



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.

---

---

Programa de Estudios de Posgrado

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE SISTEMA  
AEROPÓNICO AUTOMATIZADO PARA EL CULTIVO  
DE *Stevia rebaudiana*.

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales  
(Orientación en Agricultura Sustentable )

P r e s e n t a

**Francisco Márquez Aquino**

La Paz, Baja California Sur, noviembre de 2020.

## ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 10 horas del día 22 del Mes de Octubre del 2020, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

**"Diseño y caracterización de sistema aeropónico automatizado para el cultivo de *Stevia rebaudiana*"**

Presentada por el alumno:

**Francisco Márquez Aquino**

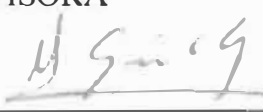
Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Agricultura Sustentable**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Fernando Daniel Von Borstel Luna  
Co-Director de Tesis



Dra. Alejandra Nieto Garibay  
Co-Director de Tesis



Dr. Tsuneyoshi Endo  
Co-Tutor



Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro,  
Directora de Estudios de Posgrado y  
Formación de Recursos Humanos.

## **Conformación de Comités**

### **Comité Tutorial**

Dr. Fernando Daniel Von Borstel Luna

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Co-Director de Tesis

Dra. Alejandra Nieto Garibay

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Co-Directora de Tesis

Dr. Tsuneyoshi Endo

Universidad de Totori

Co-Tutor

### **Comité Revisor**

Dr. Fernando Daniel Von Borstel Luna

Dra. Alejandra Nieto Garibay

Dr. Tsuneyoshi Endo

### **Jurado de Examen**

Dr. Fernando Daniel Von Borstel Luna

Dra. Alejandra Nieto Garibay

Dr. Joaquín Gutiérrez Jagüey

### **Suplente**


Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro

## Resumen

La *Stevia rebaudiana* Bertoni es una planta tropical, perene y arbustiva originaria de Paraguay, con un especial interés comercial por ser un edulcorante natural hasta 300 veces más dulce que el azúcar de caña. Sus metabolitos secundarios con bajo contenido calórico (rebaudiósidos y esteviósidos), no elevan la glucosa por lo que representan una alternativa para el consumo de azúcar en personas con hipertensión y diabetes. Por su parte, la aeroponía es una técnica de cultivo sin suelo en donde las raíces de las plantas se encuentran suspendidas en el aire dentro de un contenedor opaco y una Solución Nutritiva es asperjada de forma regular. La aeroponía permite reducir el consumo de agua hasta un 95 %, su mayor ventaja con respecto de la hidroponía es la oxigenación de las raíces. En el presente trabajo se diseñó y caracterizó un sistema aeropónico recirculante de baja presión para el cultivo de *Stevia rebaudiana*. Con este fin, se desarrolló un sistema automático de irrigación y módulos de medición de variables abióticas utilizando software y hardware libre, que permitieron monitorear el comportamiento del sistema aeropónico para su caracterización. Con los módulos de medición, se determinó que existe una correlación alta e inversamente lineal entre la temperatura y la humedad dentro del cuarto de cultivo ( $r=0.88$ ,  $r^2=0.77$ ). Por otro lado, se colocaron varios sensores de temperatura e iluminancia a lo largo del compartimento vertical que contiene a las raíces; se observó que la temperatura y luminosidad aumentan con respecto a la altura del compartimento vertical y que ambas presentan diferencias significativas ( $p<0.05$ ) correspondientes a la altura donde fueron medidas. De igual modo se observó que la temperatura es mayor dentro del compartimento vertical en comparación con el cuarto de cultivo, siempre que no exista una irrigación, ya que al probar diferentes irrigaciones se concluyó que puede reducirse la temperatura al interior del compartimento vertical. Asimismo, se percibió que la varianza de la temperatura del agua es menor que la varianza de la temperatura del aire dentro del compartimento para todos los casos. Se observó que a mayor frecuencia de irrigación, menor es la varianza de la temperatura dentro del compartimento vertical. Cada aspersión realizada, expresa una transferencia de temperatura del agua hacia el aire. En un ensayo con material biológico, se evaluaron tres Soluciones Nutritivas (SN) en concentraciones equivalentes, Hoagland, Fertiplus y Triple 19, las tres contenidas en 20 litros de agua cada una. Después de 35 días de cultivo se midieron distintas variables morfométricas; durante este tiempo no se realizó recambio de agua ni adición de nutrientes. Aunque existen diferencias significativas en la temperatura e iluminancia de las distintas secciones de altura del compartimento vertical, no existe evidencia de que éstas influyan en el crecimiento del cultivo. Por el contrario, las SN tienen un efecto importante en el desarrollo de las plantas. Con una ANOVA, se determinó que existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las SN. Sin embargo, para los tratamientos Triple 19 y Hoagland no existen diferencias significativas en la producción de biomasa aérea y área foliar, siendo estas variables las de mayor interés comercial; sin embargo, Hoagland tiene un costo 80 veces mayor que Triple 19. Finalmente se concluyó que es posible cultivar *Stevia rebaudiana* en un sistema aeropónico vertical aun con la existencia de variaciones de luz y temperatura a lo largo de la columna de cultivo.

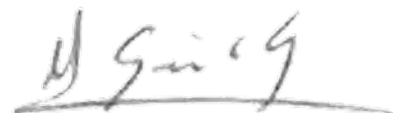
**Palabras clave:** Aeroponía, Stevia, Agricultura, Automatización, Arduino

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3304-9065>



Dr. Fernando Daniel Von Borstel Luna

Vo.Bo. Co-Directores



Dra. Alejandra Garibay Nieto

## Summary

The *Stevia rebaudiana* Bertoni is a tropical, perennial and bushy plant native from Paraguay. The main commercial interest is that it can be up to 300 times sweeter than cane sugar. Her secondary metabolites with low calorie content (rebaudiosides and steviosides) do not raise glucose and represent an alternative for the consumption of sugar in people with hypertension and diabetes. Furthermore, aeroponics is a soilless cultivation technique, where the roots of the plants are suspended in the air inside the dark container, where a nutrient solution is sprayed constantly. Aeroponics allows to reduce culture water consumption up to 95 %, his biggest advantage over hydroponics is oxygenation of the roots. In the present work, a low pressure recirculating aeroponic system was designed and characterized for the cultivation of *Stevia rebaudiana*. For that reason, an automatic system for irrigating and measuring modules for abiotic variables were developed using free software and hardware, which allowed monitor the behavior of the aeroponic system for its characterization. With the measuring modules, it was determined that exists a high and inversely linear correlation between temperature and humidity within the grow room ( $r = 0.88$ ,  $r^2 = 0.77$ ). On the other hand, by the use of several temperature and illuminance sensors placed along the height of vertical compartment containing the roots, show that there are significant differences of temperature and illuminance ( $p < 0.05$ ) according to the height where they were measured in the vertical compartment. In the same way, it is observed that the temperature is higher inside the root compartment compared to the growing room, as long as there is no irrigation, testing different irrigations it was observed that the temperature inside the vertical compartment can be reduced. Similarly, it was perceived that the variance in water temperature is less than the variance in air temperature within the compartment for all cases. It was concluded that, when the frequency of irrigation rises, the variance of the temperature inside the container decreases. Each spray carried out expresses a transfer of temperature from the water to the air. In a test with biological material, three nutritive solutions were evaluated in equivalent concentrations, Hoagland, Fertiplus and Triple 19, the three were dissolved in 20 liters of water each; after 35 days of culture, different morphometric variables were measured. During this time, no water exchange or nutrient addition was made. Although there are significant differences in the temperature and illuminance of the different heights of the vertical compartment, there is no evidence that they influence the growth of the crop. Therefore, the Nutritive Solutions have an important effect on the grown of the plants. With an ANOVA, it was determined that there are significant differences ( $p < 0.05$ ) between the nutritional solution treatments. However, for Triple 19 and Hoagland treatments there are no significant differences in the production of aerial biomass and leaf area, these being variables of greatest commercial interest. However, Hoagland has a cost 80 times higher than Triple 19. Finally it was concluded that it is possible to grow *Stevia rebaudiana* in a vertical aeroponic system even with the existence of light and temperature variations along the system column.

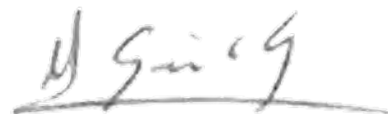
**Keywords:** *Aeroponics, Stevia, Agriculture, Automatization, Arduino*

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3304-9065>



Dr. Fernando Daniel Von Borstel Luna

Vo.Bo. Co-Directores



Dra. Alejandra Garibay Nieto

## Dedicatoria

*A mi madre y padre,  
por darme siempre la oportunidad de volar*

## Agradecimientos

A mis padres y mis hermanas, que aún en la distancia siempre me demostraron su amor infinito.

Agradezco a todos los trabajadores del CIBNOR, a la gente de limpieza, mantenimiento y seguridad que sostienen en las mejores condiciones este centro de investigaciones, aún en tiempos de confinamiento, sin duda, son ustedes el cimiento de un agradable ambiente laboral para realizar cualquier investigación, mi máximo reconocimiento.

Agradezco CONACYT por la beca de manutención otorgada número 874673.

Agradezco a todo el departamento de posgrado, en especial a Horacio Sandoval Gómez, Tania V. Núñez Valdez, Leticia Gonzáles Rubio Rivera y a Osvelia Ibarra Morales, mi más sincero agradecimiento por hacer de mis estudios una experiencia placentera y llena de oportunidades con un trato siempre amable y personalizado.

Agradezco a los técnicos del taller electromecánico del área de maquinado Jorge Cobos Anaya y Alfonso Álvarez Casillas por su apoyo técnico en el maquinado, corte, adaptación y creación de piezas utilizadas para la construcción de los sistemas aeropónicos verticales.

Agradezco al personal del laboratorio de biotecnología vegetal, al M.C. Margarito Rodríguez Álvarez, (responsable de laboratorio) y al M.C. Mario Arce Montoya † (técnico académico), a ambos por su disposición y amabilidad para realizar trabajos.

Agradezco al técnico Álvaro González Michel por la información proporcionada de la estación meteorológica m2900s11270 ubicada en el campo experimental del CIBNOR.

Al Dr. Rogelio Ramírez Serrano † por confiar en mi aunque no tuviera el perfil institucional y compartirme una magnífica idea que 2 años más tarde se convertiría en este trabajo.

Agradezco de forma muy especial a Mario Arce †

*“Amigo, me hubiera encantado agradecerte mil y un veces más por enseñarme tanto, gracias por regalarme lo que te quedaba de energía, con tanto entusiasmo, humildad y pasión.”*

Finalmente agradezco a mis directores de tesis, el Dr. Fernando Von Borstel Luna por la paciencia, las facilidades y el trabajo juntos; agradezco a la Dra. Alejandra Nieto Garibay por integrarse con gran entusiasmo en la recta final de este trabajo. Sin ustedes no hubiera sido posible esto.

Pese a todas las adversidades, hemos concluido este trabajo.

¡Muchas gracias a todos!



## Contenido

<b>Resumen</b> . . . . .	<b>i</b>
<b>Summary</b> . . . . .	<b>ii</b>
<b>Dedicatoria</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>Contenido</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>Lista de figuras</b> . . . . .	<b>viii</b>
<b>Lista de tablas</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>Abreviaturas</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b> . . . . .	<b>3</b>
2.1 <i>Stevia rebaudiana</i> Bertoni (1887) . . . . .	3
2.1.1 Nutrición de la <i>Stevia rebaudiana</i> . . . . .	5
2.2 Aeroponía . . . . .	6
2.3 Agricultura de precisión y automatización . . . . .	10
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> . . . . .	<b>12</b>
3.1 Importancia científica . . . . .	12
3.2 Importancia económica . . . . .	12
3.3 Importancia social . . . . .	12
<b>4. HIPÓTESIS</b> . . . . .	<b>13</b>
4.1 Pregunta científica . . . . .	13
4.2 Hipótesis . . . . .	13
<b>5. OBJETIVOS</b> . . . . .	<b>14</b>
5.1 Objetivo general . . . . .	14
5.2 Objetivos particulares . . . . .	14
<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS</b> . . . . .	<b>15</b>
6.1 Diseño y construcción del sistema aeropónico automatizado vertical . . . . .	15
6.1.1 Diseño y construcción del sistema aeropónico vertical . . . . .	16
6.1.2 Desarrollo de módulos de medición e irrigación automatizada . . . . .	17
6.2 Caracterización del sistema aeropónico . . . . .	18
6.2.1 Determinación del área de aspersión . . . . .	18
6.2.2 Mediciones de las variables físicas en el sistema aeropónico . . . . .	18
6.2.3 Medición de consumo eléctrico . . . . .	20
6.2.4 Evaluación de la frecuencia de irrigación . . . . .	21
6.2.5 Medición de la temperatura en los sistemas aeropónicos . . . . .	22
6.2.6 Medición de la temperatura en los sistemas aeropónicos con distintas con- figuraciones . . . . .	22
6.2.7 Análisis estadístico . . . . .	23
6.3 Cultivo aeropónico vertical de <i>Stevia rebaudiana</i> . . . . .	23
6.3.1 Material biológico . . . . .	24
6.3.2 Soluciones Nutritivas para el cultivo aeropónico de <i>Stevia</i> . . . . .	27
6.3.3 Medición de pH y C.E. en las Soluciones Nutritivas . . . . .	27

6.3.4	Lavado y desinfección de los sistemas aeropónicos . . . . .	28
6.3.5	Montaje del material biológico en los sistemas aeropónicos . . . . .	29
6.3.6	Medición de variables morfométricas . . . . .	30
6.3.7	Análisis estadísticos . . . . .	31
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>32</b>
7.1	Diseño y construcción del sistema aeropónico automatizado . . . . .	32
7.1.1	Fabricación del sistema aeropónico vertical . . . . .	32
7.1.2	Módulo de medición de variables físicas . . . . .	34
7.1.3	Módulo de medición de pH y C.E. . . . .	36
7.1.4	Módulo de control de irrigación . . . . .	38
7.2	Caracterización del sistema . . . . .	39
7.2.1	Área de aspersión . . . . .	40
7.2.2	Medición de humedad y temperatura en el sistema . . . . .	40
7.2.3	Medición de la iluminancia . . . . .	42
7.2.4	Temperatura dentro del sistema . . . . .	44
7.2.5	Efecto de la irrigación en el consumo eléctrico . . . . .	45
7.2.6	Efecto de la irrigación en la temperatura dentro del sistema . . . . .	47
7.2.7	Temperatura en los tres sistemas aeropónicos . . . . .	47
7.2.8	Temperatura en la habitación . . . . .	48
7.3	Cultivo aeropónico de <i>Stevia rebaudiana</i> . . . . .	49
7.3.1	Mediciones de pH y C.E. durante el cultivo . . . . .	49
7.3.2	Consumo eléctrico del sistema . . . . .	53
7.3.3	Consumo de agua . . . . .	53
7.3.4	Efecto de la luz y tratamientos de fertilización en las variables morfométricas de las plantas de <i>Stevia rebaudiana</i> . . . . .	53
7.3.5	Efecto de la temperatura y tratamientos de fertilización de las variables morfométricas de las plantas de <i>Stevia rebaudiana</i> . . . . .	61
7.4	Análisis de costo . . . . .	69
7.4.1	Sistema aeropónico y módulo de irrigación . . . . .	69
7.4.2	Módulos de medición de variables . . . . .	70
7.4.3	Costo de Soluciones Nutritivas . . . . .	76
7.4.4	Costo aproximado de operación por cultivo . . . . .	76
<b>8.</b>	<b>DISCUSIÓN . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>85</b>
<b>10.</b>	<b>LITERATURA CITADA . . . . .</b>	<b>87</b>
<b>11.</b>	<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>92</b>
<b>A.</b>	<b>Planos de construcción del módulo aeropónico para 24 plantas . . . . .</b>	<b>92</b>
<b>B.</b>	<b>Formulación del medio Murashige Skoog . . . . .</b>	<b>94</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b>	Representación general de un cultivo aeropónico horizontal . . . . .	7
<b>Figura 2.</b>	Perfil de PVC y montaje de aspersor para la realización de imágenes. . . . .	19
<b>Figura 3.</b>	Distribución de sensores para la primera etapa de mediciones físicas del sistema aeropónico . . . . .	20
<b>Figura 4.</b>	Módulo de medición de consumo de energía eléctrica. . . . .	21
<b>Figura 5.</b>	Diagrama de distribución de sensores de temperatura en los tres sistemas aeropónicos . . . . .	22
<b>Figura 6.</b>	Diagrama de distribución de sensores de temperatura en dos sistemas aeropónicos y en la habitación . . . . .	23
<b>Figura 7.</b>	Sitio de estudio-cuarto de cultivo . . . . .	24
<b>Figura 8.</b>	Sitio de estudio-invernadero . . . . .	24
<b>Figura 9.</b>	Cultivo <i>in vitro</i> de estevia . . . . .	25
<b>Figura 10.</b>	Aclimatación de estevia en el cuarto de cultivo . . . . .	26
<b>Figura 11.</b>	Siembra de esquejes de estevia . . . . .	27
<b>Figura 12.</b>	Orden y distribución de plántulas en los sistemas aeropónicos . . . . .	29
<b>Figura 13.</b>	Diagrama de corte del material biológico para el análisis de morfometría. . . . .	30
<b>Figura 14.</b>	Diagrama general del sistema aeropónico vertical . . . . .	33
<b>Figura 15.</b>	Modelo general del prototipo de sistema aeropónico vertical. . . . .	34
<b>Figura 16.</b>	Módulo de medición de variables físicas. . . . .	35
<b>Figura 17.</b>	Diagrama a bloques del módulo de medición de variables físicas . . . . .	36
<b>Figura 18.</b>	Módulo de medición de variables químicas . . . . .	37
<b>Figura 19.</b>	Diagrama a bloques del módulo de medición de variables químicas . . . . .	37
<b>Figura 20.</b>	Módulo de control de irrigación . . . . .	38
<b>Figura 21.</b>	Diagrama a bloques del módulo de control de irrigación . . . . .	39
<b>Figura 22.</b>	Patrón del área de aspersión . . . . .	41
<b>Figura 23.</b>	Gráfica de la humedad y temperatura dentro del compartimento vertical del sistema aeropónico . . . . .	42
<b>Figura 24.</b>	Gráficas de las mediciones de iluminancia . . . . .	43
<b>Figura 25.</b>	Gráfica de las mediciones de temperatura en el interior del compartimento vertical . . . . .	45
<b>Figura 26.</b>	Gráficas de la temperatura del compartimento vertical o a distintas frecuencias de irrigación . . . . .	48
<b>Figura 27.</b>	Mediciones y ajustes del pH de la SN Hoagland . . . . .	51
<b>Figura 28.</b>	Mediciones y ajustes del pH de la SN Fertiplus . . . . .	51
<b>Figura 29.</b>	Mediciones y ajustes del pH de la SN Triple 19 . . . . .	52
<b>Figura 30.</b>	Mediciones de Conductividad Eléctrica . . . . .	52

## Lista de tablas

<b>Tabla I.</b>	Tabla de cultivos sin suelo comparados con el cultivo tradicional. . . . .	9
<b>Tabla II.</b>	Tabla de frecuencias de irrigación evaluadas . . . . .	21
<b>Tabla III.</b>	Comparación de nutrientes en las Soluciones Nutritivas utilizadas . . . . .	28
<b>Tabla IV.</b>	Tabla de especificaciones de los sensores del módulo de medición . . . . .	35
<b>Tabla V.</b>	Tabla de especificaciones de los sensores de pH y C.E. . . . .	38
<b>Tabla VI.</b>	Tabla de resultados del área de aspersión. . . . .	40
<b>Tabla VII.</b>	ANOVA de la iluminancia al exterior del sistema aeropónico . . . . .	44
<b>Tabla VIII.</b>	Prueba de DUNCAN para la iluminancia al exterior del sistema aeropónico	44
<b>Tabla IX.</b>	ANOVA de la temperatura al interior del compartimento vertical . . . . .	46
<b>Tabla X.</b>	Prueba de DUNCAN para la temperatura al interior del compartimento vertical . . . . .	46
<b>Tabla XI.</b>	Tabla de resultados del consumo eléctrico . . . . .	46
<b>Tabla XII.</b>	Matriz de correlación de Pearson para los tres sistemas aeropónicos . . . . .	49
<b>Tabla XIII.</b>	Matriz de correlación de Pearson para distintas condiciones . . . . .	50
<b>Tabla XIV.</b>	Consumo de agua del cultivo . . . . .	53
<b>Tabla XV.</b>	ANOVA de variables morfométricas iniciales para los factores de luz y SN	54
<b>Tabla XVI.</b>	Prueba DUNCAN de variables morfométricas iniciales de acuerdo con distintas secciones de luz . . . . .	54
<b>Tabla XVII.</b>	ANOVA de variables morfométricas finales para los factores de luz y SN	55
<b>Tabla XVIII.</b>	Prueba DUNCAN de variables morfométricas finales de acuerdo con dis- tintas SN . . . . .	56
<b>Tabla XIX.</b>	ANOVA de área foliar final para los factores de luz y SN . . . . .	56
<b>Tabla XX.</b>	Prueba DUNCAN de área foliar final de acuerdo con distintas SN . . . . .	57
<b>Tabla XXI.</b>	ANOVA de los índices de crecimiento para los factores de luz y SN . . . . .	57
<b>Tabla XXII.</b>	Prueba DUNCAN de los índices de crecimiento de acuerdo con distintas SN	58
<b>Tabla XXIII.</b>	ANOVA del contenido de humedad para los factores de luz y SN . . . . .	59
<b>Tabla XXIV.</b>	Prueba DUNCAN de los índices de contenido de humedad de acuerdo con distintas SN . . . . .	60
<b>Tabla XXV.</b>	Prueba DUNCAN de los índices de contenido de humedad de acuerdo con distintas secciones de luz . . . . .	60
<b>Tabla XXVI.</b>	Prueba DUNCAN de los índices de contenido de humedad de acuerdo con distintas secciones de luz y SN . . . . .	61
<b>Tabla XXVII.</b>	ANOVA de las variables morfométricas iniciales para los factores de tem- peratura y SN . . . . .	62
<b>Tabla XXVIII.</b>	Prueba DUNCAN de variables morfométricas iniciales de acuerdo con distintas secciones de temperatura . . . . .	62
<b>Tabla XXIX.</b>	ANOVA de las variables morfométricas finales para los factores de tem- peratura y SN . . . . .	63
<b>Tabla XXX.</b>	Prueba DUNCAN de variables morfométricas finales de acuerdo con dis- tintas SN . . . . .	64
<b>Tabla XXXI.</b>	Prueba DUNCAN de variables morfométricas finales de acuerdo con dis- tintas secciones de temperatura . . . . .	65
<b>Tabla XXXII.</b>	ANOVA de área foliar final para los factores de temperatura y SN . . . . .	65
<b>Tabla XXXIII.</b>	ANOVA de los índices de crecimiento para los factores de temperatura y SN	66
<b>Tabla XXXIV.</b>	Prueba DUNCAN de los índices de crecimiento de acuerdo con distintas SN	66

<b>Tabla XXXV.</b>	Prueba DUNCAN de los índices de crecimiento de acuerdo con distintas secciones de temperatura . . . . .	67
<b>Tabla XXXVI.</b>	ANOVA del contenido de humedad para los factores de temperatura y SN	68
<b>Tabla XXXVII.</b>	Prueba DUNCAN de los índices de contenido de humedad de acuerdo con distintas SN . . . . .	69
<b>Tabla XXXVIII.</b>	Prueba de DUNCAN de los índices de contenido de humedad de acuerdo con distintas secciones de temperatura . . . . .	69
<b>Tabla XXXIX.</b>	Componentes y costo del sistema aeropónico vertical . . . . .	71
<b>Tabla XL.</b>	Componentes y costo del módulo de irrigación . . . . .	73
<b>Tabla XLI.</b>	Componentes y costo del módulo de medición . . . . .	74
<b>Tabla XLII.</b>	Componentes y costo del módulo de medición de pH y C.E. . . . .	75
<b>Tabla XLIII.</b>	Costo de Soluciones Nutritivas . . . . .	76

**Abreviaturas**

C.E.	Conductividad Eléctrica
CHA	Contenido de Humedad Aéreo
CHR	Contenido de Humedad de la Raíz
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
HCL	Ácido Clorhídrico
KOH	Hidróxido de Potasio
LR	Longitud de Raíz
LT	Longitud de Tallo
O <sub>2</sub>	Oxígeno
PFA	Peso Fresco Aéreo
PFR	Peso Fresco de Raíz
pH	Potencial de Hidrógeno
PSA	Peso Seco Aéreo
PSR	Peso Seco Raíz
SN	Solución Nutritiva

## 1. INTRODUCCIÓN

La *Stevia rebaudiana* Bertoni (1887) es una planta tropical, perene y arbustiva originaria de Paraguay, con un especial interés comercial por ser un edulcorante natural hasta 300 veces más dulce que el azúcar de caña. Su importancia radica principalmente en tener un bajo contenido calórico, por lo que sus propiedades pueden ayudar a la regulación de los niveles de azúcar en la sangre e hipertensión (Gupta *et al.*, 2013), (Salvador-Reyes *et al.*, 2014). El 95 % de la producción mundial de estevia se desarrolla en Asia, siendo China el mayor productor; Japón representa el mayor consumidor de estevia que constituye el 40 % del mercado de los edulcorantes. En América la mayor producción está en manos de Paraguay. En México la producción de estevia comenzó en el 2010 con su introducción al país, pero fue hasta el 2012 que empezó a generar cifras significativas según datos del SIAP (CEDRSSA, 2018); sin embargo, debido a sus múltiples aplicaciones representa un cultivo rentable en el futuro próximo presentando condiciones prometedoras en el mercado nacional e internacional (Ramírez, 2011).

La creciente demanda de alimentos alrededor del mundo y los nuevos obstáculos que enfrenta la agricultura como la escasez de agua, el deterioro de los suelos agrícolas, la falta de espacio, ha incentivado el uso y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan aumentar la producción y cultivar en lugares desfavorables sin necesidad del uso de suelo. La aeroponía es una técnica de cultivo que utiliza el aire como medio para la distribución de nutrientes; consiste en la aspersión de nutrientes directamente a la raíz de las plantas. El cultivo se desarrolla suspendido en un medio aéreo nutritivo y sin sustrato. Los modelos aeropónicos representan ventajas en el uso de suelo, agua y nutrientes; se caracteriza por ser una opción a largo plazo, económica y rentable (Hernández y Piñeros, 2013). La aeroponía se describe como un cultivo sin suelo que representa una alternativa para los ambientes carentes de agua y de nutrientes como el caso de gran parte del noroeste mexicano. La principal ventaja de la aeroponía con respecto a otros cultivos es la excelente aireación de las raíces (Durán *et al.*, 2000) lo que facilita la absorción de los nutrientes (Caicedo y Jijón, 2016).

La automatización y monitoreo de un sistema aeropónico representa un componente casi obligatorio. La automatización se refiere a la mecanización de procesos de cualquier índole. Por su parte los sistemas aeropónicos requieren de atención continua y labores repetitivas, como el ajuste de pH de la Solución Nutritiva o las irrigaciones a lo largo del día. De este modo, en el presente trabajo no solo se realiza la construcción de un sistema aeropónico vertical, sino que también se

realiza el desarrollo de tecnología de bajo costo, creada con *hardware* y *software* libre. La creación de tecnología propia facilita el cumplimiento de la investigación y reduce los costos de la misma, pero es también una oportunidad para la mejora y replicación de sistemas aeropónicos en el futuro próximo.

El diseño de sistemas de cultivo y la adición de tecnología a los mismos es uno de los pilares de este trabajo. Con la posibilidad de ofrecer el punto de partida para contribuir a la creación de una tecnología que en un futuro pueda ser transferida. De manera general la tecnificación del sector agrícola representa una reducción en el esfuerzo y un aumento en la cantidad y calidad de las cosechas. Este trabajo busca desarrollar y estudiar un sistema de cultivo aeropónico de bajo costo, que permita reducir el uso del agua, insumos, suelo y espacio, pero sobre todo aumentar la producción y el conocimiento de la *Stevia rebaudiana*, siendo esta una planta de interés para la salud y rentable para el mercado mexicano.



## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. *Stevia rebaudiana* Bertoni (1887)

La *Stevia rebaudiana* es una especie de la clase Magnoliopsida, del orden Asterales y de la familia de las Asteráceas, es originaria del sudeste de Paraguay, de la parte selvática subtropical del Alto Paraná. (Martínez, 2015; Gutierrez y Bermejo, 2015). De las 261 especies aceptadas que forman parte del género (*Stevia rebaudiana*) la *Stevia rebaudiana* Bertoni es una de las dos especies productoras de glucósidos de esteviol (Gutierrez y Bermejo, 2015). El botánico Moisés Santiago Bertoni fue el primero en describirla detallando su sabor dulce en 1887. Posteriormente el químico paraguayo Ovidio Rebaudi, aisló en 1900 los dos principios activos posteriormente llamados esteviósidos y rebaudiósidos (Martínez, 2015).

La *S. rebaudiana* también llamada estevia es una planta perene, mide alrededor de 65 centímetros y puede alcanzar los 90 centímetros de altura en su estado natural; crece en regiones tropicales con precipitaciones durante todo el año que oscilan entre 1400 y 1800 milímetros, con temperatura media de 24 a 28 grados centígrados (°C) y humedad relativa de 75 % a 85 %; se desarrolla en suelos arenoso-arcilloso o arcilloso, con mediano contenido de materia orgánica, permeable, con una razonable capacidad de retención de agua, buen drenaje y con un potencial de hidrógeno (pH) de 5.5 a 7, con baja o nula salinidad; es una planta adaptada a días cortos con desarrollo óptimo de 12 a 13 horas de luz con gran variabilidad entre ecotipos (Gutierrez y Bermejo, 2015; Martínez, 2015; Ramírez *et al.*, 2011; Ramírez, 2011).

El mayor interés con la estevia es que en sus hojas existen varios compuestos que le confieren un sabor dulce algunos hasta 300 veces más que la sacarosa y con un bajo contenido calórico (Durán *et al.*, 2012). Los compuestos responsables son glucósidos de esteviol y se han identificado como esteviósido, esteviolbiósido, dulcósido y rebaudiósido A, B, C, D, E, y F; los más abundantes son esteviósido y rebaudiósido A (Goyal *et al.*, 2010) y su porcentaje de existencia varía en función de la especie, las condiciones de crecimiento y las técnicas agronómicas (Salvador-Reyes *et al.*, 2014).

Además de ser un gran edulcorante la estevia ha demostrado tener distintas propiedades entre las que destacan principalmente regulación y tratamiento para diabetes, niveles de azúcar e hipertensión (Salvador-Reyes *et al.*, 2014; Durán *et al.*, 2012; Goyal *et al.*, 2010; Gutierrez y Bermejo, 2015; Gupta *et al.*, 2013; Giuffré *et al.*, 2013), también se reporta beneficioso para prevención de caries, control de peso (Gutierrez y Bermejo, 2015; Salvador-Reyes *et al.*, 2014; Goyal *et al.*, 2010)

y digestión (Goyal *et al.*, 2010; Gupta *et al.*, 2013; Giuffré *et al.*, 2013), así como bactericida y antidepresivo (Gupta *et al.*, 2013; Giuffré *et al.*, 2013; Durán *et al.*, 2012), entre otros.

El 95 % de la producción mundial de estevia está en manos de China, Japón, Corea, Taiwán, Tailandia, Laos, Filipinas y Malasia; En Japón, la *Stevia rebaudiana* representa aproximadamente el 40 % del mercado de los edulcorantes, siendo éste el mayor consumidor y el país con mayor cantidad de fabricas procesadoras y extractoras de esteviósidos (Ramírez *et al.*, 2011). Por otro lado, en América la mayor producción está en manos de Paraguay, Brasil, Argentina, Colombia, Perú y Ecuador (Martínez, 2015).

En México, la producción de estevia ha sido de poco impacto; comenzó a producirse en 2010 y a registrar cifras significativas desde el 2012 de acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019); sin embargo, puede ser para los productores mexicanos, un cultivo innovador y rentable (debido a sus múltiples aplicaciones como sustituto de azúcar) presentando condiciones prometedoras en el mercado nacional e internacional (Ramírez *et al.*, 2011).

La estevia se comenzó a cultivar en Chiapas, Yucatán, Quintana Roo, Campeche y Veracruz, posteriormente se sembró en Nayarit, convirtiéndose en el mayor productor a nivel nacional; su producción en el 2017 fue de 324 toneladas, representando el 64.7 % de la producción total de ese año. (CEDRSSA, 2018). En México existen varias zonas de alto potencial para el cultivo de la *Stevia rebaudiana*, siendo Sinaloa actualmente la primera alternativa debido a su similitud con las zonas donde la estevia se da de forma natural (CEDRSSA, 2018).

La cosecha de estevia se realiza entre 2 y 3 veces al año dependiendo del año de cultivo, comúnmente las plantas más viejas suelen tener un mayor rendimiento. En el cultivo tradicional, la estevia produce alrededor de 80-110 mil plantas por hectárea (Madan *et al.*, 2010) y en ocasiones se sugiere hasta 160 mil plantas para mayor rendimiento (Kumar y Mishra, 2015). En su habitat natural en Paraguay, se reportan entre 1.5 y 2.5 toneladas por hectárea de hojas secas sin riego y alrededor de 4.3 toneladas por hectárea en cultivos con riego el primer año. En Italia hasta 3.6 toneladas por hectárea de hojas secas en promedio durante 6 años, mientras que en Japón hasta 3.5 toneladas por hectárea (Angelini *et al.*, 2018).

Se ha demostrado que la estevia tiene poca capacidad para competir con las malezas, las hierbas representan su principal competidor en tierra y limitante para el establecimiento en sus etapas iniciales y rendimiento general del cultivo (Ramesh *et al.*, 2006; Angelini *et al.*, 2018). Se estima que puede haber hasta una pérdida del 40 % de rendimiento como resultado de las malezas prin-

principalmente por especies de los géneros *Amaranthus* y *Chenopodium* (Angelini *et al.*, 2018). Las estrategias más utilizadas para el control de malezas son la aplicación de herbicidas y el control mecánico; sin embargo, es recomendable tener un manejo integrado de malezas que involucre toda clase de controles. Basuki y Sumaryono (1990) indica que una alta densidad de plantas y acolchado (plástico) negro en las camas de cultivo resultan muy beneficiosas para el control de malezas.

Kumar y Mishra (2015) y Angelini *et al.* (2018) mencionan que los insectos no representan problemas serios para la planta y que a menudo se reportan cualidades repelentes relacionadas con su sabor dulce. Se reportan algunos hongos como *Septoria steviae*, *Sclerotinia sclerotiorum* y del género *Alternaria* (Kumar y Mishra, 2015). En el proyecto DIVAS<sup>1</sup> tres hongos del género *Fusarium* fueron inoculados en plantas de estevia pero en ningún caso representaron gran importancia, el problema de hongos puede ser minimizado reduciendo el tiempo de humedad en la planta con suelos bien drenados y un buen control de la irrigación (Angelini *et al.*, 2018)

El cultivo de estevia en los principales países productores es de forma tradicional con camas de cultivo, acolchado y riego rodado o por goteo, hasta donde nuestro conocimiento llega, no existe información veraz sobre el rendimiento de la producción de estevia en cultivos sin suelo como la hidroponía o aeroponía. El uso de cultivos sin suelos pone fin a los problemas de malezas que pueden mermar la producción de estevia.

### 2.1.1. Nutrición de la *Stevia rebaudiana*

La estandarización u optimización de dosis de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), incluso en distintas condiciones climáticas, es fundamental para el aumento de biomasa y rendimiento de los cultivos. Brandle *et al.* (1998) menciona que la tasa de aplicación de macronutrientes para el cultivo de *Stevia rebaudiana*, varía según las condiciones de suelo y el entorno de producción, por lo que, deben ser optimizadas para cada situación específica.

La *Stevia rebaudiana* requiere de concentraciones bajas a moderadas de nutrientes, adaptándose en su mayoría a terrenos con baja calidad nutricional en su habitat originario en Paraguay (Angelini *et al.*, 2018). La deficiencia de nutrientes en la *Stevia rebaudiana* se observan de la siguiente manera: N coloración amarilla en las hojas, P coloración verde oscura en las hojas y K clorosis y moteado en las hojas. Por su parte, la deficiencia de los micronutrientes calcio (Ca), magnesio (Mg) y Azufre (S) se observan como: necrosis apical, clorosis invertida, y la aparición de hojas pequeñas color

---

<sup>1</sup>Diversification for Tobacco Growing Farms by the alternative crop *Stevia rebaudiana* Bertoni.

verde pálido respectivamente (Ramesh *et al.*, 2006).

Katayama *et al.* (1976) reportó que la biomasa seca de *Stevia rebaudiana*, estaba constituida de 1.4 % N, 0.3 % P, y 2.4 % K. Por su parte, Kawatani *et al.* (1977) observó que el N aumentó el crecimiento, grosor del tallo y número de ramas; posteriormente, determinó que el K tenía efectos similares (Kawatani *et al.*, 1980). En condiciones canadienses (hemisferio norte con temperaturas más bajas), Brandle *et al.* (1998) determinó que es posible obtener 7500 kg por hectárea de biomasa utilizando 105 kg de N, 23 kg de P y 180 kg de K. Utumi *et al.* (1999) describe la deficiencia de macronutrientes en relación con el crecimiento de la planta, la composición química y el contenido de glucósidos. Utumi *et al.* (1999) determinó que la concentración de esteviósidos decrece con respecto a la deficiencia de macronutrientes a excepción del P.

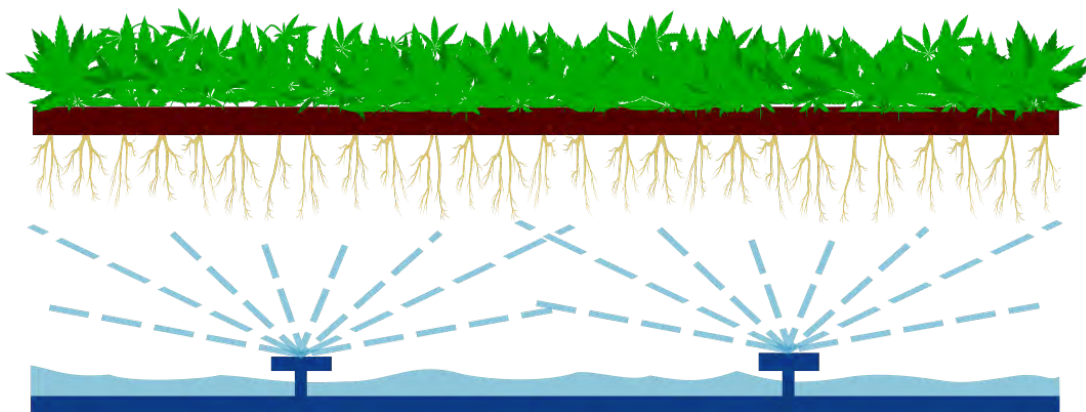
Con respecto a los micronutrientes la *Stevia rebaudiana* parece tener un escaso requerimiento, su preferencia por suelos ácidos asegura la disponibilidad de los mismos (Ramesh *et al.*, 2006). Diferentes estudios determinan que la nutrición está estrechamente relacionada con la acumulación de esteviósidos (Ramesh *et al.*, 2006). Experimentos utilizando Solución Nutritiva (SN) indicaron que el suministro de 5 ppm de boro (B) resultó en un alto contenido de esteviósidos y rebaudiósidos. Entre los micronutrientes, sólo una fuerte deficiencia de Ca causó una reducción en la concentración de glucósidos.

## 2.2. Aeroponía

La palabra aeroponía proviene del griego *Aero* (aire) y *Ponos* trabajo, y hace referencia al aire como un principio de funcionamiento. La aeroponía es una técnica alternativa de cultivo donde la planta se desarrolla en un medio aéreo, sin suelo, sin sustrato y sin estar sumergida en agua; consiste en la nebulización o aspersión directa y continua de nutrientes (contenidos en una solución acuosa) a las raíces de las plantas. En la Fig. 1 se muestra un cultivo aeropónico horizontal.

El primer planteamiento de los sistemas aeropónicos fue descrito por el científico Carter (1942) en su libro: “*method of growing plants in water vapor to facilitate examination of roots*” en donde define un cultivo suspendido e irrigado por vapor de agua como un método para facilitar el estudio de las raíces (Hernández y Piñeros, 2013).

La agricultura aeropónica se perfila como una tecnología limpia, ecológica, no contaminante, con alta productividad y eficiencia. En (Chuecos *et al.*, 2011) se menciona que, en su investigación



**Figura 1.** Representación general de un cultivo aeropónico horizontal donde las raíces están suspendidas en el aire y una Solución Nutritiva es asperjada a ellas.

y análisis, comprobaron que el modelo aeropónico presenta ventajas en el uso de suelo, de espacio, consumo de agua y nutrientes, confirmando dicha tecnología como una opción de largo plazo, económica, ecológica y rentable (Hernández y Piñeros, 2013; Gopinath *et al.*, 2017).

La aeroponía junto con la hidroponía pertenecen a los llamados “cultivos sin suelo”. Los sistemas aeropónicos podrían verse como la técnica de hidroponía más moderna, como una evolución de la misma (Chuecos *et al.*, 2011; Martínez-Peñaloza, 2013). La principal ventaja que aporta la aeroponía con respecto a la hidroponía es la excelente aireación de las raíces (Durán *et al.*, 2000), al no existir ninguna limitante para el desarrollo de las raíces, se promueve un mejor crecimiento radicular, facilitando la absorción de nutrientes (Caicedo y Jijón, 2016). Con base en Caicedo y Jijón (2016), Hernández y Piñeros (2013) y Durán *et al.* (2000) se mencionan a continuación las ventajas de la aeroponía con respecto a otras técnicas de cultivo.

- Las raíces en contacto con el aire presentan un excelente crecimiento. La aeroponía facilita las condiciones para lograr una combinación de luz, dióxido de carbono ( $CO_2$ ), luz, agua, y nutrientes.
- El aire abastece de oxígeno ( $O_2$ ), el cual es un buen purificador para las plantas y el entorno.
- El agua es utilizada en menor cantidad y en una forma más eficiente.
- El uso de energía es menor comparado con la hidroponía y puede usarse energía solar o eólica.
- La reducción del uso de agroquímicos ya que se tiene un mejor control fitosanitario con la aireación y al evitar los patógenos del suelo.

- Optimización del espacio, mayor calidad, cantidad y velocidad de maduración en la cosecha.
- Permite obtener cultivos más homogéneos.
- Reduce el esfuerzo de la mano de obra relacionado con la preparación del terreno para la siembra o plantación.
- Admite la posibilidad de mecanizar y robotizar la producción.

Sin embargo, en un sistema aeropónico no todo son ventajas. Con base en Caicedo y Jijón (2016) y Durán *et al.* (2000) se presentan sus inconvenientes.

- Alto costo inicial de la instalación del sistema.
- Costo añadido a consecuencia del mantenimiento y el consumo de energía.
- Un descuido en el balance nutricional puede afectar fuertemente la producción final hasta derivar en la pérdida de plantas.
- Un descuido mínimo en la higiene puede infectar fácilmente las raíces de bacterias y hongos.
- Producción de residuos sólidos, a veces, difíciles de reciclar.
- Contaminación de acuíferos cuando se realizan prácticas y vertidos imprudentes.
- No se puede prescindir de la energía eléctrica.

Al diseñar un sistema aeropónico existe un gran interés por obtener el mejor rendimiento de consumo de agua y distribución de los nutrientes. De acuerdo con Stoner y Clawson, (1997-1998), científicos de la NASA, en su ensayo “*A High Performance, Gravity Insensitive, Enclosed Aeroponic System for Food Production in Space*”, al momento de asperjar, una gota grande significa menos oxígeno disponible para las raíces; una gota muy fina, produce un exceso de pelo radical y pelusa que no permite el desarrollo de las raíces laterales, las cuales son la base de un sistema aeropónico. Así mismo, se describe la importancia del tamaño de gota para el óptimo desarrollo de las plantas, y que de ello depende en gran medida el resultado del cultivo (Hernández y Piñeros, 2013).

Se ha reportado en distintos estudios que los cultivos aeropónicos pueden ahorrar hasta el 95 % de agua que los cultivos convencionales, por ejemplo, para producir un kilogramo de tomate en un sistema convencional se requiere entre 200 y 400 litros de agua, en hidroponía 70 litros y en

aeroponía 20 litros (Gopinath *et al.*, 2017). Stoner y Clawson (1983) y posteriormente en NASA (2006) reafirman que la aeroponía tiene un rendimiento 45 % a 75 % mayor que la hidroponía y la geoponía, reduciendo el uso de insumos considerablemente, hasta un 98 % de agua, un 60 % de fertilizantes y un 100 % el uso de herbicidas y pesticidas (Lakhiar, 2018).

En la Tabla I, se presenta el consumo de agua, el consumo de fertilizante y la productividad de distintas técnicas de cultivo sin suelo comparados con un sistema de cultivo convencional, en donde destacan los sistemas aeropónicos muy por encima de las otras técnicas en el uso eficiente del agua (Alshrouf, 2017).

**Tabla I.** Tabla de cultivos sin suelo comparados con el cultivo tradicional.

Parámetros	Sistemas hidropónicos				Aeroponía	Acuaponía
	Sustrato inerte		Película nutritiva			
	Abierto	Cerrado	Abierto	Cerrado		
% Ahorro de agua en la irrigación	80	85	85	90	95	85 – 80
% Ahorro de fertilizante	55	80	68	85	85	85 – 90
% Aumento en la productividad	100	150	200	250	300	100 – 150
% Productividad del agua	1000	1600	2000	3500	8000	1000 – 1600

Asimismo, la aeroponía es una técnica que requiere mayor atención que los cultivos convencionales, ya que una falla en el sistema de irrigación puede desencadenar un resultado fatal en poco tiempo. Si bien la aeroponía ha demostrado ser una gran técnica de cultivo que podría solucionar los problemas de escasez de agua y suelo, también es verdad que se requiere mayor conocimiento y herramientas más especializadas para operar de manera correcta, por lo que suele ser necesario el uso de sensores y sistemas de monitoreo (Lakhiar, 2018), como en algunos invernaderos (Janarthanan *et al.*, 2017) que dan paso a sistemas automatizados y de precisión (Montoya *et al.*, 2017; Karu, 2017).

### 2.3. Agricultura de precisión y automatización

Debido a la alta demanda de alimentos en el mundo, la agricultura está desarrollando distintas tendencias que buscan aumentar el rendimiento de la producción, así como reducir el impacto negativo en el ambiente y la salud; esta búsqueda ha propiciado el desarrollo de distintos métodos de agricultura, como la agricultura intensiva, la orgánica, la ecológica y la de precisión (Ochoa Duarte *et al.*, 2018). La agricultura de precisión se puede resaltar como una revolución en la gestión de los recursos naturales (Fernandez-Quintanilla, 2002); está basada principalmente en el uso de tecnologías de la información, sensores remotos, sensores cercanos y minería de datos. Según el *National Research Council* de los EEUU la agricultura de precisión puede definirse como el conjunto de técnicas de cultivo que utiliza tecnología para regular el uso de agroquímicos, agua, semillas y recursos considerando el medio físico y el medio biológico (Fernandez-Quintanilla, 2002). La agricultura de precisión busca la reducción de costos de producción y una gestión agrícola más respetuosa con el medio.

La agricultura de precisión puede dividirse en cuatro fases cíclicas que en ella intervienen: recolección de datos, procesamiento e interpretación de la información, aplicación de insumos, evaluación y seguimientos (Leiva, 2003). Castillo (2016) menciona que los objetivos de la agricultura de precisión se pueden enumerar en:

- Optimizar el uso de los recursos disponibles.
- Reducir el impacto ambiental.
- Mejorar la calidad del ambiente de trabajo.

Existen distintas formas de interpretar la agricultura de precisión, sin duda alguna, la que más nos identifica es la planteada por Lowenberg-DeBoer (2003), (Ochoa Duarte *et al.*, 2018) quien la describe como el uso de sensores, computadoras y otros equipos electrónicos para automatizar el manejo de los cultivos. Este enfoque nos permite situarnos en el paradigma/avance de los cultivos sin suelo que cumplen con los objetivos de la agricultura de precisión planteados por Castillo (2016). De este modo nuestro sistema aeropónico estaría constituyendo una herramienta para en el desarrollo de agricultura de precisión.

Por otro lado, la automatización es la mecanización de procesos o trabajos repetitivos de cualquier índole, reduciendo la necesidad de una intervención humana y añadiendo precisión y segu-



ridad; la automatización es enriquecida con sistemas y modelos de control, los cuales realizan acciones y toman decisiones a partir de mediciones de interés. Actualmente la automatización se ha logrado posicionar en toda clase de industrias y áreas como la agricultura. Por ejemplo, en el trabajo de Janarthanan *et al.* (2017) se propone la creación de un sistema de automatización para invernaderos. En relación con la aeroponía cada vez existen más trabajos que desarrollan sistemas automatizados y de precisión, como Karu (2017) que desarrolla un modelo aeropónico de alta precisión formado por sensores de temperatura, humedad, potencial de Hidrógeno (pH) y Conductividad Eléctrica (C.E.), además de módulos de control, irrigación e iluminación, o Montoya *et al.* (2017) que hacen uso de sensores electrónicos de bajo costo y plataformas Arduino para diseñar un módulo de irrigación automático en un sistema aeropónico.

### 3. JUSTIFICACIÓN

#### 3.1. Importancia científica

La aeroponía es un cultivo sin suelo que tiene como principal ventaja el uso eficiente del agua y los agroquímicos, lo que lo convierte en un sistema de producción altamente conveniente para suelos con bajo contenido de nutrientes y alto déficit de agua como lo son las zonas áridas. Al desarrollar un sistema aeropónico propio surge la necesidad de entender su funcionamiento y generar conocimiento sobre el comportamiento de las variables físicas que actúan dentro del compartimento vertical de las raíces y cómo podemos controlarlo. Además la aeroponía es comúnmente utilizada para el cultivo de hortalizas de hoja como la lechuga, la acelga, y tubérculos como la papa; sin embargo, no se reportan estudios de cultivos de estevia en aeroponía, por lo que el principal aporte de esta investigación es generar conocimiento del cultivo de la *Stevia Rebaudiana* en un sistema aeropónico.

#### 3.2. Importancia económica

El dulzor contenido en las hojas de la estevia, representa el mayor interés de sus consumidores. Países como Japón y Corea han optado por el consumo de estevia como una medida preventiva a los problemas relacionados con el consumo de azúcar, por lo que la producción de estevia sigue aumentando en el mundo. Se estima que el mercado de la estevia aumentó de 336 mdd a 578 mdd del 2014 al 2017 y se pronostica que llegará a los 818 mdd para 2024, por lo que es un cultivo rentable para el futuro próximo. La utilidad de esta investigación radica en la propuesta de una técnica alternativa de cultivo de la *Stevia rebaudiana*.

#### 3.3. Importancia social

La *Stevia rebaudiana*, es una planta dulce que representa una alternativa al consumo de azúcar, ya que contiene en sus hojas glucósidos con bajo contenido calórico (rebaudiósidos y esteviósidos). Se ha comprobado que la estevia puede funcionar como un tratamiento para la diabetes mellitus 2 y para la hipertensión (Giuffré *et al.*, 2013). Por lo que, promover su cultivo es de gran importancia. Por otra parte, la agricultura siempre representa una fuente de empleo, en este caso, las nuevas técnicas de cultivo sugieren operadores más capacitados incentivando de esta forma la educación y el crecimiento profesional; lo que deriva finalmente en un mayor bienestar social.

## 4. HIPÓTESIS

### 4.1. Pregunta científica

¿Cuáles son los efectos de las variaciones de luz, temperatura y fertilización en un sistema aeropónico automatizado y de bajo costo, sobre el cultivo de *Stevia rebaudiana*?

### 4.2. Hipótesis

Sí la aeroponía es una técnica adecuada para la producción de plantas, debido a su bajo consumo de insumos y alta productividad, entonces al desarrollar un sistema aeropónico automatizado que permita el manejo de una adecuada nutrición, se podrá comprobar la factibilidad del cultivo de estevia aún con variaciones de luz y temperatura en el sistema.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1. Objetivo general

Diseñar y caracterizar un sistema aeropónico automatizado, adaptable y de bajo costo para evaluar la factibilidad del cultivo de *Stevia rebaudiana*.

### 5.2. Objetivos particulares

1. Diseñar y construir un sistema aeropónico vertical automatizado con módulos de irrigación y de medición de diversos parámetros fisicoquímicos como: pH, conductividad eléctrica, temperatura, humedad y cantidad de luz.
2. Caracterizar el funcionamiento del sistema aeropónico con base en la temperatura, humedad, luz, consumo energético y control de irrigaciones.
3. Evaluar el desempeño de un cultivo aeropónico de *Stevia rebaudiana* bajo distintos tratamientos de fertilización, variaciones de temperatura y luz a través de parámetros morfológicos como peso, tamaño y contenido de humedad.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se detallan las distintas metodologías empleadas para el cumplimiento de cada objetivo. Todo el trabajo descrito a continuación, se realizó en distintos talleres y laboratorios del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). El CIBNOR está localizado en la costa de El Comitán a 24°08' latitud norte y 110°24' longitud oeste, ubicada a 17 km al noroeste de la ciudad de La Paz en Baja California Sur, México.

En la primera parte se explica el diseño y la construcción de un sistema aeropónico vertical con capacidad de 24 plantas. Posteriormente se explica el diseño, construcción y programación de módulos electrónicos automatizados de monitoreo e irrigación, con los cuales se controló los ciclos de aspersión durante el cultivo, se midieron variables químicas para el control de la fertilización y variables físicas para la caracterización del sistema y ambiente.

En la segunda sección se explica el diseño y metodología de los diferentes experimentos diseñados para caracterizar el sistema, se describe el modelo utilizado para la medición del área de asperjado, además se explica la colocación de sensores para la medición de variables físicas dentro y fuera del sistema aeropónico en distintas épocas y situaciones realizadas para recabar la información que nos permitió caracterizar el sistema. Al final se describen las pruebas realizadas para determinar el consumo energético y la frecuencia de irrigación.

Finalmente, en la tercera parte se explica la metodología realizada para el cultivo *Stevia rebaudiana* en el sistema aeropónico, se explica el proceso de medición de potencial de Hidrógeno (pH) y Conductividad Eléctrica (C.E.) en la Solución Nutritiva (SN) y su ajuste durante los días de cultivo. Así mismo, se detalla la metodología de propagación y mantenimiento de plantas y la metodología utilizada para la medición de variables morfométricas como peso y talla de distintos órganos, así como el secado y el cálculo de índices y contenido de humedad.

### 6.1. Diseño y construcción del sistema aeropónico automatizado vertical

En la siguiente sección, se explica como se realizó la construcción de la estructura general del sistema, seguido del desarrollo de tecnología para el control automático de la irrigación y la medición de variables físicas y químicas. En el presente trabajo, el desarrollo de tecnología es una pieza fundamental que permitió dar solución a nuestras necesidades de manejo, funcionamiento y caracterización de un sistema aeropónico vertical y por consiguiente estudiar el cultivo de *Stevia*

*rebaudiana* en esta técnica de cultivo sin suelo.

#### 6.1.1. Diseño y construcción del sistema aeropónico vertical

Se realizó una revisión bibliográfica de distintos trabajos académicos y manuales de productos comerciales, entre los que se pueden destacar encontramos a Hernández y Piñeros (2013) que propone un sistema vertical como una solución al espacio y la empresa HydroCycle quien comercializa modelos verticales de hasta 44 plantas. Basándonos en estos trabajos se realizaron búsquedas de materiales en comercios locales para determinar la posibilidad del primer diseño; por lo que, con base en la existencia de los materiales y partes, se creó un modelo digital del sistema con el *software* de diseño SOLIDWORKS (SOLIDWORKS®, 2019), posteriormente se crearon los planos del modelo (Anexo A) y se enviaron al taller de maquinado del CIBNOR, donde se fabricó la estructura principal para cada sistema.

El primer sistema de irrigación se construyó con una batería de 12 voltios, una bomba automática y un reloj temporizador comercial, equipo con el que se logró realizar las primeras pruebas preliminares. Posteriormente se realizó la adaptación de una fuente de poder de computadora y se comenzó con el desarrollo de los sistemas de irrigación y módulos de medición de parámetros. Durante el desarrollo de estos sistemas electrónicos, se realizó de forma paralela el maquinado de dos estructuras adicionales para hacer un total de tres sistemas aeropónicos verticales para los fines de esta investigación.

#### Mantenimiento general y recomendaciones de uso

Como mantenimiento preventivo, se recomienda revisar el sistema en busca de fugas, ya que una vez iniciado el cultivo puede complicarse la reparación de las mismas debido a la encendido periódico de la irrigación. Las fugas desperdician la Solución Nutritiva (SN) y generan escurrimiento, lo que puede propiciar la formación de hongos, bacterias y algas. Adicionalmente representan un problema en la pérdida de presión del sistema, lo que se traduce en una menor eficiencia.

Comúnmente, los sistemas de irrigación en los sistemas aeropónicos presentar atascos, por lo que se recomienda verificar su correcto funcionamiento de forma regular. La obstrucción de un aspersor puede ser ocasionada por la acumulación de sales u otras partículas; una boquilla totalmente atascada equivale a una planta muerta en pocas horas, por lo que una revisión rápida debe realizarse diariamente.

Antes de comenzar con material vegetal, es importante verificar que la bomba funcione correctamente, es decir, que haga succión y descarga adecuadamente. Unido a esto, se debe cerciorar del correcto funcionamiento del temporizador (módulo de irrigación), así como que su configuración tenga los tiempos de aspersion deseados. Usualmente la SN beneficia el crecimiento de algas por lo que se recomienda evitar exponer la SN a los rayos del sol, evitar material transparente en manguera, depósitos, conductos, por lo que es necesario utilizar material opaco que no permita el paso de la luz. Finalmente, es recomendable tener un programa de prevención de plagas; aunque las técnicas de cultivo sin suelo suelen ser más limpias que las tradicionales, existe el riesgo de desarrollo de hongos debido a la gran humedad generada dentro del compartimento vertical de las raíces.

#### 6.1.2. Desarrollo de módulos de medición e irrigación automatizada

Para el desarrollo de todos los módulos electrónicos se siguió la misma secuencia de pasos. Primero se determinaron los componentes electrónicos de cada módulo con base en las necesidades del trabajo, se realizaron diagramas electrónicos para la toma de decisiones (como los que se muestran en la sección 7, resultados) y se adquirieron los materiales con base en el costo, modo de funcionamiento y compatibilidad.

Posteriormente, se comenzó una etapa de creación donde se ensamblaron y conectaron todos los componentes en el área de ingeniería del edificio O en las instalaciones del CIBNOR. Audoado a esto, se realizó el maquinado de las cajas de plástico que sirven de cobertura y soporte de cada módulo.

Después se comenzó una etapa de programación. La programación de los módulos se realizó en el IDE<sup>2</sup> de Arduino basado en el lenguaje de programación C. Para esto, se crearon diagramas de flujo y se procedió a la implementación. Los diagramas son utilizados para brindar una clara visualización de las acciones y estadios del sistema, desde otro punto de vista son la secuencia de pasos y decisiones que deben realizar los sistemas programables para que cumplan con la tarea deseada.

Finalmente, antes de poner en funcionamiento los sistemas electrónicos, fue necesario someterlos a algunos días de prueba en situaciones complejas o de tolerancia, en busca de posibles fallas o detalles que hayan pasado por alto.

La creación de tecnología propia favorece y atiende a nuestras necesidades, pero además reduce

---

<sup>2</sup>Del inglés, *Integrated Development Environment*. Entorno Integrado de Desarrollo, es un programa o aplicación que proporciona herramientas que facilitan la programación y desarrollo de *software*.

los costos de la investigación y posibilita ampliamente la escalabilidad del proyecto y su evolución, desde la actualización de *software* y reemplazo de *hardware* hasta la replicación íntegra de los sistemas mismos.

## 6.2. Caracterización del sistema aeropónico

La caracterización del sistema se realizó con una serie de experimentos de distinta naturaleza. Por una parte se comenzó con la evaluación del diseño y su desempeño, que dió como resultado el cálculo del área de aspersión. Posteriormente, se realizó una serie de mediciones de temperatura y humedad en el interior del compartimento vertical de las raíces, las cuales mostraron un gradiente de temperatura dentro del compartimento y una humedad dependiente de la temperatura general y no de la temperatura local. Finalmente se realizaron pruebas a distintas frecuencias de irrigación, con las cuales fue posible determinar el consumo eléctrico más eficiente en 24 horas.

### 6.2.1. Determinación del área de aspersión

Se realizó un experimento para determinar el área de aspersión generada por nuestro diseño, el cual consistió en realizar aspersiones de tinta a un papel cuadriculado generando impresiones del patrón formado por el aspersor. Para esto, se realizó el montaje de la mitad de tubo PVC de las mismas dimensiones que el compartimento vertical del sistema aeropónico; frente a él, se colocó un aspersor a la misma distancia del interior del compartimento como se observa en la Fig. 2. Los disparos de tinta se realizaron de forma instantánea y se controlaron por una válvula eléctrica activada con un botón, por su parte la bomba se mantuvo encendida, por lo que los disparos se realizaron a la presión máxima de la bomba (35 PSI). Las imágenes obtenidas de este ensayo se digitalizaron con un escáner. Posteriormente, se realizó un tratamiento de binarización de color (B/N) y se calculó el área de los patrones generados de cada imagen por medio del *software* MATLAB (MathWorks, 2019).

### 6.2.2. Mediciones de las variables físicas en el sistema aeropónico

Se realizaron mediciones de variables físicas como la temperatura, humedad e iluminancia con el módulo de monitoreo fabricado. Las mediciones se hicieron por periodos continuos de aproximadamente 24 - 72 horas entre los meses de agosto a noviembre del 2019 y parte de febrero del 2020. En la primera serie de mediciones, los sensores se dispusieron como se muestra en la Fig. 3, donde el

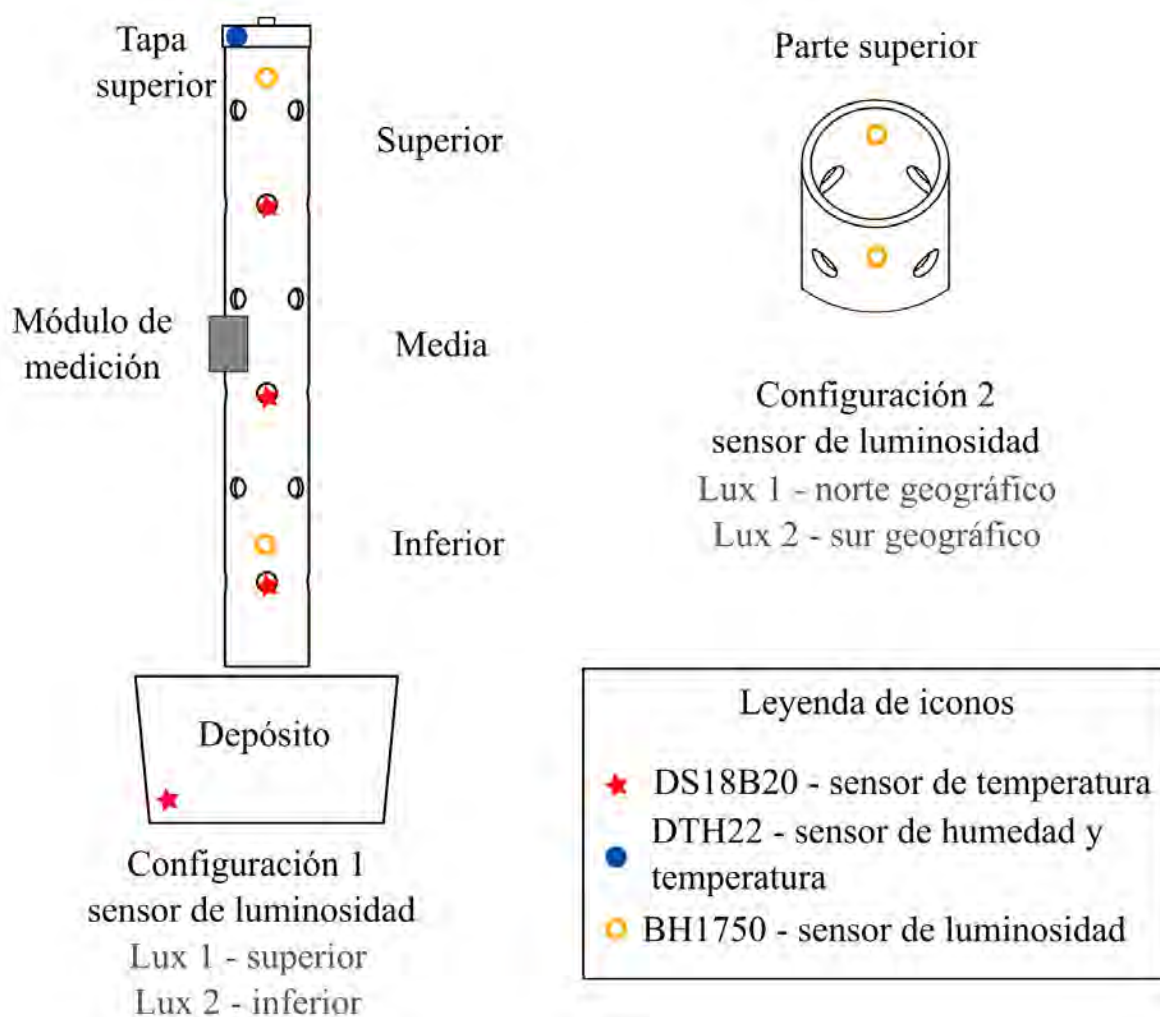




**Figura 2.** Perfil de PVC y montaje de aspersor para la realización de imágenes.

sensor de humedad relativa DTH22, se colocó en el interior del compartimento vertical, en la parte más alta para evitar problemas de funcionamiento y los sensores de temperatura se dispusieron tres en el interior del compartimento vertical de arriba a abajo y uno en el interior del depósito de agua. Por otra parte, los sensores de luz tuvieron dos configuraciones al exterior del compartimento vertical; una configuración determinada por la altura y otra determinada por la orientación con respecto al norte y sur geográfico como se observa en la Fig. 3. La humedad relativa se midió en porcentaje, la temperatura se midió en grados centígrados y la iluminancia en luxes. La iluminancia, se expresa como el flujo luminoso que llega a una superficie, su unidad de medida es el “lux” que equivale a 1 lumen/m<sup>2</sup>. Actualmente no existe una equivalencia entre la iluminancia y la irradiancia<sup>3</sup> la cual es medida en Watts/m<sup>2</sup> y se utiliza comúnmente en los sistemas meteorológicos para cuantificar la radiación solar.

<sup>3</sup>La irradiancia, es una unidad radiométrica basada en la potencia física de todas las longitudes de onda mientras que la iluminancia, es una unidad fotométrica que considera una medida de potencia distinta a cada longitud de onda del espectro visible; por ejemplo, en las unidades de iluminancia el infrarrojo y el ultravioleta tienen una potencia igual a 0 ya que no pertenecen al espectro visible.



**Figura 3.** Distribución de sensores y configuraciones para la primera etapa de mediciones físicas del sistema aeropónico. Del lado izquierdo aparece un modelo completo del sistema, del lado derecho aparece un modelo de la parte superior del compartimento vertical. Los puntos amarillos simbolizan los sensores de luz, los puntos rojos los sensores de temperatura y el punto azul, el sensor de humedad.

### 6.2.3. Medición de consumo eléctrico

Se adquirió un módulo de medición comercial modelo TS-836 de la marca Lygte (Fig. 4). Con este módulo se realizaron mediciones de consumo de corriente eléctrica (Amperes), voltaje (Volts), frecuencia (Hertz), potencia eléctrica máxima y mínima (Watts) y el consumo en el tiempo (kWatt/hora).

Durante los distintos ensayos y bioensayos se midió el consumo eléctrico de las bombas y el módulo de irrigación, registrando el tiempo inicial, el tiempo final y su medición en KWatt/hora. De este modo se hace un registro del consumo eléctrico de los prototipos desarrollados en este trabajo,



**Figura 4.** Módulo de medición de consumo de energía eléctrica.

con lo cual se calculó una aproximación del costo de operación del sistema. Las mediciones de consumo eléctrico permiten definir otros escenarios como el funcionamiento y costo a gran escala o el cambio a energías alternativas.

#### 6.2.4. Evaluación de la frecuencia de irrigación

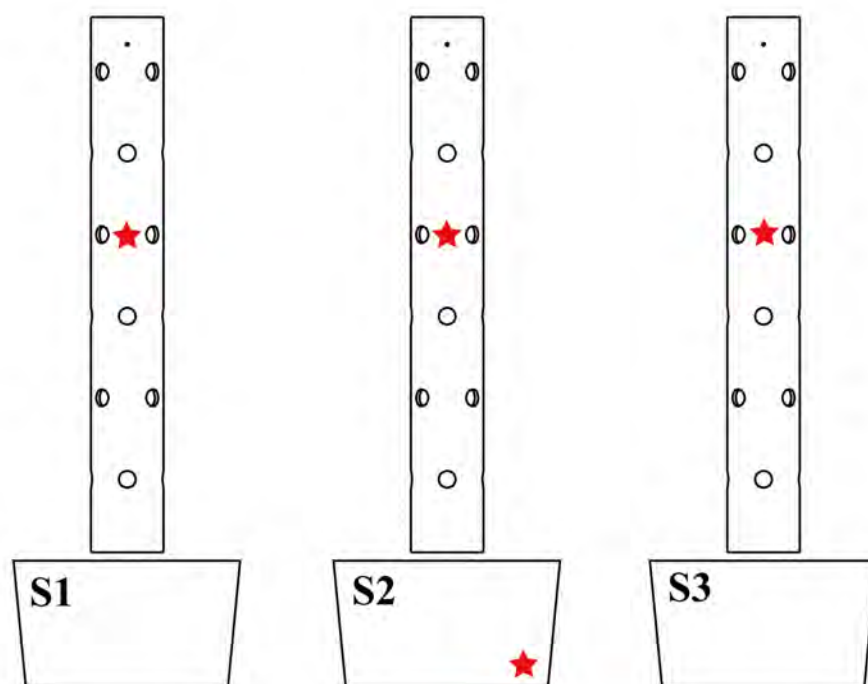
Se configuraron cuatro eventos con distintas frecuencias de irrigación y se realizaron dos repeticiones para cada uno. En la Tabla II se resumen las configuraciones de irrigación realizadas a largo de 24 horas continuas en distintas fechas. Las configuraciones de irrigación son equivalentes en el tiempo total de aspersión y por consiguiente en el gasto total de agua. El mayor interés en este ensayo era determinar el consumo de energía eléctrica de la bomba, pero también observar el comportamiento de la humedad y la temperatura en el interior del compartimento vertical. Por lo que, durante las pruebas de irrigación se conservaron los sensores en el interior del compartimento y se dispusieron igual que en la sección anterior (Fig. 3).

**Tabla II.** Tabla de frecuencias de irrigación evaluadas. Los periodos de irrigación duraron 24 horas continuas y cada configuración presenta el mismo tiempo de aspersión acumulado en un periodo de una hora.

Configuración	Periodo	Tiempo de aspersión	Repetición 1	Repetición 2
1	1 hora	6 min	25 - 26 oct.	13 - 14 nov.
2	30 min	3 min	26 - 27 oct.	12 - 13 nov.
3	10 min	1 min	28 - 29 oct.	9 - 10 nov.
4	5 min	30 seg	29 - 30 oct.	10 - 11 nov.

### 6.2.5. Medición de la temperatura en los sistemas aeropónicos

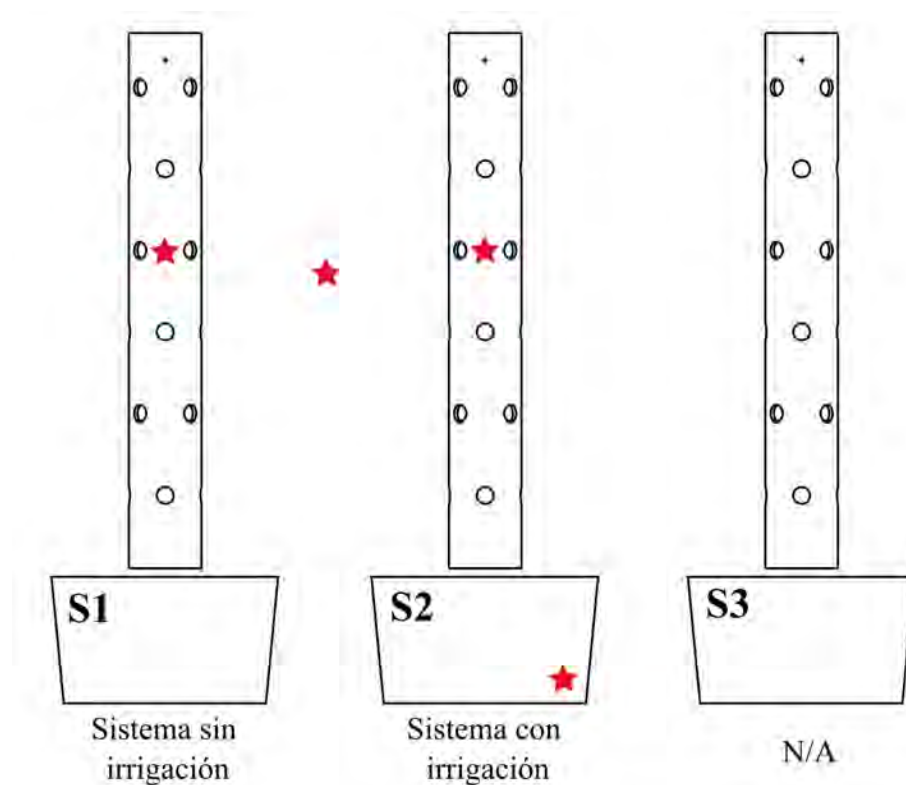
El siguiente ensayo duró 24 horas y fue diseñado para observar la temperatura de los tres sistemas aeropónicos distribuidos en el cuarto de cultivo; la disposición de los sensores fue distinta a las secciones anteriores y se muestra en la Fig. 5. Adicionalmente se integraron en los análisis, mediciones de la estación meteorológica como una referencia.



**Figura 5.** Diagrama de distribución de sensores de temperatura en los tres sistemas aeropónicos. Las estrellas representan los sensores de temperatura.

### 6.2.6. Medición de la temperatura en los sistemas aeropónicos con distintas configuraciones

Se diseñó otro ensayo con una duración de 24 horas para observar la variación de temperatura en tres puntos con situaciones particulares. En primer lugar, uno de los sensores se suspendió en la habitación entre dos sistemas aeropónicos y fuera de los mismos; un segundo sensor se introdujo en un sistema aeropónico sin irrigación; en contraste, otro sensor se colocó en un sistema aeropónico con irrigación y el sensor restante se colocó en el depósito de agua de este último. La disposición de los sensores se observa en la Fig. 6. Adicionalmente se integraron en los análisis, mediciones de la estación meteorológica como una referencia.



**Figura 6.** Diagrama de distribución de sensores de temperatura en dos sistemas aeropónicos y en la habitación. Las estrellas representan los sensores de temperatura.

### 6.2.7. Análisis estadístico

Se realizaron análisis de correlación lineal de Pearson entre variables, asumiendo la colinealidad de variables se calculó el coeficiente de determinación  $r^2$ . Además, se realizó análisis de varianza (ANOVA) para la determinación de diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones de sensores de la misma índole. Para los casos en donde se encontraron diferentes estadísticas, se aplicó una prueba de rangos múltiples de Duncan para identificar las diferencias por tratamientos. El nivel de significancia estadística se determinó como  $\alpha < 0.05$ . Los análisis estadísticos y gráficos correspondientes se realizaron en el programa R versión 3.6.3 (The R Fundation, 2019).

### 6.3. Cultivo aeropónico vertical de *Stevia rebaudiana*

El cultivo de *Stevia rebaudiana* se realizó bajo condiciones semi-controladas en un cuarto de cultivo de 6 m<sup>2</sup> (2m x 3m) con una altura de 3.5 m y climatizado a 24°C. Este cuarto tiene techo y paredes superiores de lámina de policarbonato celular de 6 mm de espesor marca PROCELL color

blanco<sup>4</sup>. La lámina, permite el paso de la luz y logra una distribución casi uniforme atenuando las sombras en su interior (Fig. 7). El cuarto de cultivo está dentro de un invernadero de policarbonato celular translúcido de 6 mm de espesor marca PROCELL y cimientos de concreto como se muestra en la Fig. 8. El cual, está anexo al Laboratorio de Biotecnología Vegetal del CIBNOR.



**Figura 7.** Interior del cuarto de cultivo.



**Figura 8.** Interior del invernadero.

### 6.3.1. Material biológico

La semilla de *Stevia rebaudiana* tiene un bajo porcentaje de germinación que oscila entre el 10 % y 38 %, por lo que la reproducción asexual es la mejor opción para cultivos comerciales (Martínez, 2015). La estevia utilizada en este trabajo, se adquirió con un agricultor localizado 25 km al norte de Ciudad Insurgentes en Baja California Sur, México. Se adquirieron alrededor de 20 plantas de la

<sup>4</sup>Transmisión de luz del 39 % y transmisión de calor de 16 %.



variedad *Morita* de las cuales se obtuvo plantas madre para esta investigación. Debido a la aparición de hongos en varias plantas del productor se comenzó con una reproducción por medio de micropropagación asexual mediante cultivo *in vitro* de tejidos vegetales. De este modo, se garantizó la sanidad del material biológico y se procedió con técnicas de esquejado.



**Figura 9.** Cultivo *in vitro* de estevia. Realizado con la parte apical de la planta y sobre medio de crecimiento M.S.

La multiplicación *in vitro* se realizó bajo una campana de flujo laminar y en condiciones estériles. Se utilizó la parte apical de las plantas madre y se colocó en un medio de cultivo MS<sup>5</sup> especificada en el Anexo B. El material vegetal se mantuvo en condiciones controladas de luz y temperatura dentro de cuartos de cultivo en el laboratorio de biotecnología vegetal del CIBNOR para su crecimiento (Fig. 9).

La siguiente multiplicación se obtuvo de la disección de nodos y secciones apicales de las primeras plántulas cultivadas *in vitro*. Este proceso se realizó varias veces de forma consecutiva hasta la obtención de material sano siempre disponible para los futuros bioensayos. Sin embargo, durante la reproducción *in vitro* hubo problemas de contaminación y se realizó una detección con medio TYS compuesto por Triptona, Extracto de Levadura y Sacarosa. Se detectó una contaminación de bacterias del tipo bacilo, por lo que se desechó las plantas contaminadas y se procedió nuevamente con otros ciclos de reproducción. Actualmente todavía existe una reserva en condiciones controladas provenientes de las plantas madre en el Laboratorio de Biotecnología Vegetal del CIBNOR.

Una vez garantizado material biológico libre de patógenos, se seleccionaron en distintas ocasio-

---

<sup>5</sup>Murashige T. and Skoog F. (1962).

nes plantas con buen aspecto y se continuó con un proceso de aclimatación en el cuarto de cultivo semi-controlado (mismo donde se realizó el cultivo aeropónico), utilizando un sustrato inerte esterilizado compuesto por dos partes de turba y una parte de vermiculita como se observa en la Fig. 10. Después de la aclimatación se realizó la propagación por esqueje apical. Los esquejes obtenidos se sembraron en charolas de germinación de plástico de 50 cavidades y se utilizó enraizador de la marca RAIZONE\*-PLUS y sustrato esterilizado con dos partes de turba y una de vermiculita como se muestra en la Fig. 11. El resultado de la propagación por esqueje fue el material biológico utilizado en los sistemas aeropónicos para la evaluación de esta investigación.



(a) Primer día de aclimatación de plántulas de estevia.



(b) Día 14 de aclimatación de plántulas de estevia.

**Figura 10.** Aclimatación de estevia en el cuarto de cultivo. Realizada después de ser extraída del medio *in vitro* y haberse plantado en sustrato inerte formado por turba y vermiculita.





**Figura 11.** Siembra de esquejes de estevia. Sembrados en charolas de 50 cavidades con sustrato inerte formado por una parte de vermiculita y dos partes de turba.

### 6.3.2. Soluciones Nutritivas para el cultivo aeropónico de *Stevia*

Se establecieron tres tratamientos con distintas Soluciones Nutritivas (SN) para la evaluación del crecimiento. En todos los tratamientos se utilizaron 20 litros agua destilada con una conductividad inicial de  $0.4 \mu\text{s}/\text{cm}$  y un pH de 6.8. El bioensayo se mantuvo por 35 días sin recambio o adición de agua. Como control del bioensayo, se utilizó SN Hoagland al 100 % siendo esta una de las más recomendables para cultivos sin suelo. Para la realización de las otras SN se realizó una búsqueda de fertilizantes en supermercados y tiendas de suministros agrícolas de la ciudad, en donde se adquirió finalmente fertilizante en polvo Triple 19<sup>6</sup> con micronutrientes y fertilizante líquido Fertiplus. Se eligieron ambos fertilizantes por presentar cantidades similares de macronutrientes, en las dosis empleadas, comparados con la SN Hoagland. En la Tabla III se presentan las dosis de fertilizante utilizadas para cada tratamiento y la concentración de elementos de cada una en partes por millón (ppm).

### 6.3.3. Medición de pH y C.E. en las Soluciones Nutritivas

Como se ha mencionado con anterioridad, cada tratamiento se realizó con 20 litros de agua destilada; durante 35 días que duró el experimento, no se añadió agua extra ni agroquímicos extras. Durante el bioensayo, sólo se añadieron tres gotas plata coloidal por litro como un tratamiento preventivo para evitar la formación de bacterias. Las mediciones de variables químicas de las SN se realizaron con el módulo de medición de C.E. y pH desarrollado, el cual fue calibrado previamente.

<sup>6</sup>Nitrógeno, fósforo y potasio en partes iguales a un 19%.

**Tabla III.** Comparación de nutrientes en las SN utilizadas. Los colores representan las concentraciones de cada elemento; los tonos claros representan las menores concentraciones y los tonos oscuros las mayores concentraciones.

Elemento	Fertilizante	Hoagland	Fertiplus	Triple 19
	Concentración Unidades	100% ppm	4ml / L ppm	1g / L ppm
Nitrógeno	N	210.00	291.20	285.00
Fósforo	P	31.00	328.40	285.00
Potasio	K	235.00	562.80	285.00
Calcio	Ca	200.00	7.60	N/A
Magnesio	Mg	48.00	3.44	165.00
Azufre	S	64.00	52.40	N/A
Hierro	Fe	2.50	0.24	0.60
Cobre	Cu	0.02	0.04	0.15
Zinc	Zn	0.05	0.08	0.30
Manganeso	Mn	0.05	3.00	0.30
Boro	B	0.50	0.08	0.15
Molibdeno	Mo	0.01	N/A	N/A

Para el ajuste de pH en las SN se añadieron mililitros de hidróxido de potasio (KOH) y ácido clorhídrico (HCL) en concentraciones uno molar según fuera necesario, procurando mantener los niveles por debajo de 7.5 y por encima de 6.0; no fue necesaria la regulación de la salinidad ya que esta no presentó un aumento considerable, de ser así se habrían aumentado litros de agua destilada para reducirla. Para cada tratamiento, se determinó el consumo de agua al final del cultivo, drenando las bombas y recolectando toda el agua contenida en el sistema al depósito inferior. La cantidad de agua se midió con probetas graduadas de distintas medidas.

#### 6.3.4. Lavado y desinfección de los sistemas aeropónicos

Antes de cada cultivo, se lavaron los tubos de PVC en la parte exterior con jabón biodegradable y fibra; posteriormente, se realizó una circulación de 24 horas de solución acuosa con 1 % de hipoclorito de sodio para la limpieza interna de los tubos y mangueras. Al final se enjuagó todo el sistema con una circulación de agua corriente durante 24 horas.

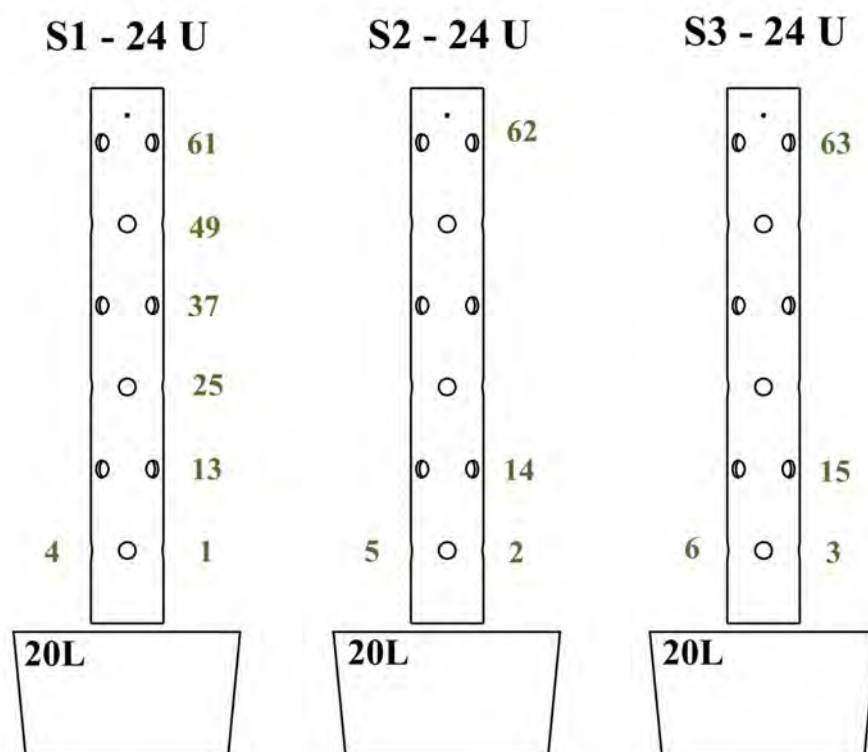
Los soportes y gomas de sujeción de plantas así como los filtros, se lavaron con fibra y jabón biodegradable y posteriormente se sumergieron y dejaron reposar por 48 horas en una solución

acuosa de hipoclorito de sodio al 1 %. Finalmente se escurren y enjuagan con agua corriente antes de su montaje.

### 6.3.5. Montaje del material biológico en los sistemas aeropónicos

En el bio-ensayo realizado para este trabajo, se seleccionaron un total de 72 plantas de las charolas de propagación; en cada tratamiento de SN se usaron 24 plántulas con características similares de peso y talla. Para el establecimiento de las plantas en el compartimento vertical, fue necesario utilizar esponjas como soporte, las esponjas fueron numeradas y pesadas previamente para mantener un control ya que en ocasiones la raíz de las plantas se adueña de la esponja y es imposible separarlas.

La numeración de dichas esponjas y el de las plántulas correspondió al número asignado para cada una de las locaciones del sistema vertical comenzando de abajo hacia arriba y en sentido contrario a las manecillas del reloj. Las plántulas se colocaron comenzando por las plantas más grandes en la parte inferior y continuando en orden descendiente hacia la parte superior. En la Fig. 12 se ilustra el montaje y numeración de las esponjas con respecto a los sistemas aeropónicos.

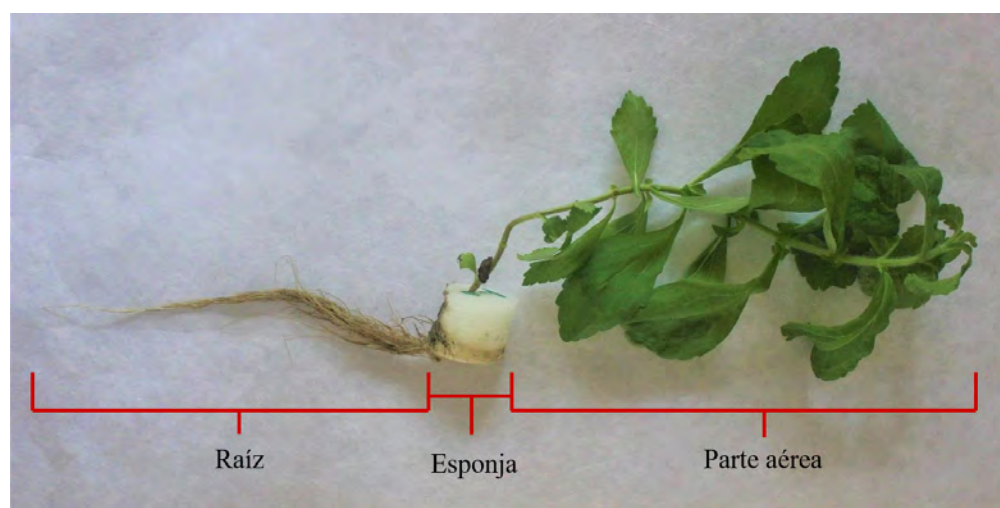


**Figura 12.** Orden y distribución de plántulas en los sistemas aeropónicos. Las plántulas más grandes se colocaron en la parte inferior de los sistemas y las menores en la parte superior.

### 6.3.6. Medición de variables morfométricas

Para evaluar el rendimiento del cultivo aerónico, se realizaron mediciones de variables morfométricas tales como la Longitud del Tallo y Raíz, el Área Foliar y el Peso Fresco y Seco de la parte Aérea y la Raíz. De este modo, fue posible evaluar el desempeño del sistema diseñado, pero en especial el desempeño del cultivo de *Stevia rebaudiana* en aeroponía vertical. Adicionalmente se calculó el costo de producción por medio del consumo eléctrico, el consumo de agua y de insumos.

Al momento del montaje se midió la Longitud de Raíz (LR) y la Longitud del Tallo (LT) de las 72 plantas con un calibrador vernier digital marca *Grainger* con una resolución de 0.01 mm, y se registró el peso fresco con una báscula marca *A&D* modelo GX-4000 con sensibilidad de 0.01 g, para determinar los valores iniciales del experimento. Las mediciones iniciales se realizaron en el cuarto de cultivo. Al finalizar el experimento 35 días después, se muestrearon las 72 plantas y se realizaron las mismas mediciones de talla y peso, pero en esta ocasión se utilizó una regla para la LR y un hilo como guía para medir la LT. Para el registro del peso, se dividieron las muestras en tres partes, la parte aérea, la raíz y la esponja como se muestra en la Fig. 13 y se realizaron mediciones de cada parte y del conjunto, con una balanza analítica de la marca *Precisa* modelo XT220A con una sensibilidad de 0.0001 g.



**Figura 13.** Diagrama de corte del material biológico para el análisis de morfometría.

Adicionalmente, se hicieron mediciones de Área Foliar (AF) y la masa drenada. Para determinar el AF se seleccionó la 5ta. hoja de 10 plantas con orden impar por tratamiento, se escanearon y se midieron de forma digital con el programa imageJ versión 1.52. Para la obtención de peso seco, se dividió el material vegetal en parte aérea y raíz, se colocaron en bolsas de papel y fueron secadas a

60 °C por 48 horas en un horno de la marca TERLAB TE-H80DM. Se determinó para cada planta el Peso Fresco de la Raíz (PFR) y el Peso Fresco Aéreo (PFA), el Peso Seco de la Raíz (PSR) y el Peso Seco Aéreo (PSA), AF, la LR y LT. A partir de estas mediciones se calcularon distintos índices de crecimiento y contenido de humedad.

#### 6.3.7. Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de normalidad, homocedasticidad e independencia de medias para determinar si los datos son paramétricos o no paramétricos. Se realizó análisis de varianza (ANOVA) para la determinación de diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tratamientos. En los casos donde se presentan diferencias estadísticamente significativas se aplicó un análisis de rango múltiples de Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos. El nivel de significancia estadística se determinó como  $\alpha < 0.05$ . Los análisis estadísticos y gráficos correspondientes se realizaron en el programa R versión 3.6.3 (The R Foundation, 2019).

## 7. RESULTADOS

En la siguiente sección se abordan los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo, en la primera parte se muestra el resultado de la elaboración de todos los elementos necesarios para la realización de este trabajo, entre los que se incluyen la fabricación del sistema aeropónico vertical y el desarrollo de los módulos electrónicos de medición e irrigación. En la segunda parte se muestra el resultado de las mediciones de variables físicas en distintas situaciones y su análisis posterior para determinar la influencia de dichas variables en el módulo aeropónico. Finalmente, en la tercera parte se expone el resultado de la morfometría de tres cultivos de *Stevia rebaudiana* sometidos a tres Soluciones Nutritivas distintas durante cinco semanas, en las que no se hizo recambio de agua y se ajustó el pH.

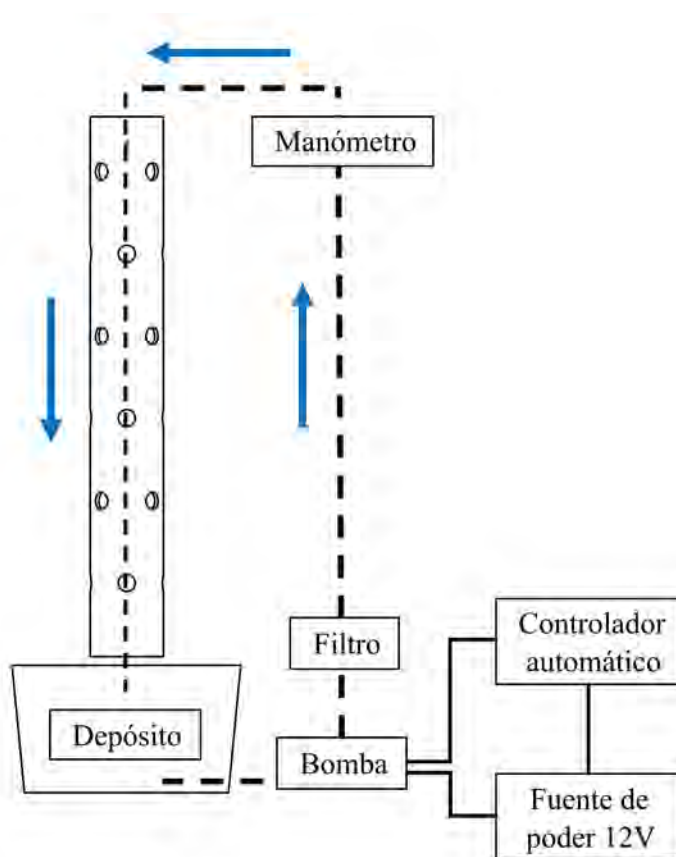
### 7.1. Diseño y construcción del sistema aeropónico automatizado

Se construyeron en total tres sistemas aeropónicos independientes, cada uno con su propia bomba, filtro, manómetro y depósito de agua. En la Fig. 14 muestra un diagrama general del sistema aeropónico individual.

#### 7.1.1. Fabricación del sistema aeropónico vertical

De forma general, la estructura y compartimento principal de cada sistema aeropónico se realizó con tubos PVC sanitario de diferentes calibres; para los accesorios como uniones, válvulas, acoples y codos de sujeción de plantas se utilizó PVC hidráulico y empaques de goma. Para la base se adquirió un depósito de plástico con capacidad de 100 litros; el resultado del prototipo se muestra en la Fig. 15.

Para la fabricación del sistema, se cortó tubo de PVC de 8 pulgadas de diámetro a 1.5 m de largo para formar el compartimento vertical, mismo donde se insertan las raíces de las plantas. Se le realizaron 24 perforaciones distribuidas en seis niveles; en cada nivel se realizaron cuatro perforaciones equidistantes a 90° de distancia. Los niveles se separaron 15 cm de forma vertical y a los niveles pares se les aplicó un giro de 45° para que existiera mayor espacio entre niveles de plantas y raíces (Fig. 15 y Anexo A). En cada perforación se insertó un codo de soporte precedido por una goma, en el interior de cada codo se coloca una esponja sin colorantes para brindar soporte a las plantas.



**Figura 14.** Diagrama general del sistema aeropónico vertical. Las líneas punteadas simbolizan tubería de PVC y las flechas la dirección del flujo del agua.

En el tubo principal se añadieron acoples y tapas a los extremos superior e inferior. En la parte inferior se añadió un drenaje que se conecta con el contenedor de líquidos donde se coloca la Solución Nutritiva, el cual se eligió de color opaco y con capacidad para 100 litros. En la parte superior se realizó una perforación por donde pasa hacia el interior el tubo de irrigación; se realizaron 24 perforaciones en el tubo de irrigación y se insertaron a presión aspersores EXL de la marca TAVLIT, con un caudal de 12 l/h y un tamaño de gota de 89 micrones operando a por lo menos a 2.5 bar (36 psi). Por la parte externa se añaden al tubo de irrigación dos terminales en forma de T para la colocación de un manómetro de aceite de 60 psi.

El sistema de irrigación se alimentó con una bomba automática de 35 psi de la marca SEAFLO modelo SFDP1-012-035-21 que funciona a 12 voltios. La entrada de la bomba (la succión) se conectó con una manguera opaca al depósito de la Solución Nutritiva; el otro extremo de la bomba (la descarga) se conectó con el mismo tipo de manguera al tubo de irrigación, pasando por un filtro modular AZUD de 100 micrones reportado como óptimo por el fabricante para el uso de los



**Figura 15.** Modelo general del prototipo de sistema aeropónico vertical.

aspersores. Posteriormente se instaló una válvula tipo *check* para mantener la columna de agua y evitar escurrimientos cuando la bomba está en reposo. Una tuerca unión roscada fue añadida para un desmonte más sencillo. Finalmente, el compartimento vertical junto con el tubo de irrigación y distribución se sujetaron de una estructura elevada para no sobrecargar el depósito de la Solución Nutritiva con el peso de la estructura del sistema, como se muestra en la Fig. 15. Uno de los propósitos de este trabajo, fue el poder construir un sistema aeropónico con materiales locales, comunes y de bajo costo.

#### 7.1.2. Módulo de medición de variables físicas

Se diseñó y ensambló un módulo de medición de temperatura, humedad y luminosidad con tarjetas electrónicas comerciales (Fig. 16). El diagrama general del módulo de medición se muestra en la Fig. 17.

El módulo de medición está conformado por una tarjeta electrónica Arduino UNO como microcontrolador central. Sus dispositivos de sensado son: cuatro sensores tipo sonda para medir temperatura en distintas ubicaciones, un sensor de humedad y temperatura fusionado, un sensor ultrasónico para calcular la cantidad de agua en el depósito y dos sensores de luminosidad. Sus dispositivos de





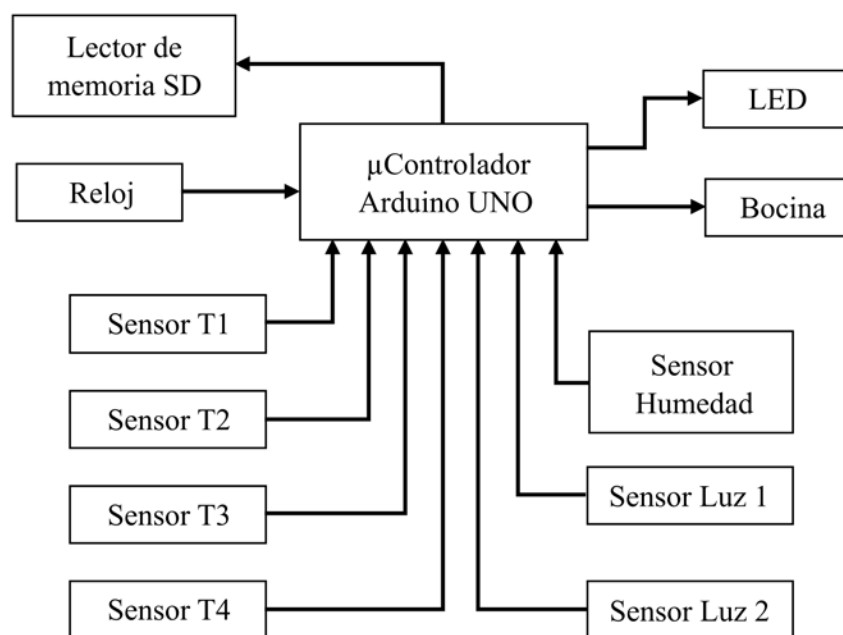
**Figura 16.** Módulo de medición de variables físicas.

salida son: un módulo de lectura y escritura de memorias mini SD, una bocina o *buzzer* y un LED. Además se incluye un reloj de tiempo real autónomo alimentado por una batería de 3.3 voltios.

El módulo de medición se programó con el IDE de Arduino para realizar una toma de muestra de todos los sensores cada minuto. Cada muestra se guarda en un archivo *.CSV* dentro de una memoria microSD para su posterior análisis. La precisión de cada sensor y las características del reloj y otros elementos se muestran en la Tabla IV.

**Tabla IV.** Tabla de especificaciones de los componentes electrónicos utilizados en el módulo de medición.

<b>Componente</b>	<b>Modelo</b>	<b>Precisión</b>	<b>Resolución</b>
Sonda de temperatura	DS18B20	$\pm 0.5$ °C	0.125 °C
Sensor de temperatura	DHT22	$< \pm 0.5$ °C	0.1°C
Sensor de humedad	DHT22	$\pm 2$ %	0.10%
Sensor ultrasónico	SRF04	ángulo 15°	3 mm
Sensor de luminosidad	BH1750	65536 lux	1 lux
Reloj	DS3231		1 segundo
Memoria microSD	Sandisk		16 Gb



**Figura 17.** Diagrama a bloques del módulo de medición de variables físicas. Cada bloque representa un elemento electrónico y la dirección de las flechas que los unen representan la dirección de la información.

### 7.1.3. Módulo de medición de pH y C.E.

Se desarrolló un módulo de medición de pH y C.E. con componentes electrónicos comerciales el resultado se observa en la Fig. 18. A diferencia del módulo de variables físicas, el módulo de pH y C.E. tiene un teclado y una pantalla LCD<sup>7</sup> que permite una interacción inmediata y amigable para el usuario, en donde es posible consultar la medición o calibrar el dispositivo. El módulo de medición de variables químicas, se construyó con un microcontrolador Arduino MEGA y se programó con el IDE de Arduino al igual que el resto de los módulos.

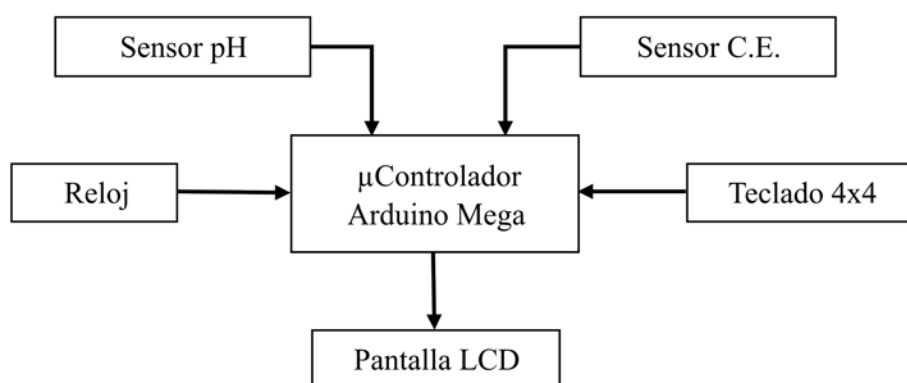
La mayor ventaja de este módulo es la adición de una batería USB que la convierte en portátil, lo que facilita de manera sustancial las mediciones de pH y C.E. en volúmenes de agua que resultan difíciles de mover. Tomar mediciones *in situ* es beneficioso ya que permite prescindir de un laboratorio y tomar mediciones mientras se realizan ajustes en la SN. El diagrama general del módulo de medición de variables químicas se muestra en la Fig. 19. En la Tabla V se muestra las especificaciones de los sensores.

La calibración del sensor de pH se realizó con soluciones de calibración (*buffer*) de pH 4.01 y 6.86 a 25°C, y se comparó con el equipo pH Meter de la marca JENWAY modelo 3320. La

<sup>7</sup>Del inglés, *Liquid-Crystal Display*. Pantalla de cristal líquido.



**Figura 18.** Módulo de medición de variables químicas. Las sondas, son los sensores de pH y C.E. Se logra apreciar el LCD informativo en color azul y el teclado.



**Figura 19.** Diagrama del módulo de medición de variables químicas. Cada bloque representa un elemento electrónico y la dirección de las flechas que los unen representan la dirección de la información.

calibración del sensor de C.E. se realizó con una solución *buffer* a  $1413 \mu\text{s}/\text{cm}$  a  $25^\circ\text{C}$  y se comparó con un equipo portátil de la marca OAKTON Instruments modelo ECTester11. Los sensores de pH y C.E. utilizados, son sensores analógicos lineales, es decir, traducen lecturas de voltaje en la unidad de medida deseada por medio de un convertidor analógico digital, de modo de que la resolución depende del número de bits utilizados para dicha conversión.

**Tabla V.** Tabla de especificaciones de los sensores de pH y C.E.

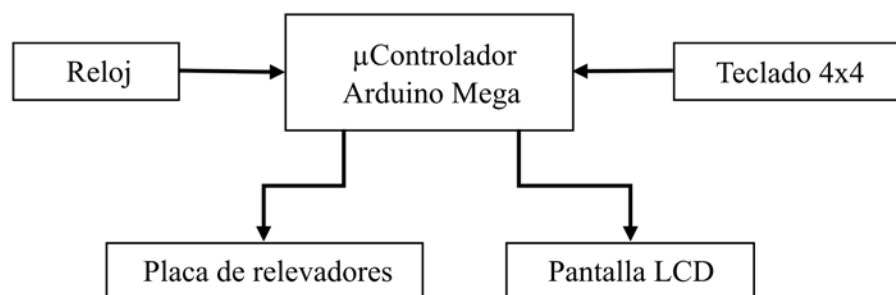
Componente	Modelo	Precisión	Resolución	Rango
Sensor de pH	Ipower	$\pm 0.2\text{v}$	8 bits	pH 0-14
Sensor de C.E.	DFRobot	$\pm 5\%$	8 bits	1-20 ms/cm

#### 7.1.4. Módulo de control de irrigación

Se desarrolló un módulo electrónico de irrigación programable utilizando tarjetas electrónicas comerciales (Fig. 20). Este módulo al igual que el módulo de variables químicas, también tiene un teclado y una pantalla LCD que permite configurar las irrigaciones de una forma inmediata y amigable para el usuario. También se utilizó un microcontrolador Arduino MEGA y se programó con el IDE de Arduino. El diagrama general del módulo de medición de irrigación programable se muestra en la Fig. 21.



**Figura 20.** Módulo de control de irrigación. Se logra apreciar el LCD informativo en color azul y el teclado de configuración en una matriz negra con colores secundarios.



**Figura 21.** Diagrama a bloques del módulo de control de irrigación. Cada bloque representa un elemento electrónico y la dirección de las flechas que los unen representan la dirección de la información.

Su mayor ventaja con respecto a otros temporizadores, es que tiene un amplio espectro de configuración, donde se pueden programar irrigaciones de 1 segundo hasta 4 horas y descansos de 5 segundos hasta 24 horas en periodos repetitivos. Este módulo está diseñado para trabajar con una fuente de poder de PC, con la cual, al encender dos bombas al mismo tiempo, existe riesgo de sobrecalentamiento debido a la demanda de corriente. De este modo el sistema está configurado para realizar un encendido escalonado de hasta cuatro bombas donde el tiempo de irrigación debe ser cuatro veces menor al tiempo de descanso. Sin embargo, el *hardware* utilizado permite la conexión de 4 fuentes de poder de PC, por lo que es posible actualizar el sistema.

## 7.2. Caracterización del sistema

La primera parte de la caracterización del sistema se realizó al medir el área de aspersión originada por el diseño previamente construido. Por su parte el resultado de la medición de sensores se puede dividir en tres bloques, el primero que incluye la humedad en relación con la temperatura en el interior del compartimento vertical, el segundo la cantidad de luz recibida desde distintos puntos en el exterior, y el tercero la temperatura distribuida en distintos puntos en el interior del sistema así como en el interior de la habitación. Para este estudio, se realizaron mediciones en distintas épocas con duraciones variadas que van como mínimo de 24 horas hasta las 72 horas. Para fines de este escrito y a manera de resumen, sólo se profundiza y describe en las mediciones más representativas, que permiten mostrar el comportamiento de las variables en diferentes puntos.

### 7.2.1. Área de aspersión

Se obtuvieron 10 imágenes impresas con pintura vegetal en hojas cuadrículadas de 7 mm; de las 10 imágenes se seleccionaron las tres que presentaron menor escurrimiento y menor rugosidad para ser digitalizadas (Fig. 22a). El resultado del tratamiento de las imágenes se presenta en la Fig. 22b. En la Tabla VI se presentan las mediciones de área obtenidas por el análisis de imágenes realizado en el *software* MATLAB (MathWorks, 2019).

Dado que los patrones obtenidos se asemejan a un círculo, se realizó una estimación de su diámetro con el promedio de las mediciones utilizando la ecuación 1 (área de un círculo) y se concluyó que el diámetro de la aspersión se encuentra alrededor de 13.5 cm. Este resultado indica que la distancia entre nuestro aspersor y la pared interna del compartimento vertical de las raíces, así como el modelo del aspersor y la presión de la bomba, producen un cono de aspersión suficiente para poder cubrir el soporte completo de la raíz que mide alrededor de 2 1/2 pulgadas o su equivalente en sistema métrico 6.35 cm.

**Tabla VI.** Tabla de resultados del área de aspersión.

<b>Aspersión</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>
A1	149.08
A2	153.28
A3	143.36
<b>Promedio</b>	148.57
<b>Desv. Estándar</b>	± 4.9

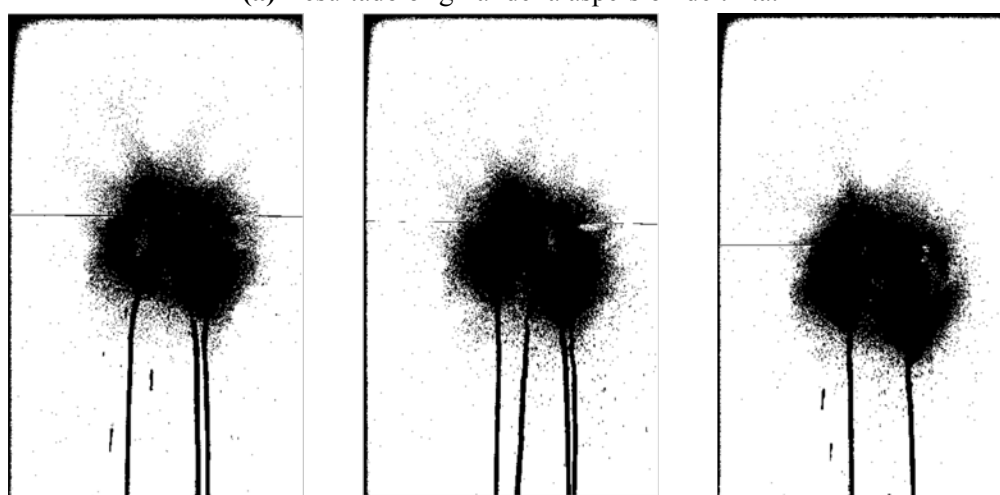
$$d = 2 \left( \sqrt{\frac{A}{\pi}} \right) \quad (1)$$

### 7.2.2. Medición de humedad y temperatura en el sistema

En la Fig. 23 se muestra una gráfica con mediciones crudas de la humedad y temperatura provenientes del mismo sensor (DTH22), realizadas del 24 al 27 de agosto del 2019 en ausencia de irrigación, en donde se destaca la existencia de valles y crestas periódicas en ambas variables. En el caso de la temperatura, los valles se ven asociados con el periodo nocturno, mientras que en la



(a) Resultado original de la aspersión de tinta.

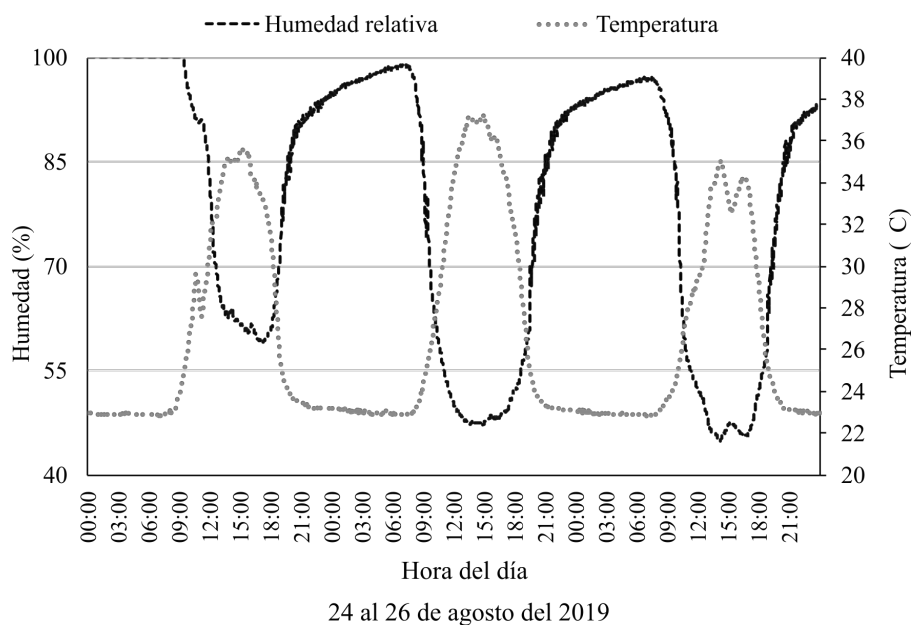


(b) Resultado del procesamiento digital de imágenes.

**Figura 22.** Resultado de las imágenes para el cálculo del área de aspersión. Las imágenes en rojo (superior) son las imágenes originales obtenidas de asperjar tinta en una hoja. Las imágenes en negro (inferior) son el resultado del tratamiento de binarización de las imágenes originales del patrón de aspersión.

humedad los valles se ven relacionados con el periodo diurno. Se observa que mientras la temperatura aumenta a lo largo del día la humedad disminuye, mientras que en el caso contrario, cuando la temperatura disminuye por la noche la humedad aumenta. El coeficiente de correlación de Pearson revela que existe una correlación negativa alta ( $r = -0.895$ ) entre dichas variables.

Aunque fue posible realizar mediciones de humedad mientras se realizaban irrigaciones en el interior del compartimento vertical, el funcionamiento del sensor se vio afectado en épocas de menor temperatura ambiental ya que al ser un sistema cerrado se producía una saturación de humedad, que culminó en la falla total del sensor. Posteriormente se sustituyó el sensor por uno nuevo pero el resultado fue el mismo, por lo que se dejó de utilizar en posteriores mediciones. Lo mismo su-



**Figura 23.** Gráfica de la humedad y temperatura dentro del compartimento vertical del sistema aeropónico. La línea punteada más oscura representa la humedad relativa y es correspondida con el eje vertical del lado izquierdo, mientras que la temperatura es representada por la línea punteada más clara y es correspondida con el eje vertical del lado derecho. Las mediciones fueron realizadas en agosto carentes de irrigación.

cedió con el sensor ultrasónico de nivel de agua, la evaporación y condensación del agua dentro del depósito deterioró el sensor y perjudicó sus mediciones, por lo que se dejó de utilizar en este trabajo.

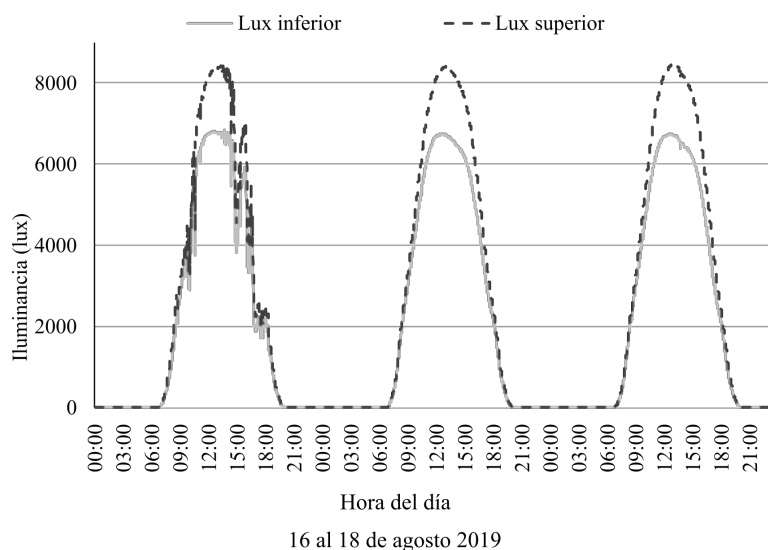
### 7.2.3. Medición de la iluminancia

En las Figuras 24a y 24b se observan las mediciones crudas de los dos sensores de luminosidad en distintas situaciones. Ambas mediciones fueron tomadas en septiembre del 2019; en ambas mediciones, se observa la existencia de ciclos definidos por crestas y valles, esto sucede en todas las mediciones de iluminancia realizadas. Por su parte, los valles representan la ausencia total de luz y determinan el inicio, término y duración del periodo nocturno. Por el contrario, las crestas representan el periodo diurno y los diferentes comportamientos se pueden categorizar como cielos nublados o cielos despejados, en donde los cielos despejados presentan una menor variación.

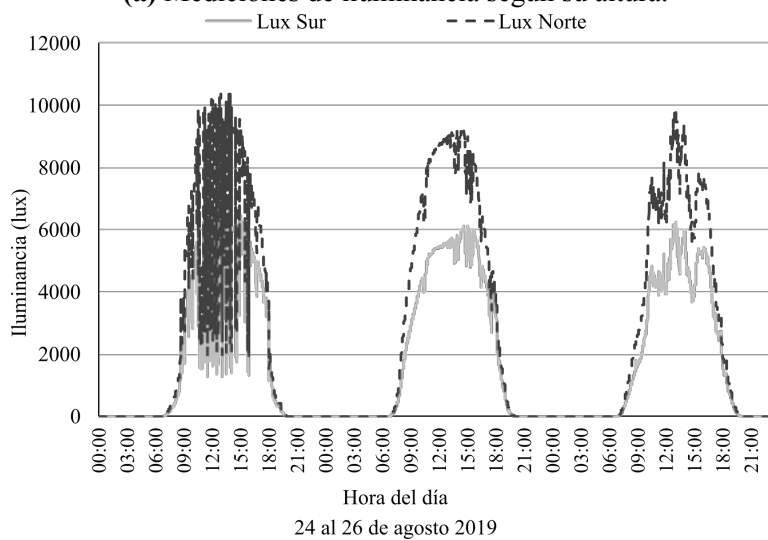
En la Fig. 24b se observa que el sensor orientado al norte mide mayor luminosidad que el orientado al sur, esto sugiere que es posible determinar la época del año a través de la relación entre ambos sensores cuando se encuentran en esta configuración.

Por otro lado, en la Fig. 24a se observa que el sensor superior recibe mayor cantidad de luz





**(a)** Mediciones de iluminancia según su altura.



**(b)** Mediciones de iluminancia según la orientación.

**Figura 24.** Gráficas de las mediciones de iluminancia en el exterior del compartimento vertical del sistema aeropónico. En la imagen superior, la línea clara representa el sensor colocado en la parte superior y la línea oscura representa al sensor colocado en la parte inferior y en la imagen inferior, la línea oscura representa al sensor orientado al norte y la línea clara representa el sensor orientado al sur.

que el sensor inferior; este comportamiento se repite en todas las mediciones de iluminancia donde se utilizó esta configuración (Fig. 3). En la Tabla VII se observan diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones de iluminancia en las distintas configuraciones de los sensores. Para la configuración basada en la altura, la mayor iluminancia se obtuvo para el sensor superior. En la configuración basada en la orientación, la mayor iluminancia se midió en el lado norte (Tabla IX). De esta manera se concluyó que la parte superior del módulo recibe una mayor iluminancia en

comparación con la parte inferior y que debido a la época del año en la que se toman las medidas, la mayor iluminancia se observa en el lado norte del sistema aeropónico<sup>8</sup>.

**Tabla VII.** Resultado del análisis de varianza de la iluminancia al exterior del sistema aeropónico. Medidas a distintas alturas y orientaciones.

	Iluminancia (lux) Altura		Iluminancia (lux) Orientación	
	C.M.	p	C.M.	p
Luz (L)	137268787	$7.5e^{-5}$ ***	539476544	$2.2e^{-16}$ ***
Error	8723063		7482460	

C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \*\*\* =  $p < 0.001$ .

**Tabla VIII.** Promedio de la iluminancia en el exterior del sistema aeropónico. Medidas a distintas alturas y orientaciones.

Sección de luz	Iluminancia (lux) Altura	Orientación de luz	Iluminancia (lux) Orientación
Superior	$2622 \pm 3229^a$	Norte	$2573 \pm 3235^a$
Inferior	$2158 \pm 2650^b$	Sur	$1707 \pm 2121^b$

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas entre los promedios (Duncan  $p < 0.05$ ).

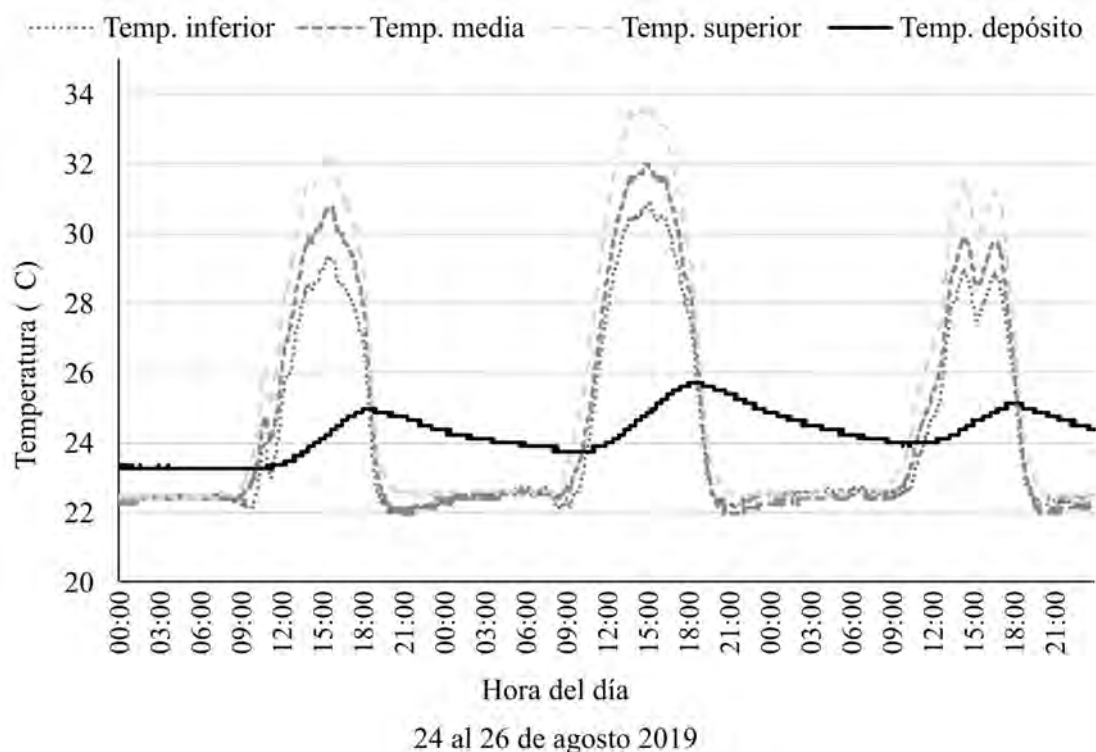
#### 7.2.4. Temperatura dentro del sistema

En la Fig. 25 se presentan las mediciones crudas de los 4 sensores de temperatura dispuestos de arriba hacia abajo (Fig. 3), en donde resalta una fuerte similitud entre los tres sensores dispuestos dentro del compartimento vertical de las raíces. Las mediciones de los sensores dibujan crestas y valles similares a las mediciones de los sensores anteriores, donde una vez más las crestas se relacionan con los periodos diurnos y los valles con periodos nocturnos. A su vez, observamos que el comportamiento del sensor de temperatura dispuesto en el depósito del agua presenta un comportamiento estable y retrasado con respecto a los otros sensores.

El gráfico de la Fig. 25 fue realizado con mediciones continuas tomadas del 24 al 26 de agosto con una duración de 48 horas en las que no existió ninguna irrigación. Las mediciones realizadas

<sup>8</sup>Verano en el hemisferio norte.

revelan un gradiente de temperatura, donde la mayor temperatura se concentra en la parte superior del compartimento y la menor temperatura en la parte inferior. La diferencia entre las temperaturas medidas se incrementa en correspondencia con el aumento de la temperatura general, es decir, entre mayor es la temperatura medida mayor es la diferencia entre las temperaturas.



**Figura 25.** Gráficas de la temperatura dentro del compartimento vertical del sistema aeropónico. La línea más oscura corresponde a la temperatura del agua.

En la Tabla IX se muestra el resultado de pruebas de análisis de varianza ANOVA realizadas en distintas épocas del año. Se encontró que tanto en verano como en invierno, existen diferencias significativas en la temperatura de los diferentes niveles de altura. El mayor promedio en el verano, se observó en la parte alta del compartimento. Mientras que, el mayor promedio en el invierno se observó en la temperatura del agua. En ambas fechas, el menor promedio se midió en la parte más baja (Tabla X).

#### 7.2.5. Efecto de la irrigación en el consumo eléctrico

En la Tabla XI se muestra el resultado del consumo eléctrico de las distintas frecuencias de irrigación experimentadas. El resultado demostró que un encendido más frecuente de las bombas no significa un mayor gasto de energía eléctrica como se esperaba. El sistema de alimentación eléctrica

**Tabla IX.** Resultado del análisis de varianza de la temperatura al interior del compartimento vertical del sistema aeropónico con respecto a la altura, medidas en distintas épocas del año.

	Temperatura (°C) 26 de agosto		Temperatura (° C) 24 de noviembre	
	C.M.	p	C.M.	p
Temperatura (T)	194	2.2e <sup>-16</sup> ***	68	2.2e <sup>-16</sup> ***
Error	5.6		1.4	

C.M. = Diferencias significativas y confiabilidad, \*\*\* =  $p < 0.001$ .

**Tabla X.** Promedio de las temperaturas medidas de acuerdo con distintas alturas en el interior del compartimento vertical del sistema aeropónico, medidas en distintas épocas del año.

Sección de temperatura	Temperatura (°C) 26 de agosto	Temperatura (°C) 24 de noviembre
Alto	24.8 ± 3.2 <sup>a</sup>	22.8 ± 1.7 <sup>b</sup>
Medio	24.1 ± 2.7 <sup>c</sup>	22.7 ± 1.4 <sup>c</sup>
Baja	24.2 ± 2.2 <sup>d</sup>	22.5 ± 1 <sup>d</sup>
Depósito	24.5 ± 0.3 <sup>b</sup>	23.05 ± 0.3 <sup>a</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas entre los promedios (Duncan  $p < 0.05$ ).

se realizó con una fuente de poder de PC, la cual juega un papel importante como supresor de picos, estabilizando la corriente y el consumo, sin importar la frecuencia de encendido; sin embargo, el tiempo de vida de una fuente de poder puede verse reducido cuando la frecuencia de encendido es mayor.

**Tabla XI.** Tabla de resultados del consumo eléctrico medido a distintas frecuencias de irrigación. Las mediciones fueron realizadas en el 2019.

Configuración	Periodo completo	Tiempo de aspersion	Consumo (kW/h)	
			25-30 oct.	9-14 nov.
1	1 hora	6 min	0.373	0.381
2	30 min	3 min	0.378	0.380
3	10 min	1 min	0.375	0.371
4	5 min	30 seg	0.370	0.366
		Promedio	0.374	0.375

### 7.2.6. Efecto de la irrigación en la temperatura dentro del sistema

En las gráficas de la Fig. 26 se observan mediciones de temperatura realizadas bajo las frecuencias de la Tabla XI con la distribución de sensores que se muestra en la Fig. 3. En primer lugar y contrastando con las mediciones realizadas sin irrigación (Fig. 25.), se puede observar claramente la aparición de crestas y valles consecutivos con una mayor frecuencia que las generadas por los periodos diurnos y nocturnos. Las nuevas crestas y valles simulan una especie de cremallera o sierra, que aumenta o disminuye la cantidad de dientes según el número de veces que se enciende la bomba (frecuencia), mientras que el distanciamiento de estos dientes está determinado por el periodo sin irrigación.

El resultado es el mismo en ambas repeticiones de este ensayo. Se observó que las mediciones de temperatura se comportan como ondas cíclicas en el tiempo, donde la amplitud de la onda estaría determinada por el tiempo de encendido de la bomba y la longitud de onda por la frecuencia de encendido. De este modo, la configuración 1 (Tabla XI) muestra una longitud y amplitud de onda menor que la configuración 2, 3 y 4 como se observa en la Fig. 26. Al añadir el comportamiento de la temperatura del agua, se observa que aspersiones más largas como en la aspersión de 6 minutos pueden llegar a igualar la temperatura del aire con la temperatura del agua, a diferencia de aspersiones cortas en donde esto no ocurre como se observa en la aspersión de 5 segundos. En la serie de gráficos de la Fig. 26 se puede observar el cambio gradual de los efectos antes descritos a medida que el tiempo de aspersión se reduce.

### 7.2.7. Temperatura en los tres sistemas aeropónicos

Del 22 al 23 de febrero, se realizó una medición simultánea de temperatura de los tres sistemas aeropónicos, con una duración de aproximadamente 36 horas sin irrigación. La medición se realizó para determinar si existen diferencias significativas entre los sistemas aeropónicos dada su colocación dentro de la habitación; la distribución de sensores se describe en la Fig. 5.

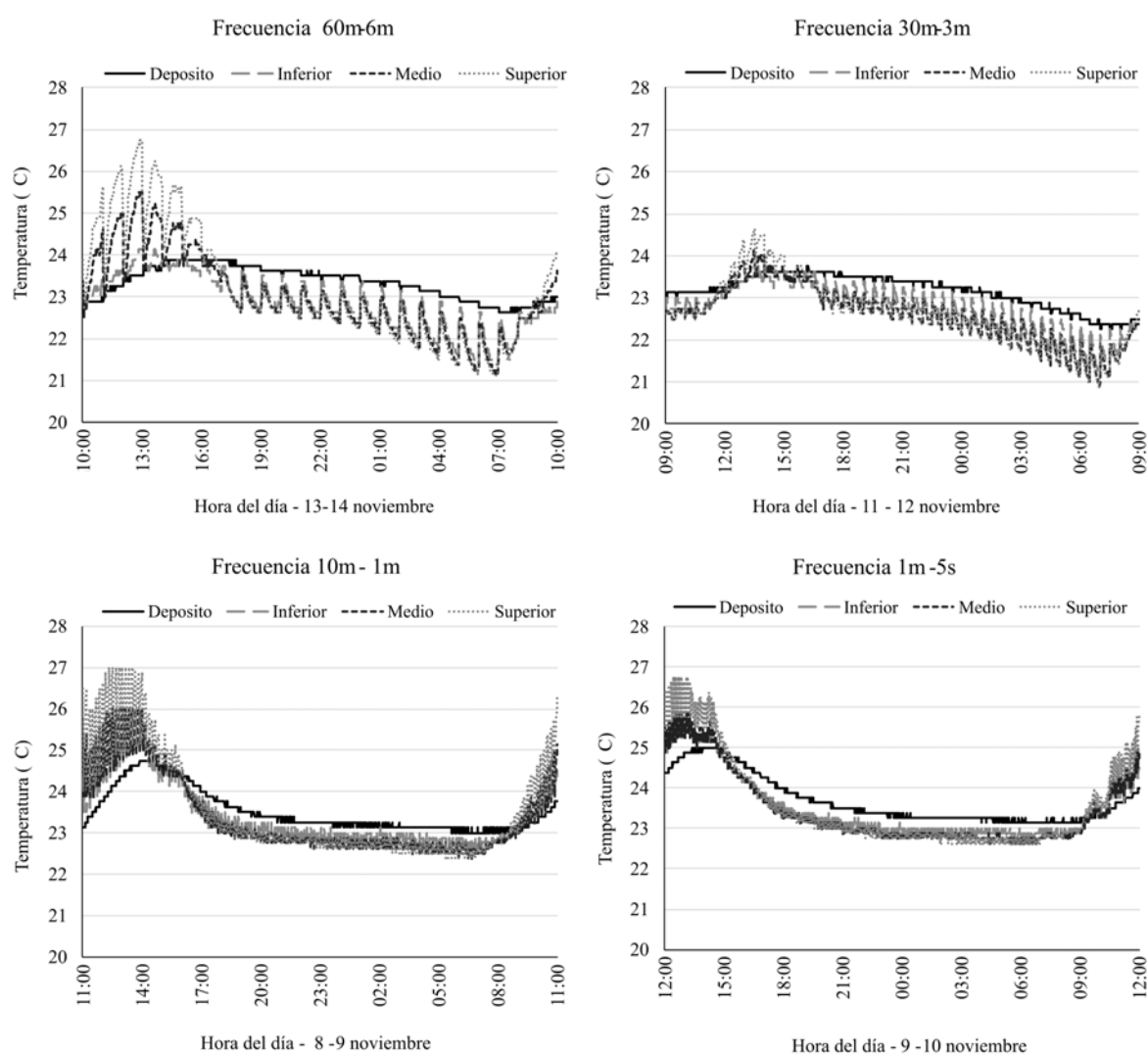
Existe una correlación positiva muy alta casi perfecta entre los tres sistemas aeropónicos. En la Tabla XII se presenta una matriz de coeficientes de correlación de Pearson y  $r^2$  de las mediciones de temperatura realizadas. Se observa que la correlación disminuye un poco en los sistemas más distantes como es el caso del sistema 1 y el sistema 3. La estación meteorológica funciona como un parámetro comparativo con el que se determina que tan parecido es el comportamiento en el interior del compartimento vertical del sistema en correspondencia con el ambiente exterior. Se observa que

la correlación entre las variables y la estación meteorológica es también alta y positiva.

### 7.2.8. Temperatura en la habitación

Se realizó otra serie de mediciones del 20 al 22 de febrero con una duración de 48 horas con la configuración de la Fig. 6. En este ensayo se midió la temperatura en distintas condiciones para determinar si existen relaciones o diferencias significativas entre ellas y en comparación con la estación meteorológica.

En la Tabla XIII se presenta una matriz de coeficientes de correlación de Pearson y  $r^2$ ; se observa



**Figura 26.** Gráficas de la temperatura del interior del compartimento vertical del sistema aeropónico a distintas frecuencias de irrigación. La línea negra y continua representa la temperatura del agua y las líneas más claras representan la temperatura dentro del compartimento vertical de las raíces. Las gráficas corresponden a los ensayos de irrigación que se mencionan en la Tabla XI.

que existe una correlación positiva muy alta entre el sistema sin irrigación y la estación meteorológica, siendo esta la mayor de todas. La correlación entre el sistema sin irrigación y la habitación también es muy alta y positiva. Las correlaciones del agua con el resto de variables son moderadas y las menores de todo el ensayo, a excepción de la correlación con el sistema que tiene irrigación, donde la correlación es alta y positiva (0.827).

**Tabla XII.** Coeficientes de correlación lineal de Pearson y  $r^2$  para mediciones de temperatura de los tres sistemas aeropónicos. La escala de grises determina la dimensión de la correlación. El color blanco representa la menor correlación del ensayo y en la diagonal se presentan correlaciones perfectas con el color más oscuro.

$r^2$	Estación meteorológica	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Temp. agua sistema 2
<b>Pearson</b>					
Estación meteorológica	1	0.880	0.876	0.874	0.874
Sistema 1	0.938	1	0.998	0.992	0.904
Sistema 2	0.936	0.999	1	0.998	0.876
Sistema 3	0.935	0.996	0.999	1	0.863
Temp. agua sistema 2	0.935	0.951	0.942	0.929	1

### 7.3. Cultivo aeropónico de *Stevia rebaudiana*

El cultivo de *Stevia rebaudiana* se realizó del 25 de febrero al 1 de mayo con una duración de 35 días; se irrigó con tres Soluciones Nutritivas (SN) a grupos de 24 plantas, a una frecuencia de 3 minutos cada 30 minutos misma que fue probada en experimentos preliminares con buenos resultados.

#### 7.3.1. Mediciones de pH y C.E. durante el cultivo

El resultado de las mediciones de pH de cada Solución Nutritiva (SN) durante los 35 días de cultivo, se muestra a continuación. La SN Hoagland mantuvo un pH estable, con pocos cambios, iniciando en 5.5 y manteniéndose de forma independiente en un rango entre 6.0 a 7.0. Se realizaron

**Tabla XIII.** Coeficientes de correlación lineal de Pearson y  $r^2$  para mediciones de temperatura de distintas condiciones. La escala de grises determina la dimensión de la correlación. El color blanco representa la menor correlación del ensayo y en la diagonal se presentan correlaciones perfectas con el color más oscuro.

$r^2$	Estación meteorológica	Habitación	Sistema sin irrigación	Sistema con irrigación	Temp. agua sistema 2
<b>Pearson</b>					
Estación meteorológica	1	0.880	0.944	0.887	0.381
Habitación	0.938	1	0.932	0.862	0.529
Sistema sin irrigación	0.972	0.965	1	0.897	0.502
Sistema con irrigación	0.942	0.928	0.947	1	0.683
Temp. agua sistema 2	0.618	0.727	0.708	0.827	1

seis intervenciones durante todo el cultivo con adiciones de ácido clorhídrico (HCL) e hidróxido de potasio (KOH). En total se añadieron 12 ml de HCL y 12 ml de KOH. La medición de pH inicial, la medición de pH después del ajuste y el volumen de cada ajuste durante todo el cultivo, se detallan en la Fig. 27.

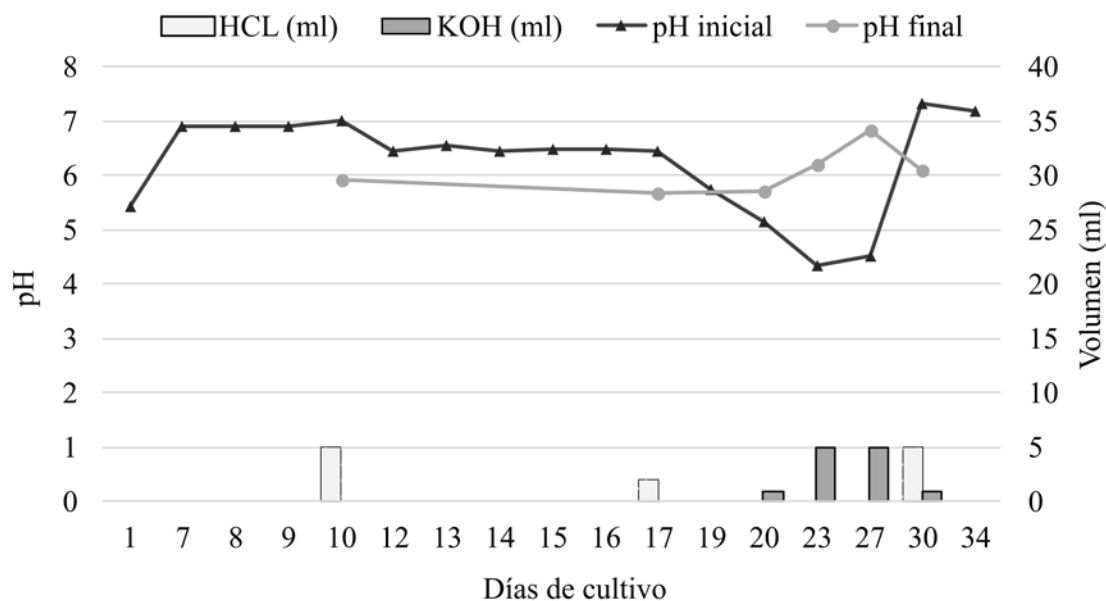
Por su parte la SN Fertiplus tuvo un comportamiento inestable con una tendencia siempre al alza, por lo que se realizaron ajustes frecuentes de pH para acidificar por debajo de 7.0. La intervención en esta SN fue la mayor en comparación con los otros tratamientos, con adiciones de hasta 25 ml de HCL, se utilizaron 216 ml de HCL y 5 ml de KOH. La medición de pH inicial, la medición de pH después del ajuste y el volumen de cada ajuste durante todo el cultivo, se detallan en la Fig. 28.

Finalmente, la SN Triple 19 tuvo un comportamiento estable en los primeros 10 días manteniéndose en un pH cercano a 7.0, tuvo una tendencia a alcalinizarse gradualmente y a partir del día 23 comenzó a acidificarse fuertemente. En total se añadieron 77.5 ml de HCL y 19.5 ml de KOH. La medición de pH inicial, la medición de pH después del ajuste durante todo el cultivo y el volumen de cada ajuste se detallan en la Fig. 29.

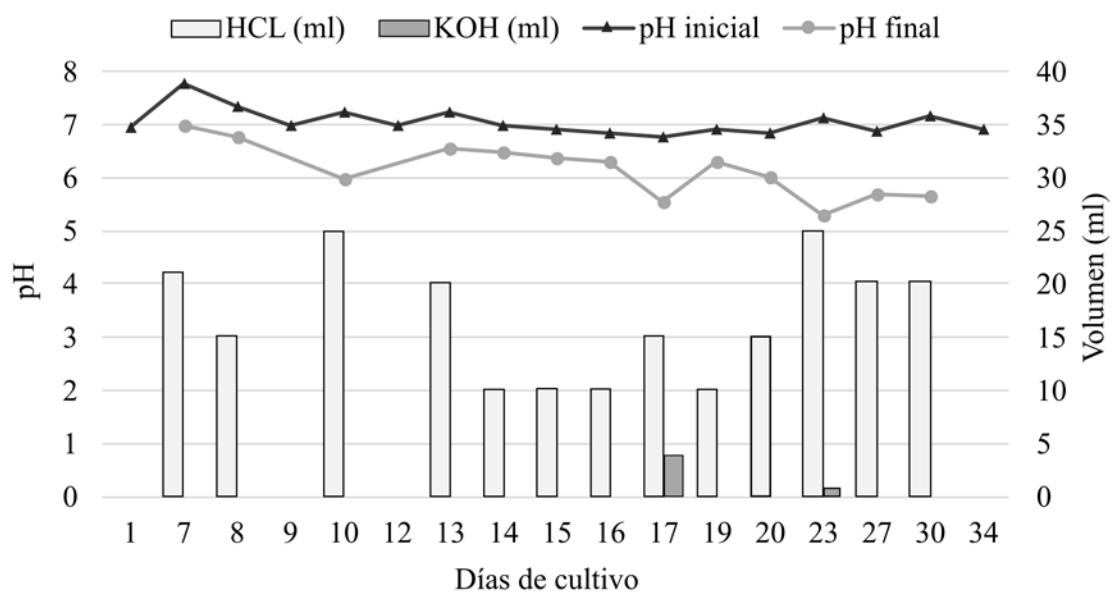
Por otro lado, la C.E. se comportó en todos los tratamientos con un incremento paulatino. En 35 días de cultivo no se realizó ningún ajuste de la C.E. por lo que no se aumentó agua en ningún caso. El comportamiento de la C.E. a lo largo del cultivo se presenta en la Fig. 30. Hoagland presentó el



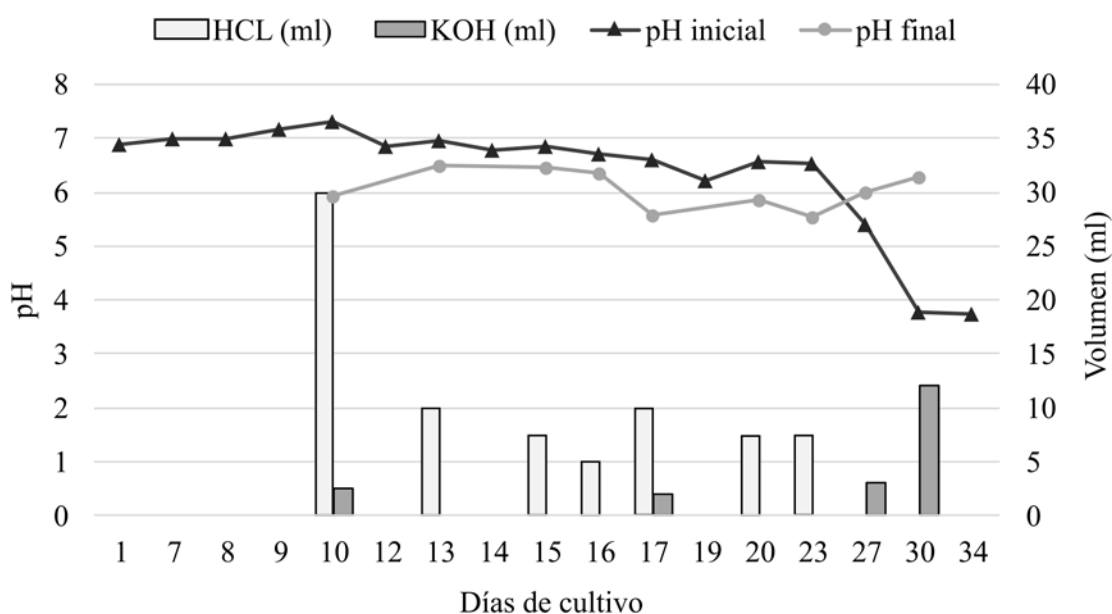
menor incremento en la salinidad de menos de 1 mS/cm durante el cultivo y terminando con 3.4 ms/cm. Fertiplus terminó con la mayor C.E. de 4 mS/cm y tuvo un incremento de casi 3 mS/cm. Por su parte Triple 19 presenta un incremento de 1.2 mS/cm en 35 días y culmina con la menor C.E. de



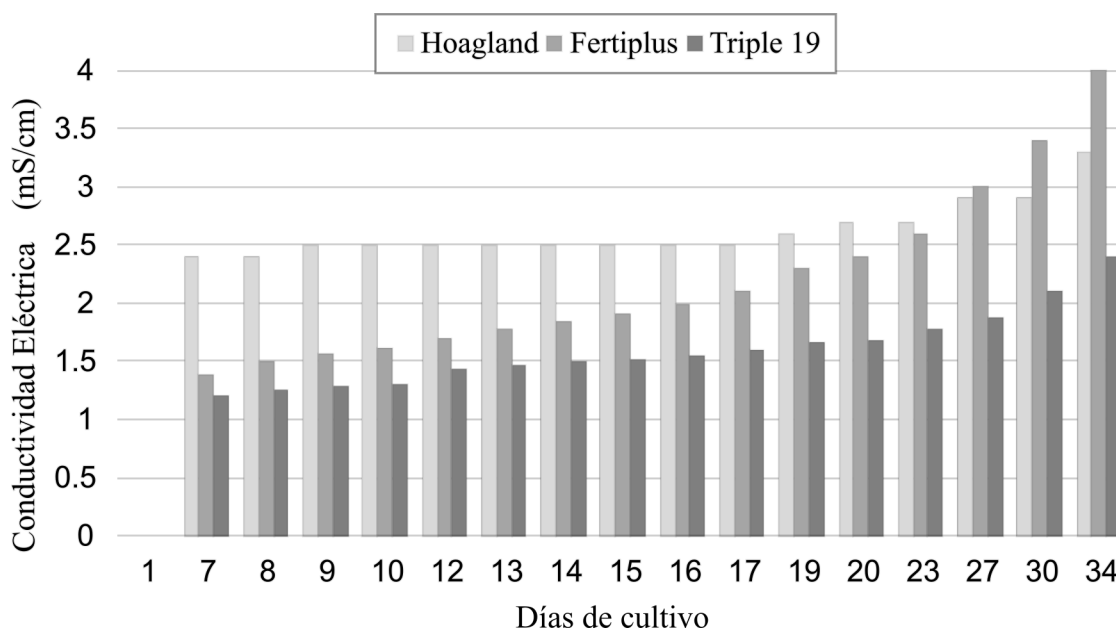
**Figura 27.** Mediciones y ajustes del pH de la SN Hoagland. Realizados durante los 35 días que duró el cultivo. Las líneas muestran las mediciones de pH realizadas antes y después de cada ajuste y las barras la cantidad de sustancia añadida para el ajuste.



**Figura 28.** Mediciones y ajustes del pH de la SN Fertiplus. Realizados durante los 35 días que duró el cultivo. Las líneas muestran las mediciones de pH realizadas antes y después de cada ajuste y las barras, la cantidad de sustancia añadida para el ajuste.



**Figura 29.** Mediciones y ajustes del pH de la SN Triple 19. Realizados durante los 35 días que duró el cultivo. Las líneas muestran las mediciones de pH realizadas antes y después de cada ajuste y las barras la cantidad de sustancia añadida para el ajuste.



**Figura 30.** Mediciones de la C.E. de cada una de las Soluciones Nutritivas, realizadas durante los 35 días que duró el cultivo.

aprox. 2.5 mS/cm.

### 7.3.2. Consumo eléctrico del sistema

En la Tabla XI se muestra el resultado del consumo eléctrico de distintas frecuencias de encendido de la bomba durante 24 horas. Se puede determinar que el consumo en las configuraciones probadas durante un día completo, no representan diferencias sustanciales.

Por su parte el consumo eléctrico durante los 35 días que duró el bioensayo a una frecuencia de 3 minutos cada 30 minutos fue de 19.5 kW/h. Esta medición incluye la bomba y el módulo de irrigación como “unidad funcional”; para calcular o estimar el costo total sería necesario multiplicar esta cifra por el número de “unidades funcionales”. Para este bioensayo el consumo aproximado fue de 58.5 kW/h.

### 7.3.3. Consumo de agua

Los resultados del consumo de agua para cada tratamiento durante los 35 días de cultivo se muestra en la Tabla XIV.

**Tabla XIV.** Consumo de agua de cada Solución Nutritiva en 35 días de cultivo de *Stevia rebaudiana*.

<b>Tratamiento</b>	<b>n</b>	<b>CAT (l)</b>	<b>mPFT (g)</b>	<b>CAP (l)</b>	<b>UEA (l/g)</b>
Hoagland	23	11.03	14.84	0.480	0.032
Fertiplus	21	10.26	9.19	0.489	0.053
Triple 19	22	12.51	10.84	0.569	0.052

n = número de plantas, CAT = Consumo de Agua Total, mPFT = media del Peso Fresco Total, CAP = Cantidad de Agua por Planta, UEA= Uso Eficiente del Agua.

### 7.3.4. Efecto de la luz y tratamientos de fertilización en las variables morfológicas de las plantas de *Stevia rebaudiana*

Antes del montaje en el sistema aeropónico, se midieron las variables morfológicas de Peso Fresco Total inicial (PFTi), Longitud de Tallo inicial (LTi) y Longitud de Raíz inicial (LRi). De acuerdo con los análisis de ANOVA, el PFTi y la LTi no presentaron diferencias estadísticamente significativas para los tratamientos de Soluciones Nutritivas como se observa en la Tabla XV. En el análisis de Duncan (Tabla XVI) el factor luz en la sección inferior del sistema tuvo un efecto en el mayor desarrollo del PFTi, LTi y LRi comparada con la sección superior del sistema.

De acuerdo con las mediciones finales de morfometría, las variables de Peso Fresco Aéreo (PFA), Peso Seco Aéreo (PSA), Peso Seco Raíz (PSR), Peso Fresco Raíz (PFR) y Longitud Raíz (LR) presentaron diferencias significativas para el efecto de la Solución Nutritiva (SN); sin embargo, no presentaron diferencias significativas para el factor de luz, ni para la interacción entre las SN y la luz (Tabla XVII). Por su parte la Longitud Tallo (LT) fue la única variable que presentó diferencias significativas para el factor de luz, donde mostró un crecimiento mayor en la sección inferior con un promedio de  $30.9 \pm 3.4$  cm. En la Tabla XVIII, el análisis de Duncan demuestra que la SN Hoagland tiene el mejor crecimiento en la mayoría de las variables morfométricas, a excepción de la Longitud de Tallo (LT) donde no existen diferencias significativas entre las tallas por efecto de la SN.

**Tabla XV.** Resultado del análisis de varianza de variables morfométricas iniciales para el factor de luz y Solución Nutritiva. Las mediciones fueron realizadas el día del trasplante de las plántulas al sistema aeropónico.

Factores	Long. del Tallo (cm)		Peso Fresco Total (g)		Longitud de Raíz (cm)	
	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p
Luz (L)	32	$1.3e^{-6}$ ***	12.4	$4e^{-6}$ ***	5.3	0.05
Solución Nutritiva (SN)	0	1	0.11	0.8	1.7	0.3
L x SN	2	0.2	0.02	0.9	1.04	0.5
Error	1.1		0.5		1.4	

C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \*\*\* =  $p < 0.001$ .

**Tabla XVI.** Promedio de las variables morfométricas iniciales de acuerdo con distintas secciones de luz. Las mediciones fueron realizadas el día del trasplante de las plántulas al sistema aeropónico.

Sección de luz	Long. del Tallo (cm)	Peso Fresco Total (g)	Longitud de Raíz (cm)
Inferior	$7.03 \pm 0.91^a$	$1.6 \pm 0.9^a$	$2.8 \pm 1.2^a$
Superior	$5.7 \pm 1.2^b$	$0.8 \pm 0.3^b$	$2.3 \pm 1.2^a$

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas entre los promedios (Duncan  $p < 0.05$ ).

**Tabla XVII.** Resultado del análisis de varianza de variables morfológicas finales para el factor luz y factor Solución Nutritiva. Medidas en plantas de estevia cosechadas 35 días después del trasplante al sistema aeropónico.

Factores	Parte aérea						Raíz					
	PFA (g)		PSA (g)		LT (cm)		PFR (g)		PSR (g)		LR (cm)	
	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p
Luz (L)	3.8	0.5	0.24	0.16	161	0.0003***	1.9	0.1	0.007	0.07	29	0.09
Solución Nutritiva (SN)	1000	6e <sup>-5</sup> ***	1.9	2.3e <sup>-5</sup> ***	28	0.09	14	3e <sup>-7</sup> ***	0.03	10e <sup>-6</sup> ***	907	2e <sup>-16</sup> ***
L x SN	1.6	0.8	0.09	0.5	1.4	0.9	0.12	0.8	0.0003	0.8	2.3	0.8
Error	8.8				11		0.7		0.002		10	

PFA= Peso Fresco Aéreo, PSA= Peso Seco Aéreo, LT= Longitud del Tallo, PFR= Peso Fresco Raíz, PSR= Peso Seco Raíz, LR = Longitud de Raíz. C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \*\*\* =  $p < 0.001$ .

**Tabla XVIII.** Promedio de las variables morfométricas finales de acuerdo con distintas Soluciones Nutritivas. Medidas en plantas de estevia 35 días después de su trasplante al sistema aeropónico.

Solución Nutritiva	Parte aérea			Raíz		
	PFA (g)	PSA (g)	LT (cm)	PFR (g)	PSR (g)	LR (cm)
Hoagland	12 ± 4 <sup>a</sup>	1.3 ± 0.4 <sup>a</sup>	30 ± 3.8 <sup>a</sup>	2.9 ± 1.2 <sup>a</sup>	0.15 ± 0.07 <sup>a</sup>	25 ± 4.7 <sup>a</sup>
Fertiplus	7.7 ± 2 <sup>b</sup>	0.8 ± 0.2 <sup>c</sup>	28 ± 3.3 <sup>a</sup>	1.4 ± 0.5 <sup>b</sup>	0.79 ± 0.03 <sup>b</sup>	14 ± 1.7 <sup>b</sup>
Triple 19	9 ± 2 <sup>b</sup>	1.1 ± 0.3 <sup>b</sup>	30 ± 3.7 <sup>a</sup>	1.6 ± 0.5 <sup>b</sup>	0.10 ± 0.04 <sup>b</sup>	13.8 ± 2 <sup>b</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas entre los promedios (Duncan  $p < 0.05$ ).

De acuerdo al análisis de imagen de las hojas seleccionadas, el área foliar de las hojas tuvo diferencias significativas para el efecto de las SN pero no para los factores de luz ni para la interacción entre la SN y la luz (Tabla XIX). El análisis de Duncan mostrado en la Tabla XX, muestra que las SN Hoagland y Triple 19 tienen una media muy semejante y mayor a Fertiplus; sin embargo, Hoagland tiene una desviación estándar muy grande en comparación con las SN Triple 19 y Fertiplus.

**Tabla XIX.** Resultado del análisis de varianza de área foliar final para el factor luz y factor Solución Nutritiva. Medidas en plantas de estevia cosechadas 35 días después del trasplante al sistema aeropónico.

Factores	Área Foliar	
	C.M.	p
Luz (L)	53	0.27
Solución Nutritiva (SN)	150	0.04*
L x SN	95	0.13
Error	43	

C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \* =  $p < 0.05$ .

**Tabla XX.** Promedio del área foliar final de acuerdo con distintas Soluciones Nutritivas. Medidas en plantas de estevia 35 días después de su trasplante al sistema aeropónico.

<b>Solución Nutritiva</b>	<b>Área Foliar</b>
Hoagland	34.5 ± 11 <sup>a</sup>
Fertiplus	27.5 ± 3 <sup>b</sup>
Triple 19	33.8 ± 4 <sup>ab</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas entre los promedios (Duncan  $p < 0.05$ ).

Por otra parte, se observaron diferencias estadísticamente significativas para los índices de crecimiento calculados por efecto de la Solución Nutritiva como se muestra en la Tabla XXI, mientras que el factor luz y la interacción entre factor luz y SN no presentan diferencias significativas. Por su parte la prueba de Duncan para las SN (Tabla XXII), revela que las plantas tratadas con SN Triple 19 tienen un mayor índice de PSR/PFR, mientras que las plantas tratadas con Hoagland y Fertiplus presentan el mismo promedio. Además el fertilizante Triple 19 y Fertiplus presentaron mayor promedio para los índices PSA/PSR, PSA/PST comparados con las plantas irrigadas con la solución Hoagland. Esta última solución junto con Fertiplus presentaron los valores mayores para los índices PSR/PSA y PSR/PST.

**Tabla XXI.** Resultado del análisis de varianza de índices de crecimiento de plantas de estevia para el factor luz y factor Solución Nutritiva. Cosechadas 35 días después del trasplante en el sistema aeropónico.

<b>Factores</b>	<b>PSA/PSR</b>		<b>PSR/PSA</b>		<b>PSR/PST</b>		<b>PSA/PST</b>	
	<b>C.M.</b>	<b>p</b>	<b>C.M.</b>	<b>p</b>	<b>C.M.</b>	<b>p</b>	<b>C.M.</b>	<b>p</b>
Luz (L)	1.4	0.7	0.001	0.1	0.0008	0.1	0.0008	0.1
Solución Nutritiva (SN)	45.4	0.06	0.002	0.01*	0.001	0.01*	0.001	0.01*
L x SN	25	0.2	0.0007	0.2	0.0005	0.2	0.0005	0.2
Error	15		0.0004		0.0003		0.0003	

PSA/PSR = Peso Seco Aéreo/Peso Seco Raíz, PSR/PSA = Peso Seco Raíz/Peso Seco Aéreo, PSR/PST = Peso Seco Raíz/Peso Seco Total, PSA/PST = Peso Seco Aéreo/Peso Seco Total. C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \* =  $p < 0.05$ .

**Tabla XXII.** Promedio de los índices de crecimiento finales de acuerdo con distintas Soluciones Nutritivas. Calculados a partir de plantas de estevia 35 días después de su trasplante al sistema aeropónico.

<b>Solución Nutritiva</b>	<b>PSA/PSR</b>	<b>PSR/PSA</b>	<b>PSR/PST</b>	<b>PSA/PST</b>
Hoagland	$9.6 \pm 2.4^b$	$0.11 \pm 0.02^a$	$0.1 \pm 0.02^a$	$0.90 \pm 0.02^b$
Fertiplus	$10.7 \pm 2.6^{ab}$	$0.1 \pm 0.02^{ab}$	$0.09 \pm 0.02^{ab}$	$0.91 \pm 0.02^{ab}$
Triple 19	$12.4 \pm 5.8^a$	$0.09 \pm 0.02^b$	$0.08 \pm 0.02^b$	$0.92 \pm 0.02^a$

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

Para determinar el contenido de humedad se expresó con el índice Peso Seco Aéreo / Peso Fresco Aéreo (PSA/PFA), el cual presenta diferencias estadísticamente significativas en los factores de Solución Nutritiva y luz así como en su interacción (Tabla XXIII).



**Tabla XXIII.** Resultado del análisis de varianza del contenido de humedad de plantas de estevia para el factor luz y factor Solución Nutritiva. Cosechadas 35 días después del trasplante en el sistema aeropónico.

Factores	Parte aérea				Raíz			
	PSA/PFA		CHA (%)		PSR/PFR		CHR (%)	
	C.M.	P	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p
Luz (L)	0.0007	0.001**	0.001	0.001**	0.00003	0.57	0.00007	0.7
Solución Nutritiva (SN)	0.002	3.8e <sup>-12</sup> ***	0.006	8e <sup>-13</sup> ***	0.0008	0.0004***	0.003	0.002**
L x SN	0.0003	0.007**	0.0008	0.005**	0.00003	0.7	0.0001	0.7
Error	0.00006		0.0001		0.00009		0.0005	

PSA/PFA = Peso Seco Aéreo/ Peso Fresco Aéreo, CHA = Contenido de Humedad Aérea, PSR/PFR = Peso Seco Raíz/Peso Fresco Raíz, CHR = Contenido de Humedad de Raíz. C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \*\* =  $p < 0.01$ , \*\*\* =  $p < 0.001$ .

La SN Triple 19 presentó el mayor valor para el índice de PSA/PFA, seguido de las plantas irrigadas con Hoagland como se observa en la Tabla XXIV. En cuanto al factor de luz las plantas de los niveles superiores, tuvieron una mayor cantidad de humedad promedio como se muestra en la Tabla XXV. Con respecto a la interacción entre la SN y el factor de luz, la SN Triple 19 y en particular las plantas de la sección superior de luz, fueron las de mayor efecto sobre el contenido de humedad de las plantas (Tabla XXVI).

**Tabla XXIV.** Promedio del contenido de humedad final de acuerdo con distintas Soluciones Nutritivas. Calculados a partir de plantas de estevia cosechadas 35 días después de su trasplante en el sistema aeropónico.

<b>Solución Nutritiva</b>	<b>PSA/PFA</b>	<b>CHA (%)</b>	<b>PSR/PFR</b>	<b>CHR (%)</b>
Hoagland	0.11 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.22 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.05 ± 0.007 <sup>b</sup>	1.33 ± 0.01 <sup>a</sup>
Fertiplus	0.10 ± 0.003 <sup>c</sup>	1.24 ± 0.005 <sup>a</sup>	0.05 ± 0.007 <sup>b</sup>	1.33 ± 0.01 <sup>a</sup>
Triple 19	0.12 ± 0.007 <sup>a</sup>	1.20 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.31 ± 0.02 <sup>b</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

**Tabla XXV.** Promedio del contenido de humedad de acuerdo con distintas secciones de luz. Calculados a partir de plantas de estevia 35 días después de su trasplante.

<b>Sección de luz</b>	<b>PSA/PFA</b>	<b>CHA (%)</b>
Inferior	0.11 ± 0.009 <sup>b</sup>	1.22 ± 0.01 <sup>a</sup>
Superior	0.12 ± 0.016 <sup>a</sup>	1.21 ± 0.02 <sup>b</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

El Contenido de Humedad de la parte Aérea de la planta (CHA) tuvo diferencias para los dos factores y la interacción entre los mismos (Tabla XXIII). Para esta variable la SN Fertiplus presentó el mayor promedio de humedad seguidas de Hoagland y Triple 19 como se observa en la Tabla XXIV. Respecto al factor luz, las plantas que se encontraban recibiendo menor cantidad de luz (sección inferior) presentaron la mayor cantidad de humedad (Tabla XXV). Con respecto a la interacción, las plantas con Fertiplus en la parte superior e inferior presentaron la mayor humedad como se demuestra en la Tabla XXVI.

**Tabla XXVI.** Promedio del contenido de humedad de acuerdo con la interacción de distintas Soluciones Nutritivas y secciones de luz. Calculados a partir de plantas de estevia 35 días después de su trasplante en el sistema aeropónico.

<b>Solución Nutritiva</b>	<b>Luz</b>	<b>PSA/PFA</b>	<b>CHA (%)</b>
Hoagland	Inferior	0.11 ± 0.005 <sup>c</sup>	1.23 ± 0.008 <sup>b</sup>
Hoagland	Superior	0.12 ± 0.016 <sup>b</sup>	1.21 ± 0.02 <sup>c</sup>
Fertiplus	Inferior	0.10 ± 0.003 <sup>cd</sup>	1.24 ± 0.005 <sup>ab</sup>
Fertiplus	Superior	0.10 ± 0.003 <sup>d</sup>	1.24 ± 0.004 <sup>a</sup>
Triple 19	Inferior	0.12 ± 0.008 <sup>b</sup>	1.21 ± 0.01 <sup>c</sup>
Triple 19	Superior	0.13 ± 0.004 <sup>a</sup>	1.21 ± 0.005 <sup>d</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

### 7.3.5. Efecto de la temperatura y tratamientos de fertilización de las variables morfométricas de las plantas de *Stevia rebaudiana*

Para la variable de Peso Fresco Total inicial (PFTi) y Longitud de Tallo inicial (LTi) se presentaron diferencias significativas en el factor de temperatura (Tabla XXVII). Donde las plantas con mayor PFT correspondieron a la parte baja del sistema, seguida de la parte media y alta, estos últimos sitios sin diferencia entre ellos; para la LTi igualmente los mayores valores se localizaron en la parte baja y media sin diferencias significativas en sus medias como se observa en la Tabla XXVIII. Con respecto a la Longitud Raíz inicial (LRi), la diferencia significativa correspondió a la interacción de la SN y el factor temperatura, en donde la tendencia parece repetirse con una mayor longitud en las plántulas de la parte inferior y decreciendo hacia las plantas en partes superiores.

**Tabla XXVII.** Resultado del análisis de varianza de las variables morfométricas iniciales para el factor temperatura y factor Solución Nutritiva. Medidas al trasplante de plántulas de estevia en el sistema aeropónico.

Factores	Peso Fresco Total (g)		Long. del Tallo (cm)		Long. de Raíz (cm)	
	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p
Temperatura (T)	8.1	$6e^{-7***}$	24.9	$2e^{-9***}$	2.6	0.1
Solución Nutritiva (SN)	0.1	0.8	0.000	1	1.7	0.3
T x SN	0.1	0.9	1.2	0.26	3	0.08
Error	0.4		0.9		1.2	

C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \*\*\* =  $p < 0.001$ .

**Tabla XXVIII.** Promedio de las variables morfométricas iniciales de acuerdo con distintas secciones de temperatura en el interior del compartimento vertical del sistema aeropónico. Medidas al trasplante de plántulas de estevia en el sistema aeropónico.

Sección de Temperatura (T)	Peso Fresco Total (g)	Longitud Tallo (cm)
Alto	$0.8 \pm 0.4^b$	$5 \pm 1^b$
Medio	$1 \pm 0.4^b$	$7 \pm 0.7^a$
Bajo	$1.8 \pm 0.9^a$	$7 \pm 1^a$

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

Para las variables morfométricas finales, el efecto de la SN sobre el Peso Fresco Aéreo (PFA) y el Peso Seco Aéreo (PSA) presentó diferencias estadísticamente significativas a diferencia del factor de temperatura y la interacción de ambos factores (Tabla XXIX). El mayor desarrollo del PFA se presentó en las plantas irrigadas con la SN Hoagland, seguidas de Triple 19 y Fertiplus pertenecientes al mismo grupo (Tabla XXX). El mayor PSA se presentó en las plantas irrigadas con SN Hoagland, seguidas de Fertiplus y por último la SN Triple 19.

**Tabla XXIX.** Resultado del análisis de varianza de las variables morfométricas finales para el factor temperatura y factor Solución Nutritiva. Medidas en plantas de estevia cosechadas 35 días después del trasplante en el sistema aeropónico.

Factores	Parte Aérea						Raíz					
	PFA		LT		PSA		PFR		PSR		LR	
	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p
Temp. (T)	8	0.4	73	0.003**	0.2	0.1	2	0.03*	0.009	0.01*	28	0.06
Solución Nutritiva (SN)	100	8e <sup>-5</sup> ***	28	0.1	1.8	3.4e <sup>-6</sup> ***	14	2e <sup>-7</sup> ***	0.03	6e <sup>-7</sup> ***	907	2e <sup>-16</sup> ***
T x SN	1	0.1	3	0.9	0.02	0.1	0.3	0.8	0.001	0.7	7	0.5
Error	9		12		0.1		0.7		0.002		9	

PFA= Peso Fresco Aéreo, PSA= Peso Seco Aéreo, LT= Longitud del Tallo, PFR= Peso Fresco Raíz, PSR= Peso Seco Raíz, LR = Longitud de Raíz. C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \* =  $p < 0.05$ , \*\* =  $p < 0.01$ , \*\*\* =  $p < 0.001$ .

**Tabla XXX.** Promedio de las variables morfométricas finales de acuerdo con distintas Soluciones Nutritivas aplicadas. Medidas a partir de plantas de estevia 35 días después de su trasplante en el sistema aeropónico.

Solución Nutritiva (SN)	Parte aérea			Raíz	
	PFA (g)	PSA (g)	PFR (g)	PSR (g)	LR (cm)
Hoagland	12 ± 4 <sup>a</sup>	1.4 ± 0.5 <sup>a</sup>	3 ± 1.2 <sup>a</sup>	0.15 ± 0.07 <sup>a</sup>	25 ± 4 <sup>a</sup>
Fertiplus	7.7 ± 2 <sup>b</sup>	0.8 ± 0.2 <sup>c</sup>	1.4 ± 0.5 <sup>b</sup>	0.07 ± 0.03 <sup>b</sup>	14 ± 1.7 <sup>b</sup>
Triple 19	9 ± 2 <sup>b</sup>	1.2 ± 0.3 <sup>b</sup>	1.6 ± 0.5 <sup>b</sup>	0.1 ± 0.04 <sup>b</sup>	14 ± 1.9 <sup>b</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

La Longitud Tallo (LT) presentó diferencias estadísticas sólo para el factor de temperatura como se observa en la Tabla XXIX. La mayor LT se observó en la parte baja del sistema, seguida de las secciones media y por último la parte alta (Tabla XXXI).

En el caso del Peso Fresco Raíz (PFR) y Peso Seco Raíz (PSR), el resultado del análisis de varianzas muestra diferencias significativas para los factores de temperatura y SN, pero no para la interacción de los mismos (Tabla XXIX). Los análisis de separación de medias de Duncan muestran que ambas variables presentan su mayor valor en plantas irrigadas con SN Hoagland, seguidas de las plantas irrigadas con Triple 19 y Fertiplus; estas últimas sin diferencias significativas para ambas variables como se aprecia en la Tabla XXX.

En el caso del factor de temperatura ambas variables PFR y PSR son mayores en las sección alta y van decreciendo gradualmente en las secciones media y baja como se detalla en la Tabla XXXI. La variable Longitud Raíz (LR) presentó diferencias significativas para el factor SN, pero no para el factor temperatura ni para la interacción entre éstos (Tabla XXIX). La mayor LR la presentaron plantas con SN Hoagland, mientras que en menor medida e iguales, las plantas con SN Triple 19 y Fertiplus como se detalla en la Tabla XXX.

**Tabla XXXI.** Promedio de las variables morfométricas finales de acuerdo con distintas secciones de temperatura en el interior del compartimento vertical del sistema aeropónico. Medidas a partir de plantas de estevia 35 días después de su trasplante en el sistema aeropónico.

Sección de Temperatura (T)	Parte aérea		Raíz	
	LT (cm)	PFR (g)	PSR (g)	LR (cm)
Alto	27 ± 3 <sup>b</sup>	2.3 ± 1 <sup>a</sup>	0.13 ± 0.07 <sup>a</sup>	19 ± 7 <sup>a</sup>
Medio	29 ± 3 <sup>ab</sup>	2.1 ± 1 <sup>ab</sup>	0.11 ± 0.04 <sup>ab</sup>	18 ± 6 <sup>a</sup>
Bajo	31 ± 3 <sup>a</sup>	1.6 ± 0.8 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.05 <sup>b</sup>	16 ± 5 <sup>a</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

De acuerdo al análisis de imagen de las hojas seleccionadas, el área foliar de las hojas no tuvo diferencias significativas por el efecto de las SN, tampoco tuvo diferencias para el factor de temperatura ni para la interacción entre los factores SN y la temperatura (Tabla XXXII).

**Tabla XXXII.** Resultado del análisis de varianza de área foliar final para el factor temperatura y factor Solución Nutritiva. Medidas en plantas de estevia cosechadas 35 días después del trasplante al sistema aeropónico.

Factores	Área Foliar	
	C.M.	p
Temperatura (T)	9	0.84
Solución Nutritiva (SN)	150	0.08
T x SN	36	0.61
Error	53	

C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \* =  $p < 0.05$ .

Con respecto a los índices de crecimiento, Peso Seco Aéreo de la planta en relación al Peso Seco de Raíz (PSA/PSR) las diferencias se presentaron para el factor SN y no hubo diferencias para el factor temperatura y la interacción entre los dos factores (Tabla XXXIII). De las diferencias entre los tratamientos de SN para el índice PSA/PSR, el mayor desarrollo de la parte aérea de la planta con respecto a la raíz se observó para las plantas bajo tratamientos de SN Triple 19 y SN Fertiplus, como se observa en la Tabla XXXIV.

Para los índices, Peso Seco de Raíz con respecto al Peso Seco Total (PSR/PST), Peso Seco Aéreo con respecto al Peso Seco Total (PSA/PST) y Peso Seco Raíz con respecto al Peso Seco

**Tabla XXXIII.** Resultado del análisis de varianza de los índices de crecimiento finales para el factor temperatura y factor Solución Nutritiva. Medidas en plantas de estevia cosechadas 35 días después del trasplante en el sistema aeropónico.

Factores	PSA/PSR		PSA/PST		PSR/PSA		PSR/PST	
	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p
Temperatura (T)	17	0.3	0.001	0.02*	0.001	0.02*	0.001	0.02*
Solución Nutritiva (SN)	45	0.05	0.001	0.01*	0.002	0.01*	0.001	0.01*
T x SN	22	0.2	0.0003	0.4	0.0004	0.4	0.0003	0.4
Error	15		0.0003		0.0004		0.0003	

PSA/PSR = Peso Seco Aéreo/Peso Seco Raíz, PSA/PST = Peso Seco Aéreo/Peso Seco Total, PSR/PSA = Peso Seco Raíz/Peso Seco Aéreo, PSR/PST = Peso Seco Raíz/ Peso Seco Total. C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \* =  $p < 0.05$ .

Aéreo (PSR/PSA) se presentaron diferencias significativas en los factores de temperatura (sección de temperatura) y SN, pero no en la interacción de los mismos (Tabla XXXIII). En las diferencias entre las SN, el índice PSR/PST fue mayor para la SN Hoagland, y menor para la SN Triple 19 y Fertiplus al igual que el índice PSR/PSA donde el mayor valor se presenta en la SN Hoagland seguida de la SN Fertiplus y Triple 19 (Tabla XXXIV). La relación PSA/PST presentó su mayor valor con la SN Triple 19 y menores para las SN Fertiplus y Hoagland respectivamente, como se observa en la Tabla XXXIV.

**Tabla XXXIV.** Promedio de los índices de crecimiento finales de acuerdo con distintas Soluciones Nutritivas aplicadas. Medidas a partir de plantas de estevia 35 días después de su trasplante en el sistema aeropónico.

Solución Nutritiva (SN)	Parte aérea			Raíz	
	PFA (g)	PSA (g)	PFR (g)	PSR (g)	LR (cm)
Hoagland	12 ± 4 <sup>a</sup>	1.4 ± 0.5 <sup>a</sup>	3 ± 1.2 <sup>a</sup>	0.15 ± 0.07 <sup>a</sup>	25 ± 4 <sup>a</sup>
Fertiplus	7.7 ± 2 <sup>b</sup>	0.8 ± 0.2 <sup>c</sup>	1.4 ± 0.5 <sup>b</sup>	0.07 ± 0.03 <sup>b</sup>	14 ± 1.7 <sup>b</sup>
Triple 19	9 ± 2 <sup>b</sup>	1.2 ± 0.3 <sup>b</sup>	1.6 ± 0.5 <sup>b</sup>	0.1 ± 0.04 <sup>b</sup>	14 ± 1.9 <sup>b</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).



Por otro lado, para las secciones de temperatura, el índice PSA/PST tuvo su valor más grande en la sección baja del sistema, mientras que los índices de Peso Seco Raíz PSR/PSA y PSR/PST tuvieron mayor crecimiento en las secciones altas y medias como se detalla en la Tabla XXXV.

**Tabla XXXV.** Promedio de los índices de crecimiento finales de acuerdo con distintas secciones de temperatura en el interior del compartimento vertical del sistema aeropónico. Medidas a partir de plantas de estevia 35 días después de su trasplante en el sistema aeropónico.

<b>Sección de Temperatura (T)</b>	<b>PSA/PST</b>	<b>PSR/PSA</b>	<b>PSR/PST</b>
Alto	$0.90 \pm 0.02^b$	$0.10 \pm 0.02^a$	$0.09 \pm 0.02^a$
Medio	$0.90 \pm 0.02^{ab}$	$0.10 \pm 0.02^a$	$0.09 \pm 0.02^{ab}$
Bajo	$0.91 \pm 0.01^a$	$0.08 \pm 0.01^b$	$0.08 \pm 0.01^b$

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

El contenido de humedad de las plantas medido con la relación entre Peso Seco Aéreo con respecto al Peso Fresco Aéreo (PSA/PFA) y el Peso Fresco de Raíz y el Peso Seco de Raíz (PFR/PSR) presentaron diferencias significativas para las SN al igual que los porcentajes del Contenido de Humedad Aéreo (CHA) y el Contenido de Humedad de Raíz (CHR) (Tabla XXXVI).

El índice PFR/PSR no presentó diferencias estadísticas en el factor de temperatura a diferencia del resto de variables del contenido de humedad, quienes si presentaron diferencias significativas en el factor de temperatura. Ninguna de las anteriores variables presentó diferencias significativas en la interacción de los factores temperatura y SN.

Los índices de contenido de humedad PSA/PFA y PSR/PFR, presentan su valor más grande con la SN Triple 19 seguidos de las SN Hoagland y Fertiplus, las cuales resultaron iguales para el índice PSR/PFR, como se precisa en la Tabla XXXVII. El contenido de humedad aéreo (PSA/PFA) tuvo su mayor resultado en la sección alta de temperatura seguido de las secciones media y baja con pequeñas diferencias significativas (Tabla XXXVIII).

El Contenido de Humedad Aéreo (CHA) presentó su mayor humedad con la SN Fertiplus, seguido de Hoagland y Fertiplus; por su parte, el Contenido de Humedad de Raíz resultó igual para las SN Hoagland y Triple 19 y con la mayor humedad, como se observa en la Tabla XXXVIII.

**Tabla XXXVI.** Resultado del análisis de varianza de las variables de contenido de humedad para el factor temperatura y factor Solución Nutritiva. Medidas en plantas de estevia cosechadas 35 días después del trasplante en el sistema aeropónico.

Factores	Parte aérea				Raíz			
	PSA/PFA		CHA (%)		PSR/PFR		CHR (%)	
	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p	C.M.	p
Temperatura (T)	0.0003	0.01*	0.0007	0.01*	0.0001	0.11	0.0009	0.1
Solución Nutritiva (SN)	0.003	3e <sup>-11</sup> ***	0.006	7e <sup>-12</sup> ***	0.0008	0.0003***	0.003	0.001**
T x SN	0.0001	0.08	0.0003	0.06	0.00006	0.55	0.0003	0.5
Error	0.00007		0.0001		0.00008		0.0004	

PSA/PFA = Peso Seco Aéreo/Peso Fresco Aéreo, CHA = Contenido de Humedad Aéreo, PSR/PFR = Peso Seco Raíz/Peso Fresco Raíz, CHR = Contenido de Humedad de Raíz. C.M. = Cuadrados Medios. Diferencias significativas y confiabilidad, \* =  $p < 0.05$ , \*\* =  $p < 0.01$ , \*\*\* =  $p < 0.001$ .

**Tabla XXXVII.** Promedio de las variables de contenido de humedad de acuerdo con distintas Soluciones Nutritivas aplicadas. Medidas a partir de plantas de estevia 35 días después de su trasplante en el sistema aeropónico.

<b>Solución Nutritiva (SN)</b>	<b>Parte aérea</b>		<b>Raíz</b>	
	<b>PSA/PFA</b>	<b>CHA (%)</b>	<b>PSR/PFR</b>	<b>CHR (%)</b>
Hoagland	0.11 ± 0.013 <sup>b</sup>	1.22 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.05 ± 0.007 <sup>b</sup>	1.33 ± 0.01 <sup>a</sup>
Fertiplus	0.10 ± 0.003 <sup>c</sup>	1.24 ± 0.005 <sup>a</sup>	0.05 ± 0.008 <sup>b</sup>	1.31 ± 0.02 <sup>a</sup>
Triple 19	0.12 ± 0.007 <sup>a</sup>	1.20 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.33 ± 0.03 <sup>b</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

**Tabla XXXVIII.** Promedio de las variables de contenido de humedad de acuerdo con distintas secciones de temperatura en el interior del compartimento vertical del sistema aeropónico. Medidas a partir de plantas de estevia 35 días después de su trasplante en el sistema aeropónico.

<b>Sección Temperatura (T)</b>	<b>PSA/PFA</b>	<b>CHA (%)</b>
Alto	0.11 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.2 ± 0.02 <sup>a</sup>
Medio	0.11 ± 0.01 <sup>ab</sup>	1.2 ± 0.02 <sup>a</sup>
Bajo	0.11 ± 0.009 <sup>b</sup>	1.2 ± 0.01 <sup>a</sup>

Literales diferentes por columna indican diferencias estadísticas (Duncan  $p < 0.05$ ).

#### 7.4. Análisis de costo

Uno de los propósitos de este trabajo, fue el de poder construir un sistema aeropónico con materiales locales, comunes y de bajo costo. En esta sección se presentan los costos aproximados del sistema aeropónico vertical, los módulos de medición e irrigación y los costos de las Soluciones Nutritivas utilizadas para el cultivo de *Stevia rebaudiana*. Todos los costos están expresados en pesos mexicanos. Ninguno de los costos totales incluye gastos de envío ni tampoco IVA o impuestos relacionados.

##### 7.4.1. Sistema aeropónico y módulo de irrigación

El costo de un sistema aeropónico sin el módulo de irrigación está alrededor de los \$3,800.00 m.n. Los materiales utilizados para la fabricación del sistema aeropónico vertical y su costo se listan

en la Tabla XXXIX. Por su parte el módulo de irrigación tuvo un costo aproximado de \$1,050.00 m.n. Los componentes utilizados y su costo se presentan en la Tabla XL. Estos dos elementos, el sistema aeropónico y el módulo de irrigación forman una “unidad funcional”, es decir, la unidad más simple para efectuar un cultivo y su costo es de \$4,850.00 m.n.

#### 7.4.2. Módulos de medición de variables

El módulo de medición de temperatura, humedad e iluminancia fabricado, tuvo un costo total de \$1,450 m.n. los componentes utilizados para su fabricación y el costo unitario de los mismos, se muestran en la Tabla XLI. Por su parte el módulo de medición de pH y C.E. tuvo un costo de \$5,750.00 m.n. En la Tabla XLII se muestran los componentes utilizados y el costo de cada uno. Además el módulo de consumo eléctrico tuvo un costo aproximado de \$500.00 m.n. Los módulos de medición no son necesarios para el funcionamiento del sistema aeropónico vertical, por lo que su adquisición en un enfoque comercial es opcional. En este trabajo los módulos de medición funcionaron como herramientas para la caracterización del sistema y del cultivo.

**Tabla XXXIX.** Tabla de componentes y costo del sistema aeropónico vertical.

No. de Comp.	Descripción	Material	Datos técnicos	Cant.	Precio Unit. (M. N.)	Total
1	Compartimento principal de raíces cilíndrico	PVC – sanitario	Ø - 8 pulg. Altura – 1.50 m	1	\$250.00	\$250.00
2	Tapa superior e inferior del compartimento principal	PVC – sanitario	Ø – 8 pulg.	2	\$40.00	\$80.00
3	Cople unión entre tapas y tubo sanitario	PVC – sanitario	Ø – 8 pulg.	2	\$40.00	\$80.00
4	Codo para el soporte de las esponjas y plantas	PVC – sanitario	Ø – 2 pulg. Angulo – 45°	24	\$5.00	\$120.00
5	Empaques de goma para soporte de codos	Caucho	Ø – 2 pulg.	24	\$20.00	\$480.00
6	Esponjas para soporte de las plantas	Sintético 100% poliéster	Ø - 1½ pulg. Altura – 7 cm	24	\$1.50	\$36.00
7	Depósito del agua. Plástico color negro con tapa	Plástico	Vol. – 27gal = 102L Alto – 35 cm Ancho – 35 cm Largo – 76 cm	1	\$200.00	\$200.00
8	Filtro AZUD MODULAR 100 – elemento filtrante de malla	Malla de acero inox. ANSI 316	130 micras – 120 mesh Ø – ¾ pulg.	1	\$500.00	\$500.00
9	Manómetro vertical de glicerina	Acero inox.	0 – 100 psi Precisión – 2 psi	1	\$200.00	\$200.00
10	Válvula “Check” de resorte	PVC- hidráulico	Ø – ½ pulg.	1	\$40.00	\$40.00
11	Manguera recubierta de cinta opaca	Plástico	Ø – ¾ pulg. Distancia – 1.2 m	1	\$35.00	\$35.00
12	Codo de conexión para el tubo de distribución	PVC- hidráulico	Ø – ½ pulg. Angulo – 90°	2	\$5.00	\$10.00

Tabla de componentes y costo del sistema aeropónico vertical - continuación.

13	Boquilla de manguera con terminal roscada	Latón – Bronce	Ø – ¼ - ½ pulg.	1	\$50.00	\$50.00
14	Nebulizador de baja presión EXL serie 500 marca TAVLIT	Plástico	Óptimo – 50 psi Caudal – 12 l/h	24	\$10.00	\$240.00
15	Tapón hembra a presión	PVC- hidráulico	Ø – ½ pulg.	2	\$4.00	\$8.00
16	Tapón macho roscado	PVC- hidráulico	Ø – ½ pulg.	2	\$12.00	\$24.00
17	Unión T hembra para manómetro	PVC- hidráulico	Ø – ½ pulg.	3	\$10.00	\$30.00
18	Tuerca unión para conexión de tubos de irrigación	PVC- hidráulico	Ø – ½ pulg.	1	\$20.00	\$20.00
19	Tubo de irrigación donde se conectan los nebulizadores	PVC- hidráulico	Ø – ½ pulg. Distancia – 4 m	1	\$60.00	\$60.00
20	Bomba automática de diafragma con interruptor de presión	Plástico, acero inox.	Presión – 35 PSI Caudal – 4.3 l/min C. nominal – 2 A	1	\$1,300.00	\$1,300.00
21	Reductor para conectar el filtro al sistema	PVC- hidráulico	¾ H – ½ H	1	\$10.00	\$10.00
22	Reductor para conectar el filtro al sistema	PVC- hidráulico	½ M – ¾ H	1	\$10.00	\$10.00
<b>Total*</b>						\$3,783.00

\*El costo total no incluye el gasto de envío de los componentes.

**Tabla XL.** Tabla de componentes y costo del módulo de irrigación.

<b>No. de Componente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unit. (M.N.)</b>	<b>Total</b>
1	Tarjeta microcontroladora Arduino Mega	1	\$375.00	\$375.00
2	Tarjeta reloj de tiempo real DS3231	1	\$150.00	\$150.00
3	Módulo de 8 relevadores con aislamiento	1	\$170.00	\$170.00
4	“Display” - Pantalla de cristal líquido LCD	1	\$80.00	\$80.00
5	Teclado numérico matricial plano 4x4	1	\$45.00	\$45.00
6	Caja plástica 18 x 6.5 x 11 cm	1	\$120.00	\$120.00
7	Insumos varios: cables, resistencias, soldadura, placas, pines, entre otros	1	\$100.00	\$100.00
8	Fuente de poder para PC a 12v, 10Amp., 1000W	0	\$1,000.00	\$0.00
			<b>Total*</b>	\$1,040.00

\*El costo total no incluye el gasto de envío de los componentes.

**Tabla XLI.** Tabla de componentes y costo del módulo de medición.

<b>No. de Componente</b>	<b>Descripción del Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unit. (M.N.)</b>	<b>Total</b>
1	Tarjeta microcontroladora Arduino Uno	1	\$250.00	\$250.00
2	Tarjeta reloj de tiempo real DS3231	1	\$150.00	\$150.00
3	Sensor de temperatura encapsulado en acero inox. DS18B20	4	\$50.00	\$200.00
4	Sensor de humedad y temperatura DHT22	1	\$125.00	\$125.00
5	Sensor de intensidad luminosa BH1750	2	\$40.00	\$80.00
6	Sensor ultrasónico SRF04	1	\$63.00	\$63.00
7	Tarjeta de lectura/escritura para memoria microSD	1	\$25.00	\$25.00
8	Memoria Flash microSD 16 GB	1	\$60.00	\$60.00
9	Bocina tipo Buzzer	1	\$10.00	\$10.00
10	Indicador luminoso LED	1	\$5.00	\$5.00
11	Caja plástica 10.2 x 4.1 x 7.7 cm	1	\$100.00	\$100.00
12	Eliminador de baterías de 5V, 1Amp.	1	\$250.00	\$250.00
13	Insumos varios: cables, resistencias, soldadura, placas, pines, entre otros	1	\$100.00	\$100.00
			<b>Total*</b>	<b>\$1,418.00</b>

\*El costo total no incluye el gasto de envío de los componentes.



**Tabla XLII.** Tabla de componentes y costo del módulo de medición de pH y C.E.

<b>No. de Componente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unit. (M.N.)</b>	<b>Total</b>
1	Tarjeta microcontroladora Arduino Mega	1	\$375.00	\$375.00
2	Tarjeta reloj de tiempo real DS3231	1	\$0.00	\$0.00
3	“Display” - Pantalla de cristal líquido LCD	1	\$80.00	\$80.00
4	Teclado numérico matricial plano 4x4	1	\$45.00	\$45.00
5	Sensor analógico de pH	1	\$1,100.00	\$1,100.00
6	Sensor analógico de conductividad eléctrica con sensor de temperatura	1	\$3,150.00	\$3,150.00
7	Batería portátil USB de 5v, 1 Amp., 1000 mAh	1	\$250.00	\$250.00
8	Caja plástica 18 x 6.5 x 11 cm	1	\$120.00	\$120.00
9	Insumos varios: cables, resistencias, soldadura, placas, pines, entre otros	1	\$100.00	\$100.00
10	5 soluciones de calibración de pH 4.01 y 5 soluciones de calibración de pH 6.86	1	\$262.00	\$262.00
			<b>Total*</b>	<b>\$5,482.00</b>

\*El costo total no incluye el gasto de envío de los componentes.

### 7.4.3. Costo de Soluciones Nutritivas

En la Tabla XLIII se muestra el costo en pesos mexicanos de las SN usadas para los distintos tratamientos de fertilización. El cálculo del costo de 20 litros de SN para cada fertilizante se obtiene de la cantidad recomendada por el fabricante para hortalizas de hoja en el caso de Triple 19 y Fertiplus, para el caso de Hoagland se utilizó una concentración del 100 %. El costo más elevado pertenece a Hoagland mientras que el más económico a Triple 19. La presentación de Hoagland comercial puede utilizarse para 5 ciclos de cultivo de 20 litros de agua, mientras que Fertiplus para 12 y Triple 19 para 50 ciclos. Triple 19 es entonces la SN más económica con un costo de \$0.58 pesos mexicanos y es 12 veces más barata que Fertiplus y hasta 85 veces más barata que Hoagland (Tabla XLIII).

**Tabla XLIII.** Costo de Soluciones Nutritivas comerciales para un cultivo aeropónico de 20 litros.

<b>Soluciones Nutritivas</b>	<b>Presentación</b>	<b>Costo (M.N.)</b>	<b>Costo por modulo (20l)</b>	<b>Cultivos por presentación</b>	<b>Procedencia</b>
Hoagland comercial (g)	163	\$1,500.00	\$ 50.94	5	U.S.A. phytotechlab.com
Fertiplus (ml)	960	\$ 89.00	\$ 7.42	12	La Paz, BCS. The Home Depot
Triple 19 (g)	1000	\$ 28.00	\$ 0.58	50	La Paz, BCS. Fertilizantes Tepeyac

### 7.4.4. Costo aproximado de operación por cultivo

El costo por operación se mide con los kW/h consumidos durante un día multiplicado o medido, si es posible, por el número de días que dure el cultivo. Cada país tiene sus propias tarifas de consumo de electricidad, en México el costo varía según la región del país y el sector al que pertenezca el consumidor, ya sea industrial, comercial o doméstico. Además el costo por kWh/ cambia según el consumo realizado en un periodo de tiempo, es decir en un periodo de 2 meses, los primeros 100 kW/h son más económicos que los siguientes 100 kW/h.

Basándonos en la Tabla XI, si el costo de 1 kW/h es de aproximadamente \$0.85 m.n. en una

tarifa 1E<sup>9</sup> sin subsidio gubernamental de verano, el costo por 24 horas sin importar la frecuencia de irrigación sería de \$0.31 m.n. (0.375 Kw/h). Para este bioensayo, el consumo eléctrico total (de los tres sistemas aeropónicos) fue de aproximadamente 58.5 kW/h lo que equivale a un total de \$49.7 m.n. Adicionalmente, al costo de consumo eléctrico, se añaden 60 litros de agua purificada con un costo de \$120.00 m.n. y \$1.74 m.n. de 60 g de fertilizante Triple 19, dando un total de \$171.44 m.n. por operación de 35 días para tres sistemas aeropónicos.

---

<sup>9</sup>Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 32 grados centígrados.

## 8. DISCUSIÓN

La escasez de agua y el espacio de siembra así como la degradación de los suelos propicios para la producción de alimento, son las mayores limitaciones para la agricultura (FAO, 2001). La agricultura protegida con ambientes controlados, son una solución integral a los problemas anteriormente mencionados en especial si están basados en sistemas aeropónicos (Gopinath *et al.*, 2017); los cuales presentan el mayor ahorro de agua en comparación con otras técnicas de cultivo. De este modo, en el presente trabajo, se creó un sistema aeropónico con una distribución vertical que puede contener 24 plantas en 1 m<sup>2</sup>. Madan *et al.* (2010) reporta un máximo 11 plantas por cada m<sup>2</sup> mientras que Kumar y Mishra (2015) sugiere que para un mayor rendimiento es posible tener hasta 16 plantas por cada m<sup>2</sup> como máximo.

De acuerdo con los autores mencionados, nuestro sistema aeropónico tiene una ventaja considerable para el ahorro de espacio, permitiendo un incremento de entre 12 y 8 plantas por cada m<sup>2</sup>. Existen otros trabajos más especializados como el de Hernández y Piñeros (2013) quienes desarrollaron módulos verticales que permiten la siembra de 112 lechugas; la empresa HydroCycle comercializa modelos con capacidad para 44 plantas en 1 m<sup>2</sup> a un precio de \$820 dls equivalente a \$17,500 pesos mexicanos<sup>10</sup> aproximadamente. En contraste, el precio de nuestro sistema aeropónico en su estructura más simple (sin un sistema automático de monitoreo) tuvo un costo de aproximadamente \$5,500 pesos mexicanos tres veces más económico y además puede ser modificado, reparado, escalado y replicado fácilmente.

Por otro lado, diferentes autores hablan sobre el bajo consumo de insumos de los sistemas de cultivo sin suelos, en los que destaca la aeroponía al ser el sistema más eficiente en el uso del agua (Alshrouf, 2017). Uno de los mayores logros de este trabajo fue realizar cultivos de *Stevia rebaudiana* en los sistemas aeropónicos desarrollados, con un consumo de 20 litros de agua. Los sistemas recirculantes utilizan menos agua que los sistemas abiertos; sin embargo, a lo largo del tiempo la SN queda inservible para el cultivo y es necesario desecharla o aumentar el volumen de agua y reponer los nutrientes necesarios (Lykas *et al.*, 2006). En nuestro bioensayo, no se añadieron nutrientes extras durante el cultivo, pero si se realizó ajuste de pH, tampoco se añadió más agua a los 20 litros iniciales, a pesar del consumo en el sistema y las plantas. Asimismo, Lykas *et al.* (2006) menciona que tarde o temprano será necesario deshacerse de la SN debido a la acumulación de iones, los cuales generan inestabilidad en la composición química y provocan una menor absorción

---

<sup>10</sup>Consultado por última vez en septiembre del 2020, Banco de México.

de nutrientes por las plantas. Conociendo esto, el resultado de nuestro trabajo es prometedor ya que plantea el uso de sólo 20 litros de SN para por lo menos 30 días, sin adición de agua o nutrientes, en un sistema recirculante aeropónico para el cultivo de *Stevia rebaudiana*.

En los últimos años la agricultura se ha apoyado en el uso de la tecnología, tal es el caso de la agricultura de precisión, la agricultura protegida y los ambientes controlados. La detección temprana y diagnóstico de problemas utilizando sistemas de monitoreo inteligente son considerados la mejor herramienta agronómica (Lakhiar, 2018). En la actualidad los ambientes controlados demandan una gran eficiencia para que sean rentables. Se ha demostrado que la eficiencia de las actividades agrícolas en ambientes controlados aumentan con el uso de sistemas inteligentes (Lakhiar *et al.*, 2018). Es por eso que en este trabajo se desarrollaron sistemas automáticos de monitoreo, mediciones e irrigación, siendo la primera etapa de un sistema inteligente. Lakhiar (2018) considera los siguientes sensores en un sistema controlado: sensor de temperatura, sensor de humedad, sensor de intensidad luminosa, sensor de CO<sub>2</sub>, sensor de nivel de agua, sensor de C.E. y de pH. Gopinath *et al.* (2017) y Lakhiar *et al.* (2018) coinciden en la importancia del control y monitoreo de la temperatura, humedad, luz, CO<sub>2</sub>, C.E. y pH, y añaden elementos de importancia para el control automático como, inyectores de ácido y base, inyectores de CO<sub>2</sub>, lamparas para iluminación artificial, ventiladores, calefactores y enfriadores (AC).

Todos los elementos de control antes descritos y recomendados, incrementan el costo y la dificultad de la instalación de manera considerable, de igual modo intensifican el desarrollo y alargan el tiempo del mismo. Es por ello que en el sistema de medición, sólo se han incluido las variables más importantes como la temperatura, la humedad, la iluminancia, la C.E. y el pH; además sólo se incluye la bomba como un elemento controlable y la temperatura de la habitación gracias al sistema de AC. Por su parte Montoya *et al.* (2017) desarrolla un sistema de irrigación y monitoreo automático basado en la plataforma Arduino, con comunicación Wi-Fi entre módulos y conexión a internet. Su sistema incluye sensores de luz, temperatura, humedad, caudal y corriente eléctrica, además de sensores automáticos de C.E. y pH. Para el desarrollo de nuestro sistema automatizado también se utilizó la plataforma Arduino, pero no existe comunicación con el usuario vía WiFi, por el contrario, nuestro sistema de sensado guarda la información en una memoria SD para su posterior consulta y análisis, la ventaja de esta configuración es que abarata los costos del sistema.

Montoya *et al.* (2017) explica que la implementación más complicada fue la de estos últimos sensores, ya que debía medir distintas SN con un solo par de sensores algo que en aplicaciones

comerciales no sucede ya que existe un único reservorio de SN. De igual forma para nuestro trabajo, al existir distintos depósitos para experimentar con distintas SN, se decidió por el uso de un módulo de medición con un par de sensores de pH y C.E., al cual se le instaló una batería, y se le añadió valor agregado al convertirlo en un dispositivo portátil. Es importante resaltar que los sensores de pH y C.E. fueron los más costosos de este trabajo, por lo que al disminuir la adquisición de más sensores se redujo el costo considerablemente.

La luz es uno de los factores más importantes en la vida de la planta, es absorbida por la clorofila para la producción primaria y es el factor que define las variables de crecimiento de ésta, Angelini *et al.* (2018) y Ceunen y Geuns (2013) mencionan que el crecimiento vegetativo de la *Stevia rebaudiana* así como la producción de glucósidos de esteviol, está fuertemente influenciado por el fotoperiodo y los niveles de radiación. La estevia prefiere días largos con 16 horas de luz por 8 de oscuridad; sin embargo, el fotoperiodo crítico para el desarrollo es de 13 horas de luz (Ramírez, 2011). En el presente trabajo las plantas estuvieron expuestas a un fotoperiodo de 13 horas de luz por 11 horas de oscuridad un periodo más corto que el ideal mencionado por estos autores. Sin embargo, fue tiempo suficiente para conocer los posibles cambios en el crecimiento de la planta y las diferencias en luz que presentó el sistema aeropónico. En la caracterización del sistema aeropónico se presentaron diferencias significativas a lo largo de la columna del sistema, donde la parte inferior presenta una menor incidencia de luz con respecto a la parte superior de la columna.

Con el fin de conocer el efecto de estas variantes en el crecimiento de las plantas, éstas se sembraron a lo largo de la columna situando a las plantas más grandes en la parte inferior y a las más pequeñas en la parte superior pensando en que, durante el crecimiento de las plantas, el efecto que cause en ellas pueda verse disminuido. Lo anterior explica las diferencias estadísticas en las variables morfométricas medidas inicialmente entre las secciones de luz, donde las plantas con mayor desarrollo corresponden a la sección inferior al principio del cultivo, donde todavía no existían diferencias significativas por el efecto de las Soluciones Nutritivas (SN). Los resultados interesantes se presentaron en las variables morfométricas medidas al final del experimento, donde se encontraron diferencias significativas por el efecto del uso de las diferentes SN utilizadas y no por el efecto de estar ubicadas en distintas secciones de luz. Lo anterior permite pensar que, la nutrición de las plantas es un factor que compensa probablemente la diferencia del crecimiento entre las plantas más grandes inicialmente, que se colocaron en la parte inferior del sistema y las más pequeñas de la parte superior del mismo. Por lo que, para el desarrollo de estevia el sistema

aeropónico es adecuado con una buena nutrición sin que el factor luz represente una limitante para el crecimiento de las plantas a lo largo de la columna del sistema.

De acuerdo con Ramesh *et al.* (2006) la estevia tolera casi todo tipo de suelos, con pocos nutrientes, ácidos, arenosos y arcillosos; sin embargo, es muy poco tolerante a la salinidad. Esto explicaría por que el aspecto de las plantas era retorcido y menos vigoroso el tratamiento con Fertiplus, ya que esta SN terminó con una salinidad de 4 mS/cm, la cual se encuentra en el límite para cultivos de hoja en sistemas sin suelo. Trejo-Téllez y Gómez-Merino (2012) mencionan que en hidroponía, la C.E. de cada SN depende del cultivo y de las condiciones ambientales, pero propone un rango generalizado que va de 1.5 mS/cm a 2.5 mS/cm. Jensen y Collins (1985) y Tanji (1990) establecen que el límite de C.E., para plantas sensibles es de 1.4 mS/cm, para plantas moderadamente sensibles de 3.0 mS/cm, y para plantas moderadamente tolerantes y altamente tolerantes de 6.0 mS/cm y 10.0 mS/cm, respectivamente. En este punto, la SN Triple 19 presentó una C.E. de 2.5 mS/cm al final del cultivo; por lo que podemos concluir que la SN Triple 19 resultó favorable para la producción de plantas sensibles a la salinidad, como el caso de la *Stevia rebaudiana*.

Katayama *et al.* (1976) determinaron que el contenido de nutrientes en hojas secas de *Stevia rebaudiana* es de 1.4 % N, 0.3 % P, y 2.4 % K. Asimismo, diversos autores establecen una relación similar en la nutrición de la planta con niveles más altos en N y K y menores en P, (Ramírez, 2011; Angelini *et al.*, 2018; Brandle *et al.*, 1998). Estos mismos autores mencionan que los requerimientos nutricionales del cultivo de estevia van de bajos a moderados. Particularmente Ramesh *et al.* (2006) y (Goenadi, 1987) establecen niveles más altos de K en comparación con N y bajos de P, obteniendo buenos resultados. Este balance de nutrientes donde  $K > N > P$  está presente en la SN Hoagland. Adicionalmente, la SN Hoagland tiene todos los micronutrientes a diferencia de las SN Fertiplus y Triple 19; por estas razones la SN Hoagland fue elegida como control para este trabajo.

Aunque las plantas con Hoagland presentaron los valores mayores de crecimiento, al analizar la relación entre el desarrollo de la parte aérea de la planta con respecto a la raíz, la relación con la biomasa seca y fresca tanto de raíz (PFR, PSR), así como de la relación de la parte aérea (PFA, PSA), a través de los índices de crecimiento, se encontraron resultados interesantes respecto al uso de las SN comerciales.

El índice PSA/PSR, muestra la relación entre la biomasa seca de la parte aérea (PSA) y la biomasa seca de la raíz (PSR), el resultado de este índice demostró que la mayor traslocación de carbohidratos hacia la parte aérea, se presentó en la SN Triple 19 seguida de la SN Fertiplus. Los

mismos resultados se observaron al analizar el índice PSA/PST, este índice indica la inversión de carbono en la producción de hojas y tallo (PSA) con respecto al total de la planta (PST), en este caso las plantas bajo tratamiento de la SN Triple 19 seguidas de la SN Fertiplus tuvieron una mayor producción de tallo y hojas que las de la solución Hoagland (Kang y van Iersel, 2004). Del mismo modo, el contenido de humedad determinado por los índices PSA/PFA y PSR/PFR presentaron su mayor promedio bajo el tratamiento con la SN Triple 19, este resultado sugiere que dicha SN permite una mejor absorción de agua por parte de la planta en comparación con las otras SN. Esto es importante ya que uno de los aspectos relevantes de este estudio es la búsqueda de insumos de menor costo y más accesible a los productores, como lo es el caso del Triple 19 y Fertiplus, que presentaron una mayor producción de la parte aérea de la planta, siendo ésta la parte más importante a nivel comercial, por ser la parte útil para sus distintos usos. Mientras que la solución Hoagland tiene un costo de \$51 m.n. por cultivo (20 litros), la SN Fertiplus tienen un costo de \$7.50 m.n. y la SN Triple 19 un costo de \$0.60 m.n., este último hasta 80 veces más barato que Hoagland, lo que permite al productor pensar en el uso de fertilizantes comerciales para el cultivo de estevia en el sistema aeropónico.

Autores como Jarma *et al.* (2010) reportan el crecimiento de plantas cultivadas en experimentos donde las temperaturas ambientales promedio máximas es de 34.68°C y mínima de 23.28°C, mientras que Fronza y Folegatti (2003) reportan el desarrollo de estevia en un intervalo de temperaturas entre los 20 y 30°C, alcanzando los 35°C en algunos días. Angelini *et al.* (2018) coincide en que las áreas óptimas para el crecimiento de estevia son las que presentan temperaturas entre los 25 y 35°C, que prefiere los días soleados o parcialmente nublados y en particular climas cálidos y soleados. En el presente trabajo la mayor temperatura registrada en el cuarto de cultivo durante el desarrollo del cultivo fue de 31.2 °C con una mínima de 17 °C; en el compartimento vertical de las raíces se registró en promedio un máximo de 29 °C y un mínimo de 17.5 °C. Por lo que la mayor temperatura registrada concuerda con los experimentos de los autores citados, a diferencia de la temperatura mínima que está ligeramente por debajo. Esto demuestra que las plantas de *Stevia rebaudiana* pueden tolerar temperaturas más bajas que las ya reportadas. También sugiere que el rendimiento del cultivo en este experimento, pudo verse afectado por la temperatura baja presentada en los periodos nocturnos.

Inicialmente se presentan diferencias significativas en el Peso Fresco Total (PFT) y la Longitud de Tallo (LT) con respecto al factor de temperatura; para ambas variables el mayor desarrollo se



presenta en la parte baja del sistema (menor temperatura), y va disminuyendo conforme aumenta la temperatura en las partes altas del sistema. Sin embargo, es importante considerar al igual que cuando se discutió el factor luz, las características de las variables morfométricas de las plantas existen debido a la distribución de las mismas en las diferentes secciones. No obstante, las diferencias para estas variables en los datos morfométricos finales fueron más evidentes para los tratamientos de fertilización, que para los datos de las diferentes secciones de temperatura. Es decir, el efecto de la temperatura se diluyó en el tiempo de crecimiento de las plantas.

A pesar de ello, el Peso Fresco de la Raíz (PFR) y el Peso Seco de la Raíz (PSR) no presentaron diferencias significativas en el inicio del cultivo por efecto de las diferentes temperaturas; sin embargo, sí presentaron diferencias significativas al final del cultivo. Para ambas variables, el mayor peso de la raíz se presentó en la sección más alta y con la mayor temperatura, y fue disminuyendo con respecto a secciones más bajas.

Los resultados de las variables morfométricas finales del presente trabajo coinciden con los de otras especies, como especies con metabolismo C3 que tienden disminuir su crecimiento a altas temperaturas (Yamori *et al.*, 2014). Especies como los rosales encuentran una mejor respuesta en la fotosíntesis y por lo tanto, en el crecimiento de los mismos en temperaturas más bajas que altas de acuerdo con Ushio *et al.* (2008). Dentro de las variables morfométricas finales la producción de la parte aérea de la planta es una de las variables de mayor interés, ya que la hoja es el principal órgano útil de la planta. Los análisis morfométricos como era de esperarse son iguales a los obtenidos cuando se considera como factor de variación las secciones de luz. Aunque el Peso Fresco de la parte Aérea (PFA) de la planta presentó la mayor producción utilizando la SN Hogland. La relación entre la parte aérea de la planta con respecto al desarrollo de la raíz fue mayor para los tratamientos que utilizaron SN Triple 19 y SN Fertiplus. Por lo que, la producción de *Stevia rebaudiana* en un sistema sin suelo, puede realizarse con el uso de este tipo de SN comerciales sin sacrificar significativamente la producción de la parte aérea de interés comercial. Por otro lado, las temperaturas presentadas a lo largo del cultivo y sus diferencias a lo largo de la columna del sistema no afectaron considerablemente el desarrollo del cultivo muy probablemente por la nutrición proporcionada y por lo que mencionan Jarma *et al.* (2010), Fronza y Folegatti (2003), y Angelini *et al.* (2018), las temperaturas presentadas a lo largo del desarrollo del cultivo fueron buenas y cercanas a los límites, así como las variaciones de temperatura a lo largo del sistema no sobrepasan más de 2 °C desde su punto más bajo hasta el más alto. Lakhiar (2018) menciona que aún en sistemas aeropónicos contro-

lados el crecimiento de las plantas es influenciado principalmente por las condiciones ambientales, las variables climáticas, la cantidad de agua y los fertilizantes utilizados. Se ha demostrado que en este trabajo las diferentes condiciones ambientales de luz y temperatura observadas a lo largo de la columna vertical de cultivo, tienen una influencia despreciable en comparación con el efecto causado por las Soluciones Nutritivas.

## 9. CONCLUSIONES

La conclusión más significativa de este trabajo es la factibilidad de cultivar *Stevia rebaudiana* en un sistema aeropónico obteniendo buenos resultados, por lo que se puede deducir que la aeroponía es una alternativa al cultivo de *Stevia rebaudiana* en sistemas tradicionales.

Se mantuvo un cultivo de *Stevia rebaudiana* por 35 días sin recambio de agua y utilizando 20 litros por cada 24 plantas; pero es probable que al continuar más días con el cultivo, sea necesario un ajuste en la SN o incluso su recambio. Durante el cultivo, no se utilizó pesticidas de ninguna clase; sin embargo, con una duración más larga o al exponer el cultivo a condiciones no controladas es posible que sea necesario su uso, en especial fungicidas de aplicación foliar.

Se caracterizó la evolución de distintas Soluciones Nutritivas en sus parámetros químicos y se concluyó que, Hoagland es bastante estable en su comportamiento por lo que requiere poca atención y presenta buenos resultados de crecimiento; sin embargo, tiene un costo bastante elevado en comparación con las SN comerciales. Por su parte Fertiplus requiere una mayor atención debido a la necesidad de un ajuste de pH recurrente y su alto incremento de C.E., por lo que no se recomienda para su uso como SN en sistemas recirculantes. Finalmente, Triple 19 es una buena alternativa para su uso como SN, presentando una baja C.E. y una baja necesidad de ajuste de pH.

La SN Hoagland tiene los promedios más grandes en las variables morfométricas para el área foliar y la biomasa fresca. No existen diferencias significativas en los tratamientos Hoagland y Triple 19; sin embargo, Hoagland es 80 veces más caro que Triple 19.

Para lograr lo anterior descrito, se diseñaron y construyeron 3 sistemas aeropónicos de baja presión y de bajo costo, que pueden contener 24 plantas en 1 m<sup>2</sup> cada uno. En afinidad con los módulos aeropónicos, se desarrolló tecnología agrícola con software y hardware libre de bajo costo, lo cual permite su fácil modificación y mejoramiento.

Para esta primera etapa de automatización, se desarrolló un módulo de medición de temperatura, humedad y luminosidad, que guarda la información en formato “csv” en una memoria microSD. Se desarrolló un módulo de irrigación automática de bajo costo, el cual se programa a través de una interfaz humano-computadora amigable. Se desarrolló un módulo de medición de pH y C.E. portátil de bajo costo.

Al caracterizar los sistemas aeropónicos implementados, se determinó que existe una correlación negativa relativamente alta de -0.87 entre la humedad y la temperatura dentro del compartimento

vertical del sistema, con una  $r^2$  de 0.77.

Asimismo, se observó que aunque existan diferencias en la temperatura y la iluminancia a lo largo del compartimento vertical de los sistemas aeropónicos, ninguna de estas variables afecta de manera considerable el crecimiento de las plantas. En nuestro bioensayo se demostró que las mayores variaciones en las variables morfométricas, así como de los índices de crecimiento y contenido de humedad, fueron originadas por las SN y no por efecto de las variaciones de temperatura o de iluminancia.

Finalmente, se concluyó que es posible el cultivo de *Stevia rebaudiana* en un sistema aeropónico vertical aún con la existencia de variaciones de luz y temperatura a lo largo de la columna de cultivo.

## 10. LITERATURA CITADA

- Alshrouf A. 2017. Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming. *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci.* 27:247–255.
- Angelini LG, Martini A, Passera B, Tavarini S. 2018. Cultivation of *Stevia rebaudiana* Bertoni and associated challenges. In: JM Mérillon, KG Ramawat, editores. *Sweeten. Pharmacol. Biotechnol. Appl.. phytochemistry. capítulo Biology and cultivation.* Cham, Suiza: Springer. p. 35–85.
- Basuki, Sumaryono. 1990. Effects of black plastic mulch and plant density on the growth of weeds and stevia. *BIOTROP Spec. Publ.* 1:107–113.
- Brandle JE, Starratt AN, Gijzen M. 1998. *Stevia rebaudiana*: Its agricultural, biological, and chemical properties. *Can. J. Plant Sci.* 78:527–536.
- Caicedo WG, Jijón DE. 2016. Incidencia de la densidad de siembra en la producción de semilla de papa (*Solanum tuberosum* L) variedad superchola en el sistema aeropónico, en la granja experimental Yuyucocha, Caranqui, Ibarra, Ecuador. [Tesis de licenciatura]. Universidad Técnica del Norte.
- Carter WA. 1942. A method of growing plants in water vapor to facilitate examination of roots. *Phytopathology* 32:623–625.
- Castillo J. 2016. Estudio de factibilidad para el desarrollo de la agricultura de precisión en México. In: 67th Int. Astronaut. Congr. Guadalajara, México. p. 26.
- CEDRSSA. 2018. Oportunidades para la agricultura en México: La estevia. Reporte técnico. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Ciudad de México.
- Ceunen S, Geuns JM. 2013. Influence of photoperiodism on the spatio-temporal accumulation of steviol glycosides in *Stevia rebaudiana* (Bertoni). *Plant Sci.* 198:72–82.
- Chuecos M, Mejía V, San Roman G MC. 2011. Sistema aeropónico y sistema organopónico, para la producción de semilla pre-básica de papa (*Solanum Tuberosum*) variedad papa blanca holandesa, en el municipio Libertador Edo. Mérida. 2011. *Rev. Cient. Juv.* IX-X:149–179.
- Durán JM, Martínez E, Navas LM. 2000. Los cultivos sin suelo: de la hidroponía a la aeroponía. *Cultiv. intensivos* :40–43.

- Durán S, Rodríguez MdP, Córdón K, Record J. 2012. Estevia (*Stevia rebaudiana*), edulcorante natural y no calórico. Rev. Chil. Nutr. 39:203–206.
- Fernandez-Quintanilla C. 2002. Agricultura de precisión. In: Ciencia y Medio Ambiente. segundas jornadas científicas sobre medio ambiente del ccma-csic. Madrid, España: CSIC - Centro de Ciencias Medioambientales (CCMA). p. 187–194.
- Fronza D, Folegatti MV. 2003. Water consumption of the estevia (*Stevia rebaudiana* (Bert.) Bertoni) crop estimated through microlysimeter. Sci. Agric. 60:595–599.
- Giuffré L, Romaniuk R, Ciarlo EA. 2013. Stevia, Ka'a He'e, wild sweet herb from South America - An overview. Emirates J. Food Agric. 25:746–750.
- Goenadi DH. 1987. Effect of slope position on the growth of stevia in Indonesia. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 18:1317–1328.
- Gopinath P, Vethamoni PI, Gomathi M. 2017. Aeroponics soilless cultivation system for vegetable crops. Chem. Sci. Rev. Lett. 6:838–849.
- Goyal SK, Samsher, Goyal RK. 2010. Stevia (*Stevia rebaudiana*) a bio-sweetener: A review. Int. J. Food Sci. Nutr. 61:1–10.
- Gupta E, Purwar S, Sundaram S, Rai GK. 2013. Nutritional and therapeutic values of *Stevia rebaudiana*: A review. J. Med. Plants Res. 7:3343–3353.
- Gutierrez A, Bermejo P. 2015. Bioquímica, farmacología y toxicología de *Stevia rebaudiana* Bertoni. [Tesis de maestría]. Universidad Complutense.
- Hernández CJ, Piñeros JS. 2013. Diseño de un prototipo de un sistema de producción tipo aeropónico. [Ingeniería de producción]. Universidad EAN.
- Janarthanan K, Theviyanthan K, Najath F, Ahamed I. 2017. Cyberponics – A fully automated greenhouse system.
- Jarma A, Carranza C, Clavijo J. 2010. Captación y uso de la radiación en plantas de estevia (*Stevia rebaudiana* Bert.) en el Caribe colombiano. Agron. Colomb. 28:37–46.

- Jensen MH, Collins WL. 1985. Hydroponic Vegetable Production. 1. Tucson, Arizona, USA: AVI Wishing CO.
- Kang JG, van Iersel MW. 2004. Nutrient solution concentration affects shoot: root ratio, leaf area ratio, and growth of subirrigated salvia (*Salvia splendens*). HortScience 39:49–54.
- Karu T. 2017. High precision farming system based on aeroponics. [Tesis de maestría]. Tallinn University of Technology.
- Katayama O, Sumida T, Hayashi H, Mitsuhashi H. 1976. The practical application of Stevia and research and development data. Reporte técnico. I.S.U. Company. Tokyo, Japan.
- Kawatani T, Kaneki Y, Tanabe T. 1977. On the cultivation of Kaa He-e (*Stevia rebaudiana* Bertoni) - The seed germination with special reference to the optimum temperature and lighth sensitivity. Japanisse J. Trop. Agric. 20 (3):137–142.
- Kawatani T, Kaneki Y, Tanabe T. 1980. On the cultivation of Kaa He-e (*Stevia rebaudiana* Bertoni) - Response of kaa he-e to phosporus fertilization rates and to the three major elements of fertilizer. Japanisse J. Trop. Agric. 24 (2):54–61.
- Kumar P, Mishra PK. 2015. Stevia Cultivation: Scope of remunerative venture to farmers. Pop. Kheti 3:28–32.
- Lakhari IA. 2018. Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system. J. Sensors 2018:1–18.
- Lakhari IA, Gao J, Syed TN, Chandio FA, Buttar NA. 2018. Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. J. Plant Interact. 13:338–352.
- Leiva FR. 2003. La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista. Memorias VIII Congr. la Soc. Colomb. Fitomejoramiento y Prod. Cultiv. :8.
- Lowenberg-DeBoer J. 2003. Precision Farming or Convenience Agriculture. In: Solut. a better Environ. 11th Aust. Agron. Conf. Geelong, Victoria: Australian Society of Agronomy. p. 10.
- Lykas C, Katsoulas N, Giaglaras P, Kittas C. 2006. Electrical conductivity and pH prediction in a recirculated nutrient solution of a greenhouse soilless rose crop. J. Plant Nutr. 29:1585–1599.

- Madan S, Ahmad S, Singh GN, Kohli K, Kumar Y, Singh R, Garg M. 2010. *Stevia rebaudiana* (Bert.) Bertoni - A review. Indian J. Nat. Prod. Resour. 1:267–286.
- Martínez M. 2015. *Stevia rebaudiana* ( Bert .) Bertoni. Una revisión. Cultiv. Trop. 36:5–15.
- Martínez-Peñaloza PA. 2013. Aeroponía como método de cultivo sostenible, rentable e incluyente en Bogota D.C., Colombia. [Tesis de licenciatura]. Universidad Piloto de Colombia.
- Montoya AP, Obando FA, Morales JG, Vargas G. 2017. Automatic aeroponic irrigation system based on Arduino's platform. J. Phys. Conf. Ser. 850.
- Ochoa Duarte AG, Forero Pachón AM, Cangrejo Aljure LD. 2018. Actualidad y tendencias de la agricultura de precisión - Present and trends f precision agriculture in the twenty-first century. Univ. Nac. Colomb. 1:0–14.
- Ramesh K, Singh V, Megeji NW. 2006. Cultivation of Stevia [*Stevia rebaudiana* (Bert.) Bertoni]: A Comprehensive Review. Adv. Agron. 89:137–177.
- Ramírez G. 2011. Paquete tecnológico Estevia (*Stevia rebaudiana*) Establecimiento y mantenimiento. Reporte técnico. SAGARPA. Mocochoá, Yucatán.
- Ramírez G, Avilés WI, Moguel YB, Góngora SF, May C. 2011. Estevia (*Stevia rebaudiana*, Bertoni), Un cultivo con potencial productivo en México. Reporte técnico. SAGARPA. Mérida, Yucatán, México.
- Salvador-Reyes R, Sotelo-Herrera M, Paucar-Menacho L. 2014. Study of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) as a natural sweetener and its use in benefit of the health. Sci. Agropecu. 5:157–163.
- Tanji KK. 1990. Agricultural salinity assessment and management. 2. New York, USA: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino F. 2012. Nutrient solutions for hydroponic systems. Hydroponics - A Stand. Methodol. Plant Biol. Res. .
- Ushio A, Mae T, Makino A. 2008. Effects of temperature on photosynthesis and plant growth in the assimilation shoots of a rose. Soil Sci. Plant Nutr. 54:253–258.

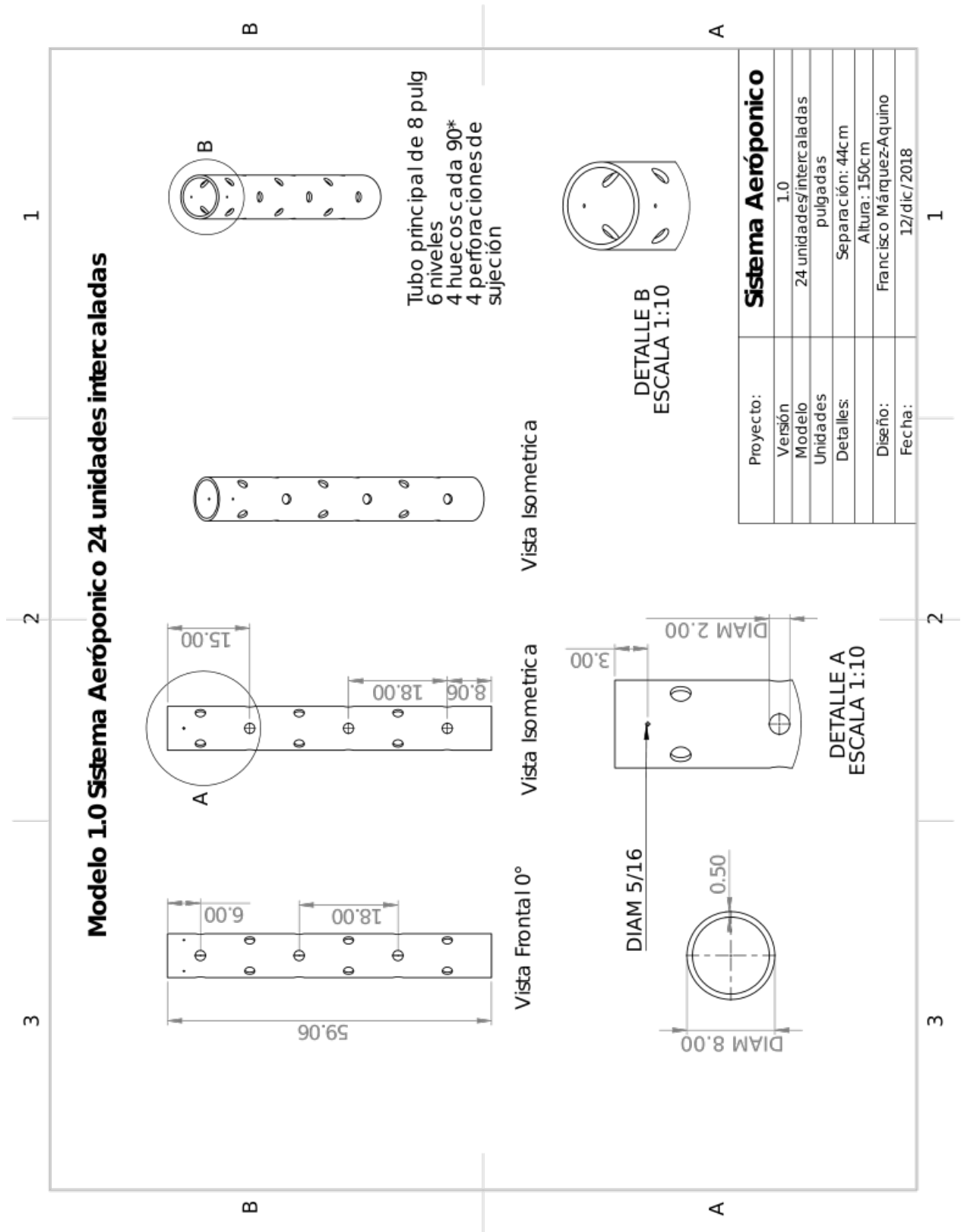


Utumi MM, Monnerat PH, Pereira PRG, Fontes PCR, De Godinho VPC. 1999. Macronutrient deficiencies in Stevia: visual symptoms and effects on growth, chemical composition, and stevioside production. *Pesq. agropec. bras.* 34:1039–1043.

Yamori W, Hikosaka K, Way DA. 2014. Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: Temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynth. Res.* 119:101–117.

11. ANEXOS

A. Planos de construcción del módulo aerónico para 24 plantas

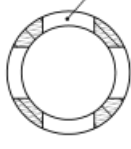
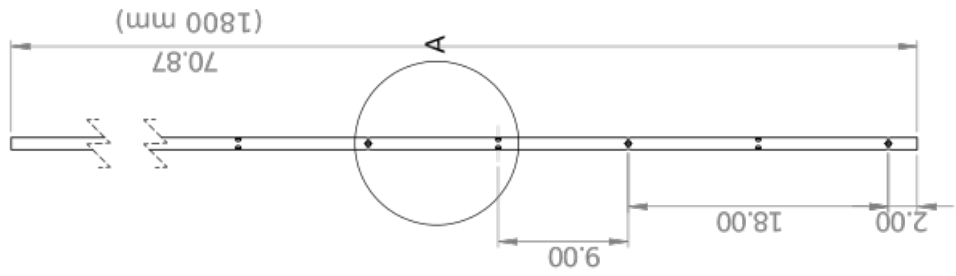


# Tubo para aspección interna 1 pulg cedula 4 - longitud 180 cm

1

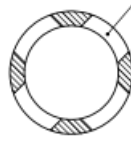
2

3



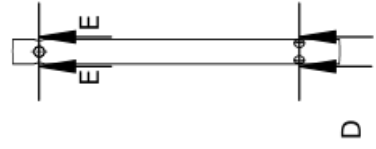
SECCIÓN E-E  
ESCALA 1:1

Perforación 9.1 mm  
Tamaño de aspersor



SECCIÓN D-D  
ESCALA 1:1

4 perforaciones por nivel  
6 Niveles cada 9 pulg.  
Perforaciones rotadas cada 45°



DETALLE A  
ESCALA 1:5

A

A

B

B

Proyecto:	<b>Sistema Aerónico</b>
Versión:	1.0
Modelo:	24 unidades/intercaladas
Unidades:	pulgadas
Detalles:	Separación: 44cm Altura: 150cm
Diseño:	Francisco Márquez-Aquino
Fecha:	12/dic/2018

1

2

3

## B. Formulación del medio Murashige Skoog

### FORMULACIÓN: Murashige-Skoog (MS)

*Murashige T. and Skoog F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. Physiol. Plant. 15:473:497*

#### 1. Composición

<b>Constituyentes inorgánicos (mg/l)</b>			
Nitrato de potasio	KNO <sub>3</sub>	1900	
Nitrato de amonio	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1650	
Cloruro de calcio dihidratado	CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	440	
Sulfato de magnesio heptahidratado	MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	370	
Fosfato de potasio monobásico	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	170	
Sulfato ferroso heptahidratado	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	27.8	
Etilendiaminotetracetato disódico	Na <sub>2</sub> EDTA · 2H <sub>2</sub> O	37.3	
Sulfato de manganeso tetrahidratado	MnSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	22.3	*
Sulfato de zinc heptahidratado	ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	8.6	
Acido bórico	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	6.2	
Yoduro de potasio	KI	0.83	
Molibdato de sodio dihidratado	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.25	
Cloruro de cobalto hexahidratado	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.025	
Sulfato cúprico pentahidratado	CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.025	

<b>Constituyentes orgánicos (mg/l)</b>			
Myo-Inositol		100	
Glicina		2.0	
Tiamina · HCl		0.1	
Piridoxina · HCl		0.5	
Acido nicotínico		0.5	
Sacarosa		30000	

<b>Especificaciones adicionales</b>			
pH: 5.8			
Agar 0.8%			
* empleamos MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O (16.9 mg/l)			