Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento fue diseñado en bloques completos al azar con un arreglo factorial de 2 x 2 x 3, utilizando tres repeticiones por tratamiento; cada repetición consistió de 12 plantas, dando un total de 432 plantas. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias fue de acuerdo a la

prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) utilizado el programa Statistical Analysis Systems (SAS) versión 9.0.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados indican que las plantas creciendo con SN de mayor concentración muestran un efecto significativo en las siguientes variables: longitud de raíz, peso seco de la raíz y peso seco de la hoja (Cuadro 6); así mismo, las plantas que crecieron con temperaturas altas muestran una disminución significativa en el peso fresco de hoja, peso fresco de la raíz, volumen de raíz y peso seco de la hoja (Cuadro 6).

En cuanto a la posición en las camas de cultivo, se observó efecto significativo en el crecimiento de las plantas en las siguientes variables: ancho, calidad visual, longitud de raíz, peso fresco de hoja, peso fresco de raíz, volumen de raíz, peso seco de raíz y peso seco de hoja (Cuadro 6).

Cuadro 6. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en un sistema aeropónico semi automatizado.

	Altura (cm)	Ancho (cm)	Calidad visual	LR (cm)	PFH (g)	PFR (g)	VR (mm)	PSR (g)	PSH (g)
Solución									
50%	27.8	18.4	2.8	76.5b	278.9	98.4	669.7	2.4b	10.0b
75%	27.3	19.6	2.8	90.6a	301.8	90.5	664.7	2.9a	12.4a
ANOVA	NS	NS	NS	$P \leq 0.004$	NS	NS	NS	$P \leq 0.033$	$P \leq 0.001$
Temperatura									
24°C	28.2	19.1	2.8	81.9	311.2a	105.2a	673.9a	2.7	10.4b
28°C	26.8	18.9	2.8	85.3	269.5b	83.7b	660.5b	2.6	12.1a
ANOVA	NS	NS	NS	NS	$P \leq 0.028$	$P \leq 0.009$	$P \leq 0.004$	SN	$P \leq 0.015$
Posición									
Oriente	27.3	15.9b	3.6a	68.3b	226b	87.8b	645.4b	1.8b	9.5b
Superior	27.6	24.8a	1.2b	110a	433.4a	110.7a	712.7a	4.5a	15.9a
Poniente	27.7	16.2b	3.7a	72.4b	211.5b	84.9b	643.5b	1.7b	8.3b
ANOVA	NS	$P \leq 0.001$	$P \leq 0.001$	$P \leq 0.001$	$P \leq 0.001$	$P \leq 0.001$	$P \leq 0.004$	$P \leq 0.001$	$P \leq 0.001$
Interacción ST	NS	NS	NS	$P \leq 0.025$	NS	NS	NS	NS	NS
Interacción TP	NS	NS	NS	$P \leq 0.028$	NS	NS	NS	NS	NS
Interacción SP	$P \leq 0.038$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Interacción STP	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p \leq 0.05$. NS= No significativo. ANOVA= análisis de varianza.

VARIABLES ANALIZADAS LR= longitud de raíz. PFH=peso fresco de hoja. PFR=peso fresco de raíz. VR=volumen de raíz. PSR= peso seco de raíz. PSH= peso seco de hoja. Interacción ST= solución/temperatura. Interacción TP=temperatura/posición. Interacción SP= solución/posición. Interacción STP= solución/temperatura/posición.

7.1 Altura

Al elevarse la concentración de la SN, así como la temperatura de la misma se observa una reducción en la altura de las plantas; estas diferencias sin embargo no fueron significativas (Fig. 3). La posición de las plantas en las camas de cultivo tampoco mostró efectos significativos, sin embargo, las plantas que ocuparon la parte superior así como el poniente de las camas resultaron con mayor altura (Fig. 3). Las plantas tratadas con la concentración de 50% y 24°C fueron las mejores respecto a esta variable; en cuanto a la posición la más favorable fue el lado poniente de las camas. Stagnari *et al.* (2015) mencionan que cuando las plantas están expuestas a una baja densidad de flujo de fotones fotosintéticos, se observan síndromes como disminución o aumento del área de la hoja y el alargamiento del pecíolo. Por otra parte, Arcos *et al.* (2011), mencionan que se debe cuidar no sobrepasar las concentraciones adecuadas de elementos minerales disueltos en la SN, la absorción de agua y por ende la de los nutrientes disminuye afectando así el crecimiento del cultivo.

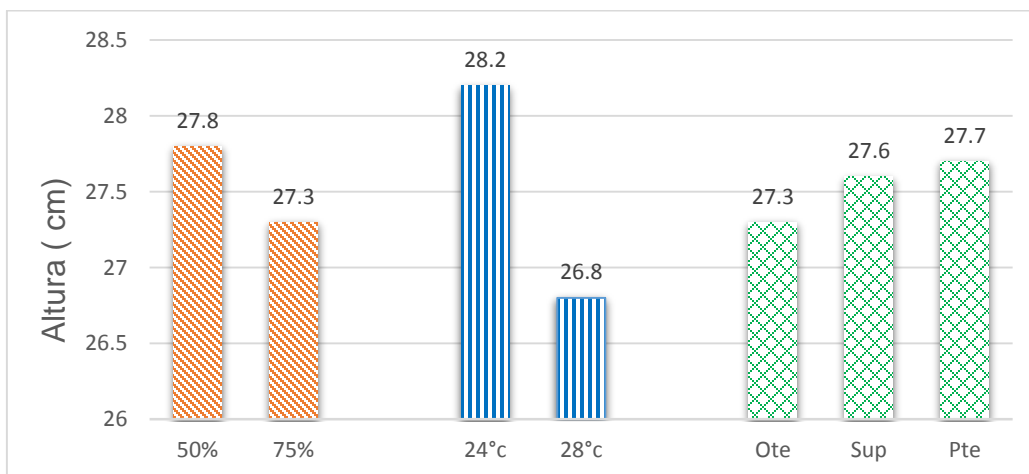


Figura 3. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo, en la altura de las de lechuga en un sistema aeropónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

7.2 Ancho

Al elevarse la concentración y temperatura de la SN no hubo efecto significativo en el ancho de las plantas (Fig. 4), mientras que la posición en las camas de cultivo si hubo un efecto significativo, pues las plantas ubicadas en la parte superior de las camas resultaron con mayor anchura (Fig. 4). Silva (2016) menciona que al reducir la intensidad lumínica y la alta temperatura, las hojas se mantienen más largas que anchas, lo cual evitaría la formación del cogollo. Por lo anterior, las técnicas empleadas para reducir la temperatura serían el blanqueo del techo del polietileno del invernadero y a su vez la colocación de malla sombra en su interior (Reyes *et al.*, 2015).

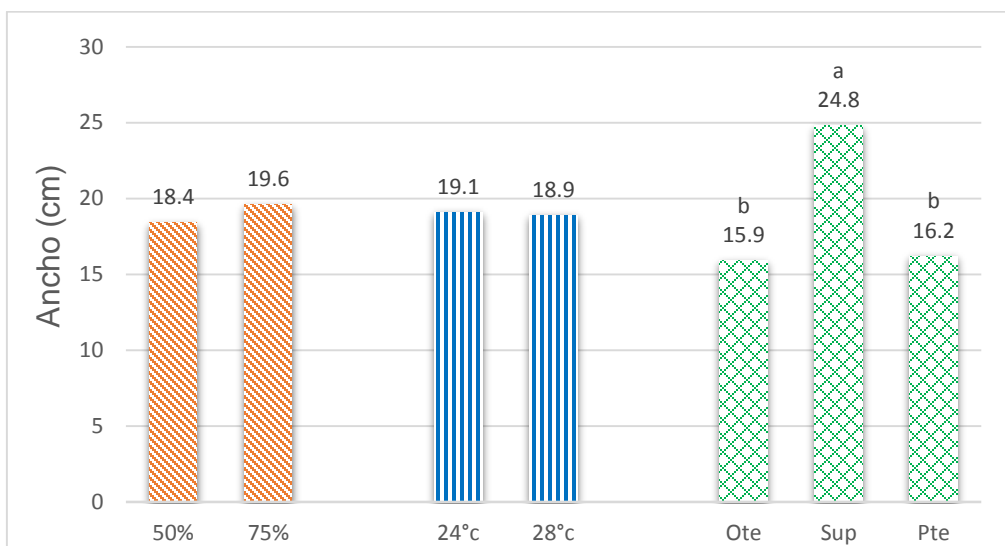


Figura 4. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el ancho de las plantas de lechuga en un sistema aeropónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

7.3 Calidad visual

No se observó un efecto significativo al elevarse la concentración y temperatura de la SN en la calidad visual de las plantas (Fig. 5); sin embargo, la posición de las plantas en las camas del cultivo si la afectó significativamente, pues las plantas que ocuparon la parte oriente y poniente resultaron con menor calidad, mientras que, la mejor calidad se observó en el lado superior de las camas (Fig. 5). En cuanto a posición, la calidad visual disminuyó debido al desbalance entre la radiación rojo y rojo lejano (Lazo, 2010). El alargamiento en plantas con tallo corto como la lechuga, es un efecto de altas temperaturas, debido principalmente a una mayor producción de giberelinas, lo que ocurre en condiciones naturales en verano, cuando los días son largos y calurosos.

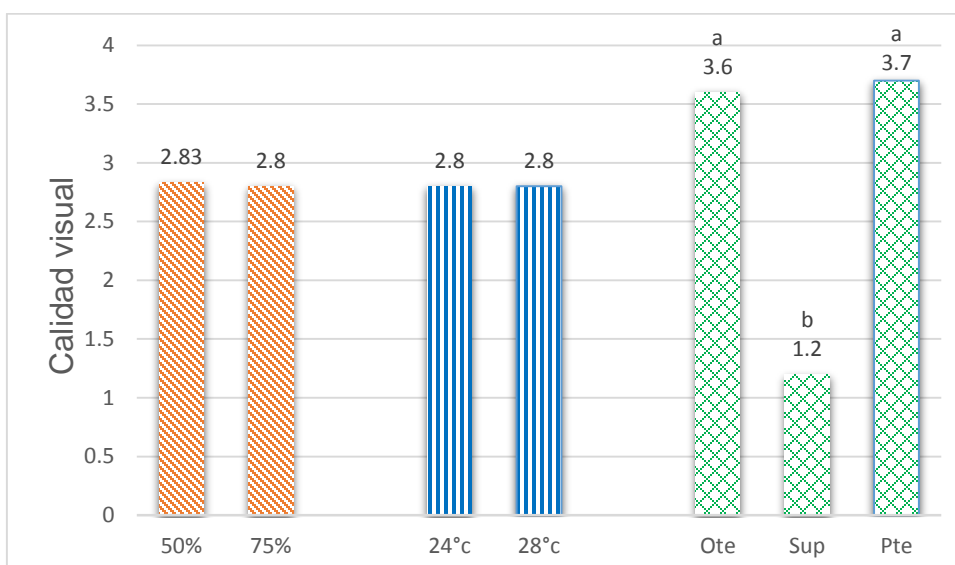


Figura 5. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en la calidad de las plantas del cultivo de lechuga en el sistema aeropónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente. 1=alta calidad, 5=baja calidad.

7.4 Longitud de raíz

La longitud de la raíz fue significativamente mayor en las plantas que tuvieron mayor concentración de la SN, mientras que en la temperatura no tuvo efecto sobre este parámetro (Fig. 6). La posición de las plantas si afectó significativamente la longitud de la raíz, pues las plantas que ocuparon el lado superior resultaron con raíces más largas (Fig. 6). Las plantas tratadas en concentración de 75% tuvieron mayor crecimiento radicular, en cuanto a la posición la mejor fue el lado superior de las camas. Piurizaca *et al.* (2016) mencionan que la temperatura óptima para el desarrollo de la lechuga es de 15 a 18°C, soportando una temperatura máxima de 24° y mínima de 7°C; si la temperatura es baja, el desarrollo se detendrá, mientras tanto, si la temperatura es alta acelerará el desarrollo del tallo floral y por lo tanto la calidad de la lechuga se verá afectada debido a la acumulación de látex amargo en las venas. Por otra parte, Graves (1983) menciona que las plantas de tomate a altas temperaturas no satisfacen la demanda de oxígeno debido a que a mayor temperatura la difusión de este gas aumenta, el crecimiento vegetativo se incrementa a una mayor magnitud a la deseable y disminuye la fructificación.

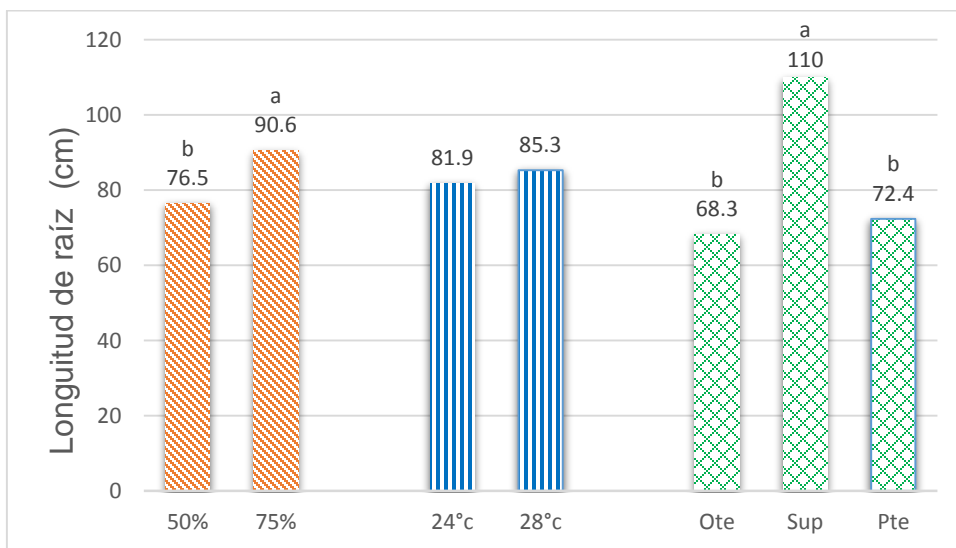


Figura 6. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en la longitud de raíz de las plantas de lechuga en un sistema aerónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

7.5 Peso fresco de hoja

Al elevarse la concentración de la SN no se observa un efecto significativo sobre el peso fresco de la parte aérea de las plantas, sin embargo, al elevarse la temperatura se presentó una reducción significativa en este parámetro (Fig. 7). La posición de las plantas en la cama de cultivo también tuvo efecto significativo, siendo las plantas que ocuparon la parte superior en las camas las que resultaron con mayor peso fresco de la parte aérea. La temperatura de 24°C tuvo mayor efecto en el peso fresco de la hoja, en cuanto a la posición la mejor fue el lado superior de las camas ya que la radiación era más directa y las plantas en esa posición absorbían mejor la luz. Hoque *et al.* (2004) encontraron que la mejor calidad de la cosecha se obtuvo con una moderada aplicación de fósforo; además hallaron que el incremento de las dosis de nitrógeno y fósforo gradualmente aumentaban los niveles de glucosa.

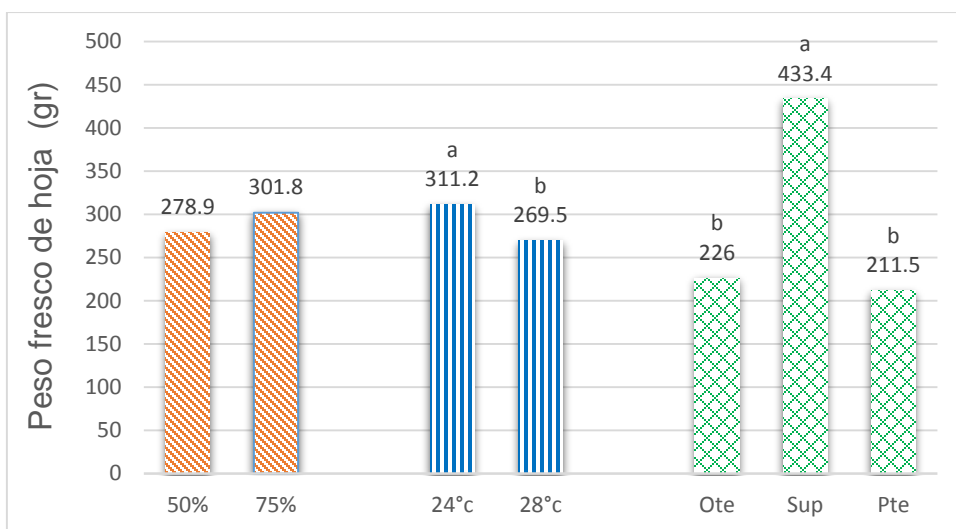


Figura 7. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el peso fresco de la hoja de la planta de lechuga en un sistema aerónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

7.6 Peso fresco de raíz

En cuanto al peso fresco de la raíz, al elevarse la concentración de la SN no se observa un efecto significativo, sin embargo, al elevarse la temperatura hubo una reducción significativa (Fig. 8). La posición de las plantas en la cama de cultivo mostró un efecto significativo, las plantas que ocuparon la parte superior de la cama resultaron con mayor peso fresco de raíz. Las plantas tratadas en concentración de 50% y temperatura de 24°C fueron mejor respecto a esta variable. De acuerdo a Ribas *et al.* (2000), en la ausencia del agua, las plantas de lechuga reaccionan inmediatamente al estrés disminuyendo su transpiración. Cuando las estomas se cierran debido a este proceso fisiológico disminuye la actividad fotosintética. Por otra parte, Fontero (1996), menciona que una adecuada disponibilidad de agua hace que las plantas tengan buena disponibilidad de oxígeno, lo que favorece los procesos de división celular y por lo tanto el crecimiento de las raíces.

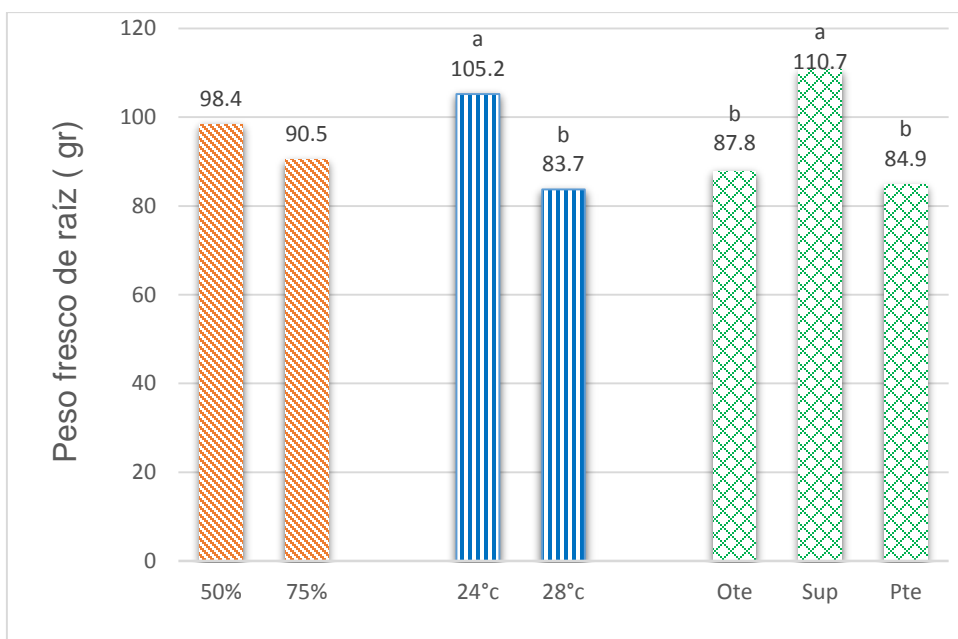


Figura 8. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el peso fresco de la raíz de la planta de lechuga en un sistema aeropónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

7.7 Volumen de raíz

El volumen de raíces no fue afectado por la concentración de la SN, aunque al elevarse la temperatura de la misma se observó una reducción significativa en el volumen de las raíces (Fig. 9). La posición de las plantas en las camas de cultivo tuvo efectos significativos, resultando con mayor volumen de raíz aquellas plantas que ocuparon la parte superior de las camas. Las plantas tratadas en concentración de 50% y temperatura de 24°C fue el mejor respecto a esta variable. Chong *et al.* (1982) analizaron las temperaturas de la SN en un sistema NFT (nutrient film technique) y observaron que el crecimiento radical y parte aérea en plantas de tomate fue favorecido con 25 °C.

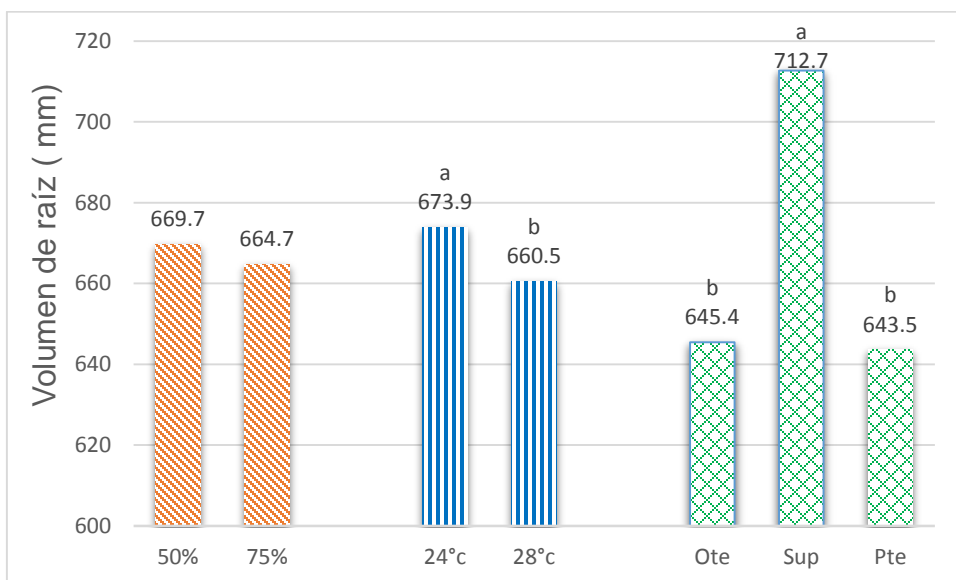


Figura 9. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el volumen de raíz de la lechuga en un sistema aeropónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

7.8 Peso seco de raíz y hojas

Al elevarse la concentración de la SN se observa que aumentó el peso seco de raíz y de la parte aérea de las plantas, sin embargo, al elevarse la temperatura no se observa diferencia significativa (Fig. 10 y 11). La posición de las plantas en la cama de cultivo si mostró efectos significativos, ya que las plantas ubicadas en la parte superior resultaron con mayor peso seco de raíz y parte aérea.

Las plantas tratadas en concentración de 75% y temperatura de 24°C fue el mejor respecto a la variable de peso seco de raíz, mientras que la concentración de 75% y temperatura de 28°C fue mejor para la variable de peso seco de hoja. Estos resultados concuerdan con los resultados reportados por Ismail y Ahmad (1997), ellos reportaron que el peso seco en plantas de tomate de cascara aumenta al elevarse la concentración de la SN, debido a la menor disponibilidad de agua y la raíz tiende a desarrollarse más. Sin embargo, otras investigaciones indican que las raíces responden al exceso de minerales mediante el engrosamiento y desarrollo más lento (Zobel, 1995). Por otro lado, Mata (2010) reportó que la cantidad como la calidad de la luz afectan el peso seco de las plantas, dependiendo de la especie.

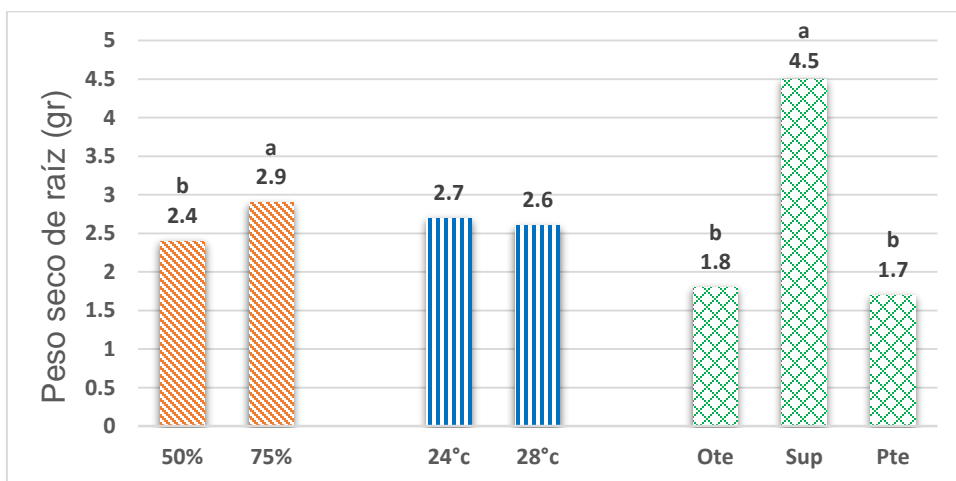


Figura 10. Efectos de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las camas de cultivo en el peso seco de raíz de la lechuga bajo un sistema aeropónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

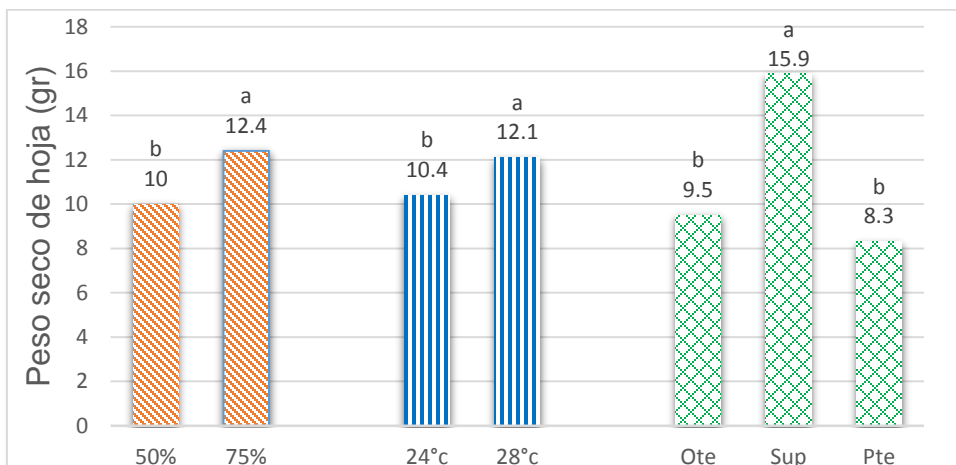


Figura 11. Efecto de la concentración, temperatura de la solución nutritiva y posición de las plantas en la cama de cultivo en el peso seco de la hoja de la lechuga en un sistema aeropónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

7.9 Interacción de concentración y posición.

Se detectó una interacción significativa entre la concentración de la SN con la posición de las plantas en la cama de cultivo (Fig. 12); mientras que las plantas que ocuparon la parte superior y el poniente de la cama mostraron un aumento en la altura al subir la concentración, aquellas que se encontraban en el oriente de las mismas disminuyeron. Pardossi *et al.* (2009), mencionan que la salinidad alta en el sistema con recirculación reduce el rendimiento del cultivo.

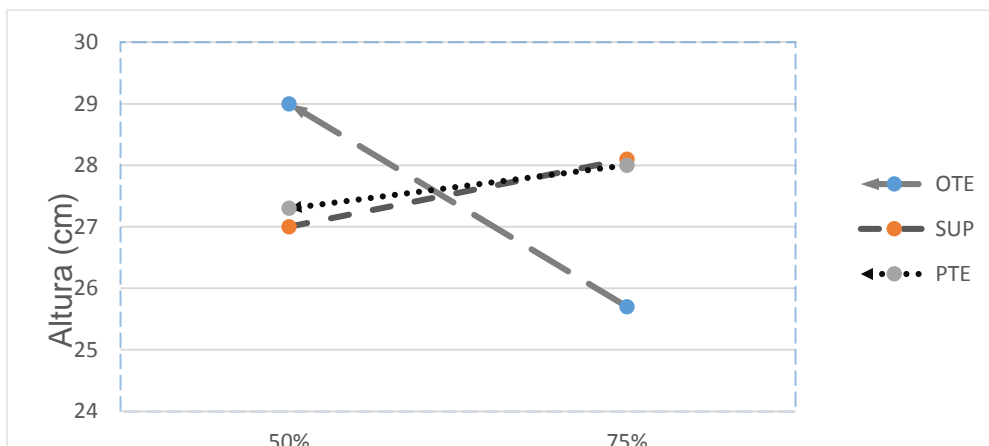


Figura 12. Interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la posición de las plantas en la cama de cultivo de lechuga en un sistema aeropónico. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

7.10 Interacción de la concentración, temperatura y posición

La concentración de la SN tuvo una interacción significativa con la temperatura de la misma sobre la longitud de la raíz (Fig. 13). En ambas temperaturas, la longitud de la raíz aumentó al subir la concentración de la SN; sin embargo, el aumento fue proporcionalmente mayor en las plantas que fueron irrigadas con la solución a 24 °C. Se detectó una interacción significativa entre la temperatura y la posición de las plantas en la cama del cultivo, las plantas que ocuparon la parte poniente y superior al elevarles la temperatura aumentaron la longitud de raíz, mientras que las plantas que ocuparon el oriente, al subirles la temperatura disminuyeron la longitud de raíz (Fig. 14).

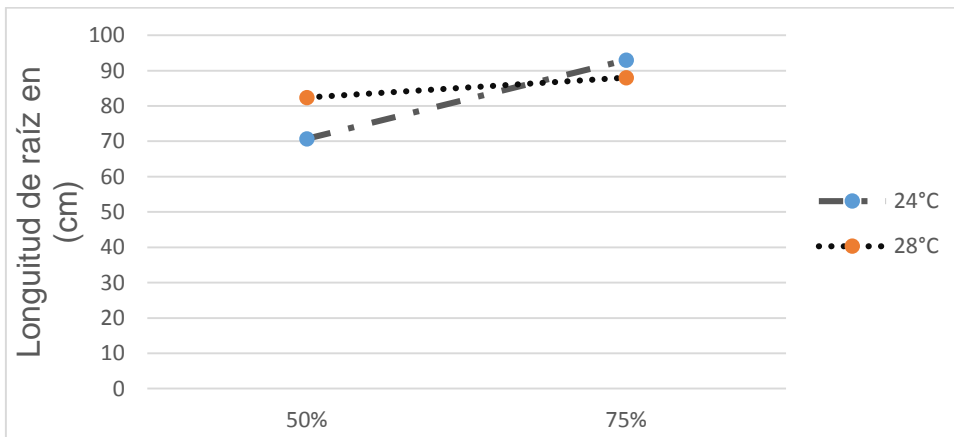


Figura 13. Interacción entre la concentración y temperatura de la solución nutritiva en el cultivo de lechuga en Aeroponía. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

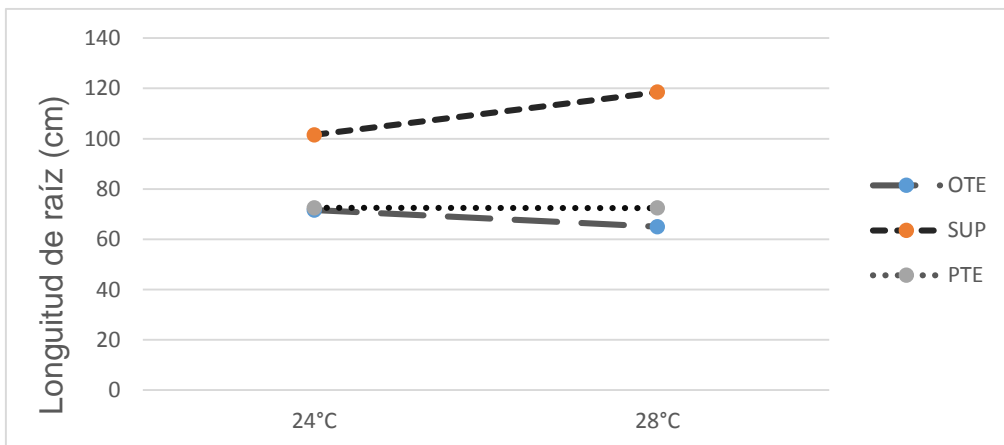


Figura 14. Interacción entre la temperatura de la solución nutritiva y la posición de las camas de cultivo de lechuga en aeroponía. Ote= oriente. Sup= superior. Pte=poniente.

7. 11 RADIACIÓN PAR, RED, FAR RED Y RED/FAR RED

7.11.1 RADIACIÓN PAR

En la parte superior de la cama de cultivo se presentó una mayor radiación PAR en el muestreo realizado el 24 de mayo, el contraste es más notorio (Fig. 15). Asimismo, en las paredes laterales de la cama de cultivo, conforme iba aumentando la altura, la radiación PAR incrementó.

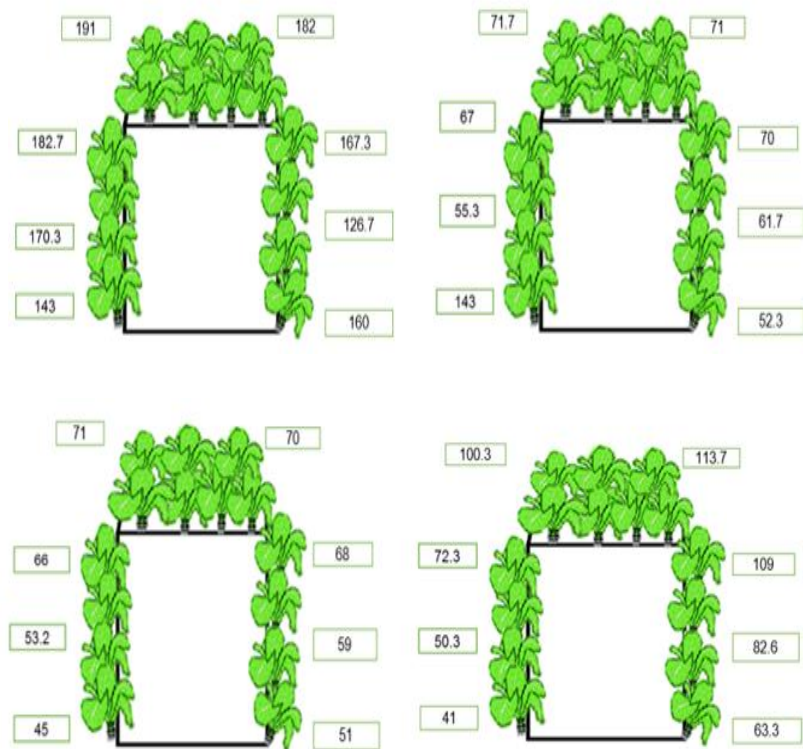


Figura 15: Radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) de las camas de cultivos evaluadas en diferentes fechas durante el ciclo del cultivo.

7.11.2 RED

En la parte superior de las camas de cultivo se observa mayor radiación RED en el muestreo realizado el 24 de mayo, el contraste es más notorio, así mismo en las paredes laterales de la cama de cultivo, conforme iba aumentando la altura, la radiación RED iba incrementando (Fig. 16).

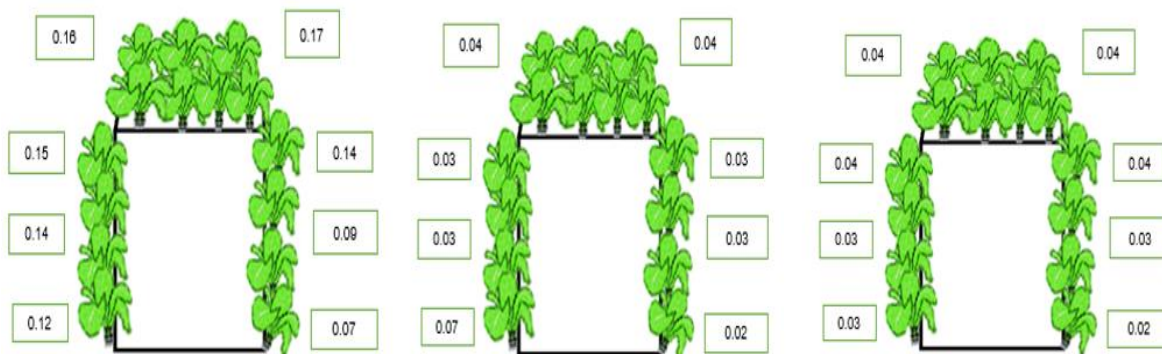


Figura 16: Radiación RED de las camas de cultivo evaluadas durante diferentes fechas durante el ciclo del cultivo.

7.11.3 FAR RED

En la parte superior de las camas de cultivos se observa la mayor radiación FAR RED en el muestreo realizado el 24 de mayo, el contraste es más notorio que en las otras fechas; así mismo, en las paredes laterales de las camas de cultivos, conforme iba aumentando la altura, la radiación FAR RED iba incrementando (Fig. 17).

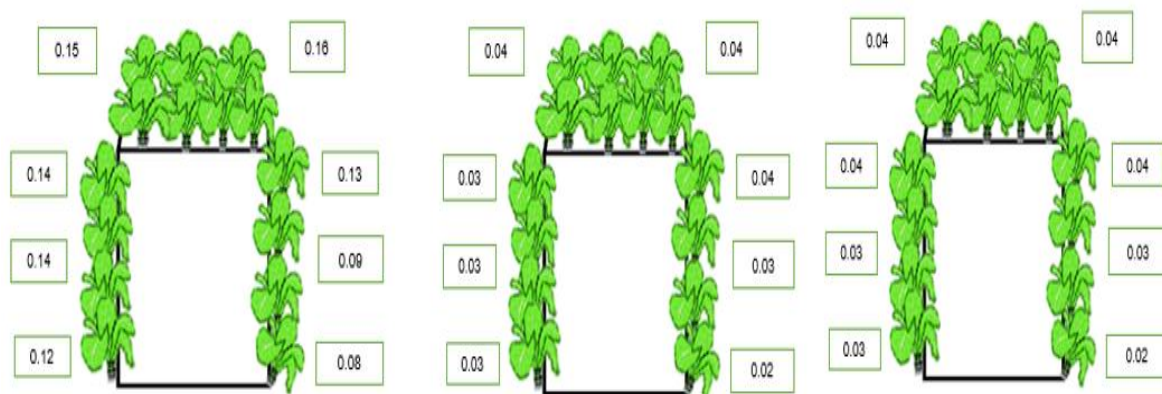


Figura 17: Radiación FAR RED de las camas de cultivo evaluadas durante diferentes fechas del ciclo del cultivo.

7.11.4 RED/FAR RED

En la parte superior de las camas de cultivo se observa la mayor radiación RED/FAR RED, en el muestreo del 24 de mayo es más notorio, mientras que en los otros días no se determinó radiación, en las paredes laterales se observa como fue disminuyendo conforme se iban haciendo las mediciones (Fig. 18).

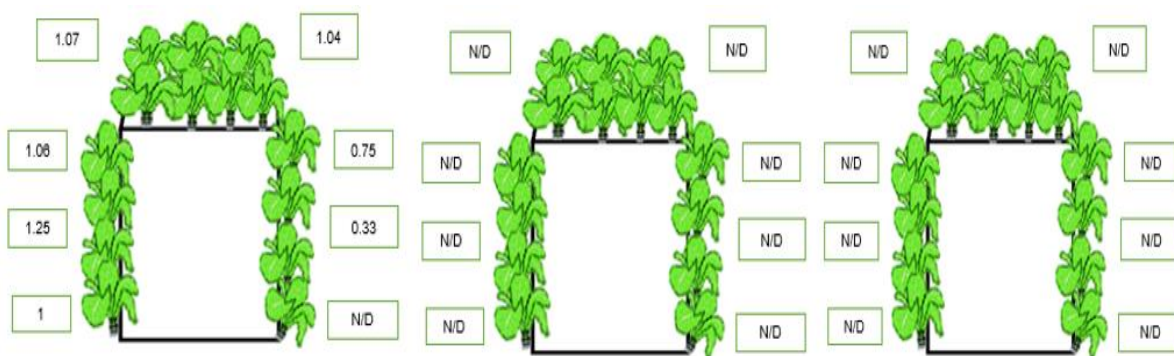


Figura 18: Radiación RED/FAR RED de las camas de cultivo evaluadas durante diferentes fechas en el ciclo del cultivo.

En cuanto a la posición de todas las variables, la mejor fue el lado superior, esto debido a que las plantas absorbían mejor la radiación PAR, RED y FAR RED. Torres y Karina (2012) y Bustamante Martínez (2016), describen que la luz es un factor muy importante y necesario para el desarrollo de las plantas, siendo esta la energía necesaria para realizar su proceso fisiológico de fotosíntesis. Otros autores dicen que los cambios en la relación RED/FAR RED del ambiente donde las plantas se cultivan, modulan el tiempo a floración y consecuentemente definen el momento de cosecha (Runkle y Heins, 2001, 2003; Cerny *et al.*, 2003).

VIII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la investigación sugieren que la temperatura, concentración de la SN y la posición de la planta afectan el crecimiento de lechuga aeropónica, favoreciendo el crecimiento de estas plantas. La mejor combinación de concentración de SN es la de 50% y temperatura de 24°C, pues se presentó un mejor desarrollo de acuerdo a las variables evaluadas. En la posición de las camas se obtuvo mayor calidad en el lado superior esto debido a que las plantas captaban mejor la radiación.

IX. LITERATURA CITADA

- Arcos, B., Benavides, O. y Rodríguez, M. 2011. Evaluación de dos sustratos y dos dosis de fertilización en condiciones hidropónicas bajo invernadero en lechuga *Lactuca sativa* L. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(2), 95-108
- ASERCA. 2011. Lechuga. Claridades Agropecuarias. Pág. 442-425.
- Barbado, J. L. 2005. Hidroponía. Editorial Albatros SACi. Buenos Aires, Argentina.
- Bertsch, F. 2003. Absorción de nutrientes por los cultivos. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica. 307 p.
- Borrego, J. V.; Gomez, A. M., y Soria, C. B. 1999. Lechuga y escarola. S.A. Mundi Prensa.
- Bugarín, M. R.; Baca, C. G. A.; Martínez, H. J.; Tirado, T. J. L. y Martínez, G. A. 1998. Amonio/nitrato y concentración iónica total de la solución nutritiva en crisantemo. I. Crecimiento y floración. *Terra*, 16(2), 113-124.
- Bustamante Martínez, M.G. (2016). Estudio de los efectos de la luz leds sobre la producción en dos variedades de lechuga *Lactuca sativa* en un sistema hidropónico nft vertical. Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Guayaquil. Pág. 21.
- Cadahía, L. C. 2005. Fertirrigación. Cultivos hortícolas frutales y ornamentales. 3ª edición. Ediciones Mandí-Prensa, España. Pág. 77-314.
- Carrasco, G. y J. Izquierdo. 1996. La empresa hidropónica de mediana escala: la técnica de la solución nutritiva recirculante NFT. Universidad de Talca. Chile. Pág.31-40.
- Carrasco, G.; P. Ramírez y H. Vogel. 2007. Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre el rendimiento y contenido de aceite esencial en albahaca cultivada en NFT. *IDESIA*, 25: 59-62.
- Chong, P. K., and T. Ito. 1982. Growth, fruit yield and nutrient absorption of tomato plant as influenced by solution temperature in nutrient film technique. *J. Jap. Soc. HortScience*. 51: 44-50.
- Cornillon, P. 1988. Influence of root temperature on tomato growth and nitrogen nutrition. *Acta Horticulturae*. 229: 211-218.

Díaz M. 2003. Nutrición mineral y fertilización para el cultivo de lechuga.38.Costa Rica: Universidad de Rosta Rica, 38 p

Durán, J. M. 2000. Cultivos sin suelo de la hidroponía a la aeroponía (I). *Departamento de Produccion Vegetal :Fitotecnia.*

Favela, E.,C,Preciado, P.,R y Benavides, A., M.2016 Manual para la preparación de soluciones nutritivas .Pág.50-51

Flores, G. D. 2011. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva en el rendimiento y calidad de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) nativos cultivados en invernadero. Tesis de grado, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Graves, C. J. and R. G. Hurd. 1983. Intermittent circulation in the nutrient film technique. *Acta Horticulturae.* 133: 47-52.

Hee P, M. and Beom, L. Y. 2001. Effects of CO2 concentration, light intensity and nutriment level on growth of leaf lettuce in the plant factory. *Acta Horticulturae* 548: 377-383.

Hoque, M.; Ajwa, H. and Mou, B. 2004. Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization effects on nutritinal composition of lettuce. *HortScience* 39(4):872.

Intagri, 2017. La industria de los cultivos hidropónicos. Revisado el día 28 de mayo de 2017, en el sitio web: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/la-industria-de-los-cultivos-hidroponicos>.

Ismail, M. R. and Ahmad, R. 1997. Differential growth and yield responses of tomato plants grown in different solution concentration using nutrient film technique and sand culture. *Acta Horticulturae* 450: 499-455.

Lara, H. A. 1999. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra* 17: 221-229.

Lazo, J, y Ascencio, J. 2010. Efecto sobre diferentes calidades de luz sobre el crecimiento de *Cyperus rotndus*, *Biogro*, 22:153-158.

Mata, D. A. 2010. Manejo de la calidad de la luz como alternativa para el control del crecimiento en la producción de plantas ornamentales en maceta en los alrededores de Buenos Aires. *Rev.* 47. 60 p.

- Morgan, L. 2007. El cultivo hidropónico de lechugas. Casper publication Australia, 84 p.
- Mills, H. A.; Jones, J. B. and Wolf, B. 1996. Plant analysis handbook II: A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. Athens, GA: MicroMacro Publishing. Revisado el 9 de mayo de 2017, en la página web: <http://www.infoagro.com/hortalizas/lechuga.htm>.
- Montero, C.S. 2006. Evaluacion de seis estructuras de produccion hidroponica deversificada en el tropico humedo de Costa Rica. *Organizacion para Estudios Tropicales,(OET)*, Costa Rica, Bibliografia Nacional en Biologia Tropica (BINABITROP). Pág. 27-37.
- Moorby, J. and C. J. Graves. 1980. The effects of root and air temperature on the growth of tomatoes. *Acta Horticulturae*. 98: 29-43.
- Pardossi, A.; L. Incrocci; D. Massa; G. Carmassi, and R. Maggini. 2009. The influence of fertigation strategies on water and nutrient efficiency of tomato grown in closed soilless culture with saline water. *Acta Horticulturae*. 807: 445-450.
- Pérez, I.; Dell' Amico, J. M.; Parra, M.; Balibrea, M, E., y Bolarín, M. D. C. 1999. Efecto de la deficiencia de oxígeno en las raíces sobre las relaciones hídricas y el desarrollo de cuatro variedades de tomate (No.175).
- Piurizaca, A. 2016. Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y humedad para el cultivo de lechuga hidropónico. Tesis. Pág.53-54.
- Pomares, F. and Ramos, C. 2010. Fertilización de cultivos horticolas.Guía Práctica de fertilización racional de los cultivos.Vol.2. Ministerio de Medio Ambiental, Medio Rural y Marino.
- Resh, H. M. y Howard M. 1997.Cultivos hidropónicos: nuevas técnicas de producción: una guía completa de los métodos actuales de cultivo sin suelo para técnicos y agricultores profesionales, así como para los aficionados especializados. No. 631.585. Mundi-Prensa.
- Resh, M. H. 2006 Cultivos hidropónicos.5ª ed. Editorial Mundi-Prensa. Barcelona, España. Pág. 112-117.
- Reyes, R. A. 2015. Evaluación de un modelo para estimar la temperatura y humedad relativa en el interior de invernaderos.

Rodríguez, S.; D. Pinochet y F. Matus. 2001. Fertilización de los cultivos. Lom ediciones, Santiago de Chile, 117 p.

Runkle, E. and Heins, R. 2001. Specific functions of red, far red, and blue light in flowering and stem extension of long-day plants. *Journal of the American Society for HortScience*, 126: 275-282.

SAGARPA. 2011. Fertirrigación en el cultivo de lechuga en Guanajuato. Revisado el día 12 marzo de 2017, en el sitio Web: www.sagarpa.gob.mx.

SAGARPA. 2016. De diversos colores y texturas, la lechuga es protagonista de fresca. Revisado el día 15 abril de 2017, en al sitio Web: <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/de-diversos-colores-y-texturas-la-lechuga-es-protagonista-de-frescura>

Sánchez, Del C.F.; Escalante, R. E. R. 1988. Hidroponía. 3ª ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.

Silva, G. C. y Briones, C. S. 2016. Manual práctico del cultivo de lechuga Mundi-Prensa Libros, 19 p.

Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*. 15: 134- 154.

Steiner, A. A. 1968. Soilless culture. *Proceedings of the 6th Colloquium of the International Potash Institute*. Pág. 324-341.

Torres, L. & Karina, S. (2012). Efecto del Fotoperiodo en la Producción de Forraje Verde Hidropónico de maíz con Diferente Soluciones Nutritivas para Alimentación de Conejos en el periodo de Engorda.

Urrestarazu, G. 2002. *Tratados de cultivo sin suelo*, Madrid España: Mundi Prensa S.A. 201 p.

Urrestarazu, G. M.; Salas S., C 2004. Sistemas con sustratos y recirculación de la disolución nutritiva, pp. 362-420. In: *Tratado de cultivo sin suelo*. 2ª Ed. Urrestarazu G., M (ed.). Mundi Prensa S.A. Madrid, España.

Zobel, R. W. 1995. Genetic and environmental aspects of roots and seedling stress. *HortScience* 30: 1189-1192.