

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

Eficiencia hídrica y productiva de tres sistemas de producción vertical con distintos grados de tecnificación, y su influencia en el crecimiento y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa*).

Adriana Vanessa Rodríguez Soto
B66121

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO
CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA

2023

Eficiencia hídrica y productiva de tres sistemas de producción vertical con distintos grados de tecnificación, y su influencia en el crecimiento y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa*).

Adriana Vanessa Rodríguez Soto

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO
CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA



Dr. Freddy Soto Bravo

DIRECTOR DE TESIS



M. Sc. Gustavo Quesada Roldán

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Lic. Carlos Huertas Blanco

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



M. Sc. Sísigo Acuña Chinchilla

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Dr. Luis Gómez Alpizar

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Lic. Adriana Rodríguez Soto

SUSTENTANTE

Dedicatoria

Este proyecto quiero dedicárselo a mi yo adolescente, que tuvo una crisis vocacional por mucho tiempo y a pesar de todo se aventuró en esta área muy emocionada, pero sobre todo con mucho miedo de haberse equivocado.

A mi yo universitaria, que semestre tras semestre demostró su testarudez y constancia, su amor por entender de donde proviene todo y su fuerza de voluntad cuando ya no tenía fuerzas físicas.

A todas las versiones de mi persona a través de los años les digo:

¡Estoy orgullosa de nosotras, lo logramos!

Agradecimientos

Agradezco profundamente haber tenido tantas personas ayudándome de alguna forma durante este proyecto, espero no olvidar a nadie.

Primeramente, mi familia, que siempre estuvieron para mí ayudándome en todo lo que podían. Quiero agradecer especialmente a mi mamá, quien me ayudó muchísimo con las lechugas, por creer en mí y apoyarme completamente desde que inicie la carrera.

A mi tutor Freddy Soto, gracias por brindarme la confianza y permitirme desarrollar mi tesis en un tema que me apasiona y siempre estar anuente a ayudar en lo que pudiera.

A los trabajadores de la EEFBM, Don Julio y Luis Oreamuno, por escucharme en mis momentos de estrés, por ayudarme en la instalación y diseño del sistema, darme su opinión y retroalimentación constante.

A Gustavo Quesada, Carlos Huertas y Sisgo Rachith, les agradezco su colaboración como parte del comité asesor, desde las revisiones del trabajo hasta ayudarme en mis problemas durante la ejecución del mismo.

A los profesores Alexis Villalobos y María Isabel Gonzáles Lutz, por haberse reunido conmigo en muchas ocasiones para explicarme cosas aún sin ser parte del comité asesor. Muchísimas gracias por todo el apoyo.

A Melissa Aguzzi, por ser de las personas más atentas e interesadas en el bienestar de los estudiantes, definitivamente la salud mental es crucial en este proceso y le agradezco inmensamente su preocupación por todos nosotros.

A mi novio, con quien compartí todos los años de carrera, las desveladas estudiando, los trabajos en equipo y por supuesto por haber estado ahí para mí durante los altos y bajos de este trabajo.

Quiero agradecer a mis amigos de la carrera, por todos los recuerdos y por toda la ayuda brindada en estos años y en este proyecto.

Gracias a todos los profesores y personas que de una forma u otra han sido parte de este proceso vocacional y me han ayudado a llegar donde estoy.

Índice General

| | |
|---|----|
| Dedicatoria..... | 1 |
| Agradecimientos..... | 4 |
| Índice de cuadros..... | 7 |
| Índice de figuras..... | 8 |
| Resumen..... | 10 |
| 1. Introducción..... | 11 |
| 2. Objetivos..... | 13 |
| 2.1 Objetivo General..... | 13 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 13 |
| 3. Revisión de literatura..... | 14 |
| 3.1 Importancia del cultivo de lechuga en Costa Rica..... | 14 |
| 3.2 Sistemas de producción vertical..... | 14 |
| 3.3 Sistemas de producción vertical en comparación a sistemas convencionales..... | 15 |
| 3.4 Sustratos en sistemas de producción vertical..... | 16 |
| 3.5 Comportamiento agronómico de lechuga en sistemas de producción vertical..... | 16 |
| 3.6 Rendimiento de lechuga en sistemas de producción vertical..... | 17 |
| 3.7 Evapotranspiración..... | 18 |
| 3.8 Eficiencia en el Uso del Agua..... | 18 |
| 3.9 Parámetros de riego en sistemas de producción vertical..... | 19 |
| 3.10 Metodología de presupuestos parciales..... | 20 |
| 3.11 Presupuestos parciales en sistemas de producción vertical..... | 21 |
| 3.12 Contexto nacional en sistemas de producción vertical..... | 22 |
| 4. Materiales y métodos..... | 23 |
| 4.1 Sitio experimental..... | 23 |
| 4.2 Material vegetal experimental..... | 25 |
| 4.3 Descripción del experimento y tratamientos..... | 25 |
| 4.3.1 Sistema de manga colgante (1-MC)..... | 26 |
| 4.3.1.1 Ensamblaje de la manga colgante..... | 26 |
| 4.3.2 Pared vertical con malla geotextil (2-MG)..... | 27 |
| 4.3.2.2 Ensamblaje malla geotextil..... | 28 |
| 4.3.3 Sistema “Green Wall” (3-SG)..... | 28 |

| | |
|--|----|
| 4.3.3.3 Ensamblaje sistema “Green Wall” | 29 |
| 4.4 Sistema del cultivo | 29 |
| 4.5 Sistema de riego | 33 |
| 4.6 Diseño experimental..... | 35 |
| 4.7 Variables de respuesta | 36 |
| 4.7.1 Caracterización del crecimiento..... | 36 |
| 4.7.2 Eficiencia en el uso del agua..... | 37 |
| 4.7.2.1 Evapotranspiración del cultivo (ETc) | 38 |
| 4.7.3 Estudio de costos | 39 |
| 4.8 Análisis estadísticos de datos | 41 |
| 5. Resultados | 42 |
| 5.1 Comportamiento agronómico..... | 42 |
| 5.1.1 Rendimiento fresco | 45 |
| 5.2 Parámetros de riego | 49 |
| 5.2.1 Evapotranspiración del cultivo (ETc)..... | 53 |
| 5.2.2 Eficiencia en el uso del agua | 54 |
| 5.3 Estudio de costos | 55 |
| 6. Discusión..... | 58 |
| 7. Conclusiones | 64 |
| 8. Recomendaciones | 65 |
| 9. Bibliografía..... | 66 |
| Anexos..... | 74 |

Índice de cuadros

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Características físicas del sustrato fibra de coco utilizado. | 30 |
| Cuadro 2. Concentración de nutrientes y conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva utilizada en el cultivo de lechuga..... | 31 |
| Cuadro 3. Duración, frecuencia de riego y volumen de riego aplicado a cada unidad experimental y tratamiento a lo largo del primer ciclo del cultivo de lechuga. | 34 |
| Cuadro 4. Duración, frecuencia de riego y volumen de riego aplicado a cada unidad experimental y tratamiento a lo largo del segundo ciclo del cultivo de lechuga..... | 35 |
| Cuadro 5. Eficiencia en el uso del agua en los tratamientos de manga colgante (1-MC), malla geotextil (2-MG) y sistema “Green Wall” (3-SG) del segundo ciclo de producción del cultivo de lechuga var. BG. | 55 |
| Cuadro 6. Costo variable total por tratamiento. | 55 |
| Cuadro 7. Ingreso total por tratamiento en ambos ciclos de producción. | 56 |
| Cuadro 8. Beneficio neto de campo de cada tratamiento..... | 56 |
| Cuadro 9. Análisis de dominancia para cada tratamiento experimental. | 56 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Imagen satelital del invernadero en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, La Garita, Alajuela. El recuadro en rojo indica el área donde se realizó la investigación..... | 24 |
| Figura 2. Humedad relativa (máxima, mínima y promedio) reportada durante los meses de octubre-diciembre del 2021 en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno. | 24 |
| Figura 3. Temperatura promedio del aire reportada durante los meses de octubre-diciembre del 2021 en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno..... | 24 |
| Figura 4. Integral de radiación solar diaria (DLI) dentro del invernadero de hortalizas, reportada durante los meses de octubre-diciembre del 2021..... | 25 |
| Figura 5. Distribución de siembra de las lechugas var. BG en el sistema de mangas colgantes. Alajuela 2021..... | 26 |
| Figura 6. Distribución de siembra de la lechuga americana var. BG en el tratamiento 2-MG. Alajuela 2021..... | 28 |
| Figura 7. Distribución de siembra del sistema de producción vertical “Green Wall”. Alajuela 2021. | 29 |
| Figura 8. Contenido de partículas sólidas y curva de desorción de agua: aire que muestra los porcentajes de humedad volumétrica (θ) y de capacidad de aireación a diferentes valores de potencial mátrico (ψ_m); y contenidos de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible, en el sustrato de fibra de coco. Alajuela 2021. | 31 |
| Figura 9. Contenido de humedad volumétrica A) inicial y B) final en el sustrato del tratamiento 1-MC durante el segundo ciclo de producción..... | 32 |
| Figura 10. Contenido de humedad volumétrica A) inicial y B) final en el sustrato del tratamiento 2-MG durante el segundo ciclo de producción | 32 |
| Figura 11. Contenido de humedad volumétrica A) inicial y B) final en el sustrato del tratamiento 3-SG durante el segundo ciclo de producción..... | 33 |
| Figura 12. Diseño experimental en un arreglo factorial de bloques, con la distribución de los tratamientos manga colgante (1-MC), malla geotextil (2-MG), sistema “Green Wall” (3-SG) en sus respectivos bloques. Alajuela 2021. | 36 |
| Figura 13. Número de hojas por planta de lechuga en los tratamientos de manga colgante, malla geotextil y sistema “Green Wall” según su estrato vertical (inferior o superior) durante el primer ciclo de producción. Alajuela 2021..... | 42 |
| Figura 14. Altura de planta de lechuga en los tratamientos de manga colgante, malla geotextil y sistema “Green Wall” según su estrato vertical (inferior o superior) durante el primer ciclo de producción. Alajuela 2021..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 15. Número de hojas por planta de lechuga en los tratamientos de manga colgante, malla geotextil y sistema “Green Wall” según su estrato vertical (inferior o superior) durante el segundo ciclo de producción. Alajuela 2021..... | 44 |
| Figura 16. Altura de planta de lechuga en los tratamientos de manga colgante, malla geotextil y sistema “Green Wall” según su estrato vertical (inferior o superior) durante el segundo ciclo de producción. Alajuela 2021..... | 45 |
| Figura 17. Rendimiento fresco de lechuga en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción. Alajuela 2021..... | 46 |
| Figura 18. Peso seco (g) por planta de lechuga en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción. Alajuela 2021..... | 46 |
| Figura 19. Peso fresco (g) de hojas de lechuga en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción. Alajuela 2021..... | 47 |
| Figura 20. Peso fresco (g) del tallo de lechuga en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción. Alajuela 2021..... | 48 |
| Figura 21. Índice de Área Foliar (IAF) en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción, con su respectivo error estándar. Alajuela 2021..... | 48 |
| Figura 23. Conductividad eléctrica en el A) sustrato y B) drenaje de los distintos tratamientos durante el primer ciclo de producción. La línea punteada en rojo indica el rango óptimo para el cultivo de lechuga. Alajuela 2021. | 50 |
| Figura 24. pH del A) sustrato y B) drenaje de los distintos tratamientos durante el primer ciclo de producción. La línea punteada en rojo indica el rango óptimo para el cultivo de lechuga. Alajuela 2021. | 51 |
| Figura 25. Conductividad eléctrica del A) sustrato y B) drenaje de los distintos tratamientos durante el segundo ciclo de producción. La línea punteada en rojo indica el rango óptimo para el cultivo de lechuga. Alajuela 2021..... | 52 |
| Figura 26. pH del A) sustrato y B) drenaje de los distintos tratamientos durante el segundo ciclo de producción. La línea punteada en rojo indica el rango óptimo para el cultivo de lechuga. Alajuela 2021. | 53 |
| Figura 27. Evapotranspiración del cultivo (ETc) de lechuga durante el segundo ciclo de producción en los distintos tratamientos. Alajuela 2021..... | 54 |

Resumen

La hidroponía vertical surge como una alternativa viable ante el cambio climático, el incremento de la población y la disminución de tierras con fines agrícolas, ya que tiene como objetivos incrementar la eficiencia de uso de los recursos y obtener mayores rendimientos por área (Anda et al., 2017, Benke et al., 2017, Kalantari et al., 2017).

A pesar de existir diversos modelos en el mercado, en Costa Rica no se ha realizado investigación sobre hidroponía vertical, a pesar de las múltiples ventajas que presenta dicha tecnología, por ello, esta investigación busca generar información del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) en sistemas hidropónicos verticales, con el objetivo de analizar la eficiencia hídrica y productiva de los tres sistemas evaluados.

La investigación se realizó en el invernadero de hortalizas de la EEFBM, durante dos ciclos consecutivos. Los tratamientos evaluados fueron el sistema de manga colgante (1-MC), malla geotextil (2-MG) y sistema “Green Wall” (3-SG), se trabajó con la variedad BG de lechuga. Se evaluaron características del comportamiento agronómico tales como número de hojas, altura de planta, IAF, peso fresco total de la planta, del tallo y hojas, así como el peso seco total. Se evaluaron parámetros en el manejo del riego, como porcentaje de drenaje, pH y conductividad eléctrica (CE) del sustrato y del drenaje, además de la evapotranspiración, para obtener la eficiencia en el uso del agua (EUA) durante el segundo ciclo de producción. Finalmente se realizó un estudio de costos utilizando la metodología de presupuestos parciales.

Los resultados obtenidos demostraron que durante ambos ciclos de producción el sistema 1-MC obtuvo los mejores resultados en todas las variables evaluadas del comportamiento agronómico, EUA, y el estudio de costos. Durante el segundo ciclo de producción las lechugas del sistema 2-MG tuvieron el menor desarrollo y rendimiento en comparación a los demás sistemas. Esto pudo deberse a un aumento en la concentración de sales durante el segundo ciclo, poco sustrato por planta, además de altas temperaturas y las características propias del material que ocasionaron poca agua disponible para las plantas.

Se concluyó que es factible la producción de lechuga comercializable en los tres sistemas de producción vertical, sin embargo, es crucial controlar aquellos factores que pueden limitar el rendimiento, como los mencionados anteriormente.

1. Introducción

El cultivo de lechuga ha presentado un aumento en su consumo a través de los años, siendo la tercera hortaliza más consumida por los costarricenses con un consumo per cápita de 4,8 kg semanales (Granados et al. 2021), lo que a su vez ha generado que ocupe un lugar económico importante dentro del mercado nacional. Además, es uno de los cultivos más producidos en sistemas hidropónicos con rendimientos promedios de 50 336 kg ha⁻¹ (Censo Nacional Agropecuario, 2014).

La agricultura convencional enfrenta una serie de retos que atentan contra su sostenibilidad, tales como; el cambio climático, el incremento en la población, el crecimiento de las ciudades y la reducción de tierra disponible para fines agrícolas (Kodmany, 2018). A pesar de esto, la oferta de alimentos no puede disminuir ante una población creciente; al contrario, se estima que para el 2050 será necesario aumentar los rendimientos en un 70% (Muñoz et al. 2019).

Para esto se necesita un replanteamiento de los sistemas productivos convencionales, con el fin de maximizar los rendimientos por área y aumentar la resiliencia de los sistemas (Zabel et al. 2019).

Ante tales circunstancias la hidroponía vertical surge como una alternativa viable, ya que tiene como objetivos incrementar la eficiencia de uso de los espacios urbanos, optimizar los recursos, obtener mayores rendimientos por área, disminuir pérdidas de productividad por factores ambientales, mantener una producción constante todo el año, generar nuevas oportunidades de empleo y reducir costos de logística de los productos (Anda et al., 2017, Benke et al., 2017, Kalantari et al., 2017).

Diversos países han impulsado el desarrollo de la hidroponía vertical. Por ejemplo, en Estados Unidos, Japón y Holanda se utiliza en ambiente de interior y en condiciones asépticas, donde la iluminación es suministrada por fuentes artificiales y la aplicación de agroquímicos es nula. Con la finalidad de obtener un incremento en los rendimientos en comparación a los sistemas tradicionales (Anda et al., 2017, Kalantari et al., 2017).

En países como Bolivia y Ecuador se han realizado estudios sobre hidroponía vertical en módulos de mangas colgantes y tubos PVC, en condiciones de exterior con luz natural, los

cuales revelaron rendimientos superiores a los sistemas convencionales en el cultivo de fresa y acelga (Degenhart, 2016, Ibadango, 2017).

A nivel nacional, los sistemas de producción vertical que se utilizan son: el modelo de manga colgante para la siembra de cultivos de hoja (Soto, 2015) y el sistema “Green Wall” el cual está específicamente diseñado para la producción bajo este sistema. Así mismo, existen empresas de jardinería vertical que utilizan una malla geotextil con compartimentos para colocar las plantas ornamentales sobre una pared o estructura y crear diversos diseños (Acuña, 2019).

El presente estudio se enfocó en el análisis de los sistemas del módulo de manga colgante (1-MC), la malla geotextil (2-MG) y el sistema “Green Wall” (3-SG). Dichos sistemas se seleccionaron ya que son de las pocas opciones que ofrece el mercado costarricense para hidroponía vertical.

A pesar de existir estos modelos en el mercado, en Costa Rica no se ha realizado investigación sobre hidroponía vertical, a pesar de las múltiples ventajas que presenta dicha tecnología, por ello, resulta imprescindible su estudio y validación para una implementación exitosa.

Por tanto, esta investigación busca generar información del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) en sistemas hidropónicos verticales, con el objetivo de analizar la eficiencia hídrica y productiva de los tres sistemas evaluados.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar la eficiencia hídrica y productiva de tres sistemas de producción vertical como una alternativa para la producción de lechuga hidropónica (*Lactuca sativa var.BG*).

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el crecimiento del cultivo de lechuga hidropónica var. BG en tres sistemas de producción vertical, para la cuantificación del potencial productivo en términos de rendimiento fresco por área.
- Estimar parámetros del manejo del riego en tres sistemas de producción vertical de lechuga hidropónica para la determinación de la eficiencia hídrica de cada sistema.
- Elaborar un estudio de costos de cada sistema de producción vertical, para el análisis del costo/beneficio de cada tratamiento.

3. Revisión de literatura

3.1 Importancia del cultivo de lechuga en Costa Rica

A nivel nacional el 33,79% de la producción en ambiente protegido se refiere a sistemas hidropónicos, donde un alto porcentaje está dedicado a la producción de cultivos de hoja. En el caso de lechuga se reportan más de 2 000 fincas en todo el territorio nacional dedicadas a la producción de dicha hortaliza. La provincia con la mayor cantidad de área sembrada es Cartago con un total de 516 ha, y área cosechada de 491 ha (Censo Nacional Agropecuario, 2014).

Así mismo, la lechuga es una hortaliza de suma importancia por su alto valor nutritivo, al aportar minerales como hierro, potasio, calcio y vitamina A, B y C (Tapia, 2016). Razón por la cual muchos países han desarrollado información sobre este cultivo.

3.2 Sistemas de producción vertical

A nivel mundial, existe una preocupación latente con respecto al abastecimiento de alimentos en aras de una población creciente y una disminución de suelos agrícolas. En función a esto, se han tomado diversas medidas para aumentar los rendimientos haciendo un uso más eficiente de los recursos, y Costa Rica no puede ser la excepción.

En el caso de Cuba, se ha implementado varios cambios para obtener soberanía alimentaria, entre ellos se encuentran los sistemas de producción urbanos. Este progreso agrario surgió como una necesidad de producir sus propios alimentos debido a conflictos políticos (Herrera, 2009).

A diferencia de Cuba, otros países como Estados Unidos, Japón y Holanda (Anda et al., 2017, Kalantari et al., 2017) han reforzado su seguridad alimentaria ante el cambio climático y el incremento de la población en zonas urbanas, por lo que han incursionado en investigación con huertas urbanas e hidroponía vertical, ya que son sistemas que se adaptan a espacios reducidos y permiten un mayor aprovechamiento del área (Godoy, 2015).

Los sistemas hidropónicos verticales han despertado el interés de diversas profesiones, por ejemplo, agrónomos, arquitectos, diseñadores de interiores, ingenieros eléctricos, entre otros, ya que son sistemas que permiten la participación de diversos oficios (Gomar, 2020, Muñoz et al., 2020).

En Colombia, los arquitectos (Muñoz et al. 2020) y el diseñador de interiores (Vintimilla 2013), han diseñado sistemas hidropónicos verticales para fortalecer el concepto de ciudades sostenibles, además de evaluar diferentes materiales y sustratos en su utilización. Los resultados indicaron que la fibra de coco fue el sustrato con los mejores resultados tanto en humidificación como con el peso. Así mismo, mantiene un pH estable (5,5 - 6,5), lo que es ideal para una amplia variedad de cultivos.

3.3 Sistemas de producción vertical en comparación a sistemas convencionales

Para conocer si los sistemas de producción vertical permiten obtener mejores resultados en su rendimiento en comparación a los sistemas convencionales, es necesario realizar estudios donde se evalúen ambos modelos de forma simultánea, igualando las condiciones ambientales. Al respecto, Ibadango (2017) comparó la eficiencia y rentabilidad en el cultivo de fresa en un sistema hidropónico vertical en mangas colgantes y otro convencional en suelo. El estudio demostró que la hidroponía vertical presentó los mejores resultados en porcentaje de prendimiento y sobrevivencia a la cosecha, número de fresas, rendimiento y calidad de frutos, con excepción de los grados brix.

Así mismo, Meoño (2018) desarrolló un prototipo de agricultura vertical controlado con tecnología avanzada y lo comparó con un sistema convencional a campo abierto. Se evaluó el crecimiento del cultivo en términos de número de hojas, largo y diámetro de tallo y peso seco de hojas y raíces. Los cultivos evaluados fueron chipilín (*Crotalaria longirostrata*), yerba mora (*Solanum americanum* Mill.), amaranto (*Amaranthus hybridus* L.), remolacha (*Beta vulgaris* var. *esculenta*), puerro (*Allium ampeloprasum* var. *porrum*), cebollín (*Allium schoenoprasum*), espinaca (*Spinacia oleraceae*), acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), lechuga romana (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*), lechuga amarilla (*Lactuca sativa* var. *capitata*) y lechuga morada (*Lactuca sativa* var. *capitata*). La estructura vertical se

conformó de tres módulos construidos en Policloruro de Vinilo (PVC) con iluminación Light Emitting Diode (LED) y condiciones controladas de temperatura, riego, humedad relativa y ventilación. Entre los resultados obtenidos, se encontró que el ciclo de producción de los cultivos se redujo a la mitad en comparación al sistema convencional de campo abierto. Además, los rendimientos del sistema de agricultura vertical bajo condiciones controladas fueron superiores al sistema convencional, debido a una mayor densidad de plantas, mayor precocidad y condiciones de luz, temperatura y riego óptimas para el crecimiento del cultivo.

3.4 Sustratos en sistemas de producción vertical

Investigadores del área de agroalimentarias han realizado diversos estudios para generar información agronómica en sistemas verticales. La FAO (2003) determinó que las mangas colgantes presentan rendimientos equiparables a los sistemas convencionales en especies de trasplante como fresa, perejil, lechuga y plantas ornamentales de porte reducido, siempre y cuando se disminuya el componente más pesado del sustrato y se aumente la proporción del material más liviano que favorece la retención de humedad.

Esta información concuerda con las investigaciones realizadas por López (2016) y Wortman et al. (2016), ambos trabajos evaluaron las características hidro-físicas de distintos tipos de sustratos en sistemas de cultivo vertical. López (2016) encontró que aquellos sustratos con componente de fibra de coco de 30% a 90% presentaron características favorables en cuanto a peso, facilidad de manipulación, retención de agua, aireación, pH y salinidad. Estos resultados fueron respaldados por Wortman et al. (2016) quienes observaron que el mejor sustrato para el desarrollo de la fresa fue la mezcla de fibra de coco con perlita o vermiculita.

3.5 Comportamiento agronómico de lechuga en sistemas de producción vertical

En el cultivo de lechuga, Tapia (2016) demostró que la producción de esta hortaliza en un sistema NFT vertical presentó mejores características agronómicas que en el módulo NFT horizontal. En el sistema vertical se presentó una mayor altura de planta (38,75 cm) que

el NFT Horizontal (28,75 cm). Así mismo, el sistema NFT vertical tuvo un promedio superior de hojas (26 hojas), que el sistema horizontal (20 hojas). Al evaluar el rendimiento, el sistema NFT Vertical obtuvo un peso de planta de 754 g, siendo superior al NFT Horizontal que obtuvo 474 g.

Otra investigación realizada en Ecuador por Zambrano (2014), comparó el comportamiento agronómico de tres variedades de lechuga en un sistema NFT horizontal con un sistema NFT vertical y de raíz flotante, donde evaluó las variables de número de hojas, altura de planta y rendimiento. Los resultados mostraron que el NFT horizontal presentó el mayor promedio de número de hojas por planta (26 hojas), en comparación al sistema de raíz flotante (22 hojas) y NFT vertical (19 hojas). En altura de planta, el sistema NFT horizontal tuvo un resultado superior (33 cm) al NFT vertical (29 cm), sin embargo, se determinó que el sistema vertical obtuvo los mejores resultados en altura de planta ya que todas las variedades tuvieron el mismo comportamiento. Entre las conclusiones se tuvo que el sistema vertical se diferencia de los demás sistemas al utilizar menor espacio de suelo y producir más por metro cuadrado.

De igual forma, Pérez (2021) evaluó en Ecuador un sistema aeropónico vertical con tres variedades de lechuga. El objetivo de dicha investigación fue evaluar las características agronómicas del cultivo, tales como número de hojas y altura de planta. Entre los resultados obtenidos se observó un número promedio de 18 hojas y una altura promedio de 17,5 cm a los 30 días después del trasplante de la variedad Mimosa. Los datos del número de hojas son consecuentes con los obtenidos por Zambrano (2014), sin embargo, la altura promedio es inferior a la reportada por dicho autor.

3.6 Rendimiento de lechuga en sistemas de producción vertical

Un parámetro importante para evaluar los sistemas verticales es el rendimiento por área. Al respecto, Touliatos et al. (2016) compararon la producción de un sistema vertical cilíndrico contra uno horizontal a una densidad de 20 plantas por módulo, con un volumen de sustrato similar. El sistema vertical obtuvo un menor rendimiento (3,8 kg), comparado con el sistema horizontal (5,5 kg), probablemente debido a que en los estratos medio e

inferior del sistema vertical se obtuvo un 43% menos de peso fresco que en el estrato superior producto de una menor luminosidad. Se concluyó que el sistema vertical es una alternativa viable para maximizar la eficiencia del uso del espacio, produciendo más cultivo por unidad de área, sin embargo, es necesario implementar luz artificial para mitigar el gradiente de fotones observado (Touliatos et al. 2016).

En otra investigación realizada por Zambrano (2014) se evaluó el rendimiento en peso fresco de tres variedades de lechuga en un sistema NFT horizontal, NFT vertical y de raíz flotante. Entre los resultados obtenidos, se observó que el peso fresco de la parte aérea del sistema NFT horizontal (31 g), fue estadísticamente superior a los sistemas de raíz flotante y NFT vertical que presentaron 28 y 27 g planta⁻¹ respectivamente. Sin embargo, el peso m⁻² fue superior en el sistema NFT vertical con 1434 g, ya que los sistemas NFT horizontal y de raíz flotante presentaron valores de 1035 y 474 g m⁻² respectivamente.

3.7 Evapotranspiración

Por otro lado, en los sistemas verticales pueden evaluarse parámetros de riego para hacer un uso más eficiente del recurso hídrico. Entre los factores a tomar en cuenta se encuentra la evapotranspiración, el cual es un proceso donde ocurre la evaporación y la transpiración de forma simultánea. La proporción de estos procesos en un cultivo varía según sus fases de desarrollo y factores físicos que pueden afectar la evapotranspiración, por ejemplo: la radiación solar, temperatura del agua y del aire, el viento, humedad relativa y la disponibilidad del agua en el suelo o sustrato (Ayuso, 2016).

3.8 Eficiencia en el Uso del Agua

Si en un sistema hidropónico se desea incrementar la Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) es necesario reducir la evapotranspiración del cultivo (ETc) sin generar pérdidas en el rendimiento. Se define la EUA como el volumen de agua que las plantas necesitan consumir (evapotranspirar) para incorporar a su biomasa una determinada cantidad de

carbono proveniente de la atmósfera. En otras palabras, la planta más eficiente en el uso de agua es la que produce más materia (C) por g de agua transpirado (Fernández, 2005).

Por lo tanto, estimar la EUA se ha convertido en una necesidad para garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico. Existen tres factores que influyen en la optimización de este recurso; el almacenamiento del agua en el suelo, la uniformidad del riego y la pérdida de este recurso desde su aplicación (Rivera, 2020).

3.9 Parámetros de riego en sistemas de producción vertical

Se han realizado diversas investigaciones en diferentes cultivos en temas de riego, Cardozo et al. (2018), consideran que los sistemas verticales presentan un riego distintivo que requiere de técnicas y tecnologías específicas para lograr una buena distribución del agua, por lo que determinaron el coeficiente de jardín (K_j), el cual permite cuantificar las necesidades hídricas del sistema para el manejo del riego. Para ello, utilizaron una metodología basada en el balance hídrico y las ecuaciones propuestas por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (E_{To}) y la evapotranspiración del jardín (E_T).

Sin embargo, se concluyó que el consumo hídrico en cada jardín es único y depende de diferentes factores tales como el microclima, el sustrato, el sistema de riego, orientación y ubicación de las estructuras y especies vegetales. Ayuso (2016) obtuvo las mismas conclusiones al determinar el consumo hídrico de un jardín vertical utilizando un lisímetro de pesada, indicando que el consumo de agua en dicho sistema es muy variable, ya que depende de diversos factores tales como temperatura, humedad, luminosidad, tipo de sistema, material vegetal, entre otros. Ambos estudios sugieren que debido a los múltiples factores que inducen a la variabilidad en el consumo hídrico del cultivo, es importante considerar la E_{Tc} y el drenaje para ajustar el riego a las condiciones específicas de cada sistema.

Un estudio realizado en Brasil (Pereira et al. 2018) tuvo como objetivo evaluar la evapotranspiración acumulada en el cultivo de lechuga en invernadero. Los tratamientos fueron cuatro niveles de riego diferentes, donde los porcentajes corresponden al total de la evapotranspiración ($W_1=62,5\%$, $W_2=75\%$, $W_3=87,5\%$ y $W_4=100\%$). Se evaluó la producción de materia fresca y seca, el número de hojas y el área de hoja. Entre los resultados

se observó que el promedio de la cantidad total de agua que una planta de lechuga evapotranspiró en un periodo de 23 días fue de 3,6 y 2,3 kg en los tratamientos W1 y W4, respectivamente. Lo anterior demostró que las plantas con riego deficitario (W1, W2 y W3) tuvieron mayor evapotranspiración que aquellas sin déficit (W4). Con respecto a las mediciones agronómicas realizadas, se evidenció que conforme aumenta la evapotranspiración la producción de biomasa también aumentan. Al ser el tratamiento W4 el que presentó una menor evapotranspiración acumulada, sus variables de producción presentaron los valores más bajos.

Tavares et al. (2018), evaluaron la evapotranspiración, el coeficiente del cultivo y la eficiencia en el uso del agua (EUA) durante verano, invierno y otoño en un sistema vertical. Entre los datos de evapotranspiración diaria se encontró que durante el verano se obtuvo el promedio más alto con 4,62 mm, evidenciando un mayor requerimiento de agua en comparación a invierno y otoño. El rendimiento y la EUA presentaron una disminución durante el verano, como resultado de la alta temperatura del aire, obteniendo valores promedio de 6,3 kg L⁻¹ en la EUA.

Un estudio realizado en México por Defilipis et al. (2014), tuvo como objetivo evaluar la EUA en el cultivo de lechuga producida en invernadero con el fin de determinar la respuesta del cultivo a un riego del 50%, 75% y 100%. Se observó una mayor producción de materia fresca en los tratamientos con menor aporte hídrico, obteniendo resultados de 52 g L⁻¹, 35,6 g L⁻¹ y 26,2 g L⁻¹ respectivamente.

3.10 Metodología de presupuestos parciales

Para recomendar y promover los sistemas de producción vertical no basta con realizar estudios agronómicos para conocer cómo se desarrolla el cultivo. Es importante realizar investigaciones que indiquen la viabilidad económica de estos sistemas a corto y largo plazo.

La metodología de presupuestos parciales se utiliza con el fin de obtener los beneficios de tratamientos diferentes, sin embargo, es una metodología que no incluye todos los costos de producción. Únicamente toma en cuenta los que varían de un tratamiento a otro y están

relacionados con insumos como agua de riego, mano de obra, materiales necesarios para su instalación, fertilizantes, equipos, entre otros (CIMMYT, 1988).

Al utilizar dicha metodología es necesario realizar un análisis de dominancia, el cual compara los costos variables y los beneficios netos de cada tratamiento. Este análisis le permite al productor conocer el incremento requerido en los costos para lograr un determinado incremento en sus beneficios netos y conocer sus ganancias (Reyes, 2001). Los tratamientos seleccionados en el análisis de dominancia son llamados “no dominados”, y los tratamientos “dominados” son excluidos de los análisis posteriores. El tratamiento dominado es aquel que ante un incremento en sus costos no ocurre un aumento en los beneficios netos (Reyes, 2001).

3.11 Presupuestos parciales en sistemas de producción vertical

Un estudio realizado en Bolivia (Cochi, 2017) implementó el enfoque de presupuestos parciales en mangas colgantes sembradas con fresa. Se consideró que económicamente el cultivo vertical en mangas colgantes genera ingresos a partir de los 90 días de cosecha.

La investigación realizada por Zambrano (2014) desarrolló la metodología de presupuestos parciales en los tres tratamientos, NFT horizontal, NFT vertical y de raíz flotante en el cultivo de lechuga. En el total de costos variables el sistema NFT vertical fue el más alto con un valor de USD 129,75 módulo^{-1} y el de raíz flotante el más barato con un costo de USD 39 módulo^{-1} . Además, en los beneficios netos los saldos son negativos en los tres sistemas, indicando que el costo no se paga con la primera ni con la segunda cosecha. A pesar de estos resultados, el análisis económico indicó que el mejor sistema es el NFT vertical, ya que logra aprovechar mejor el espacio de suelo y por ende producir más por metro cuadrado.

En otro caso contrario, el trabajo realizado por Tapia (2016), donde se evaluó un sistema NFT vertical contra un sistema NFT horizontal en el cultivo de lechuga mostró un mayor costo variable en el sistema NFT vertical con un valor de USD 43 m^{-2} , mientras que el sistema NFT horizontal tuvo un costo de USD 24 m^{-2} . Ambos tratamientos reflejan valores negativos en sus beneficios netos, ya que las primeras producciones no cubren el costo de la

inversión. Se estima que hasta en la cuarta cosecha se empezarán a generar ganancias, sin embargo, el sistema NFT horizontal presentó el mejor beneficio neto según la metodología de presupuestos parciales.

3.12 Contexto nacional en sistemas de producción vertical

A nivel nacional no se han realizado investigaciones utilizando sistemas hidropónicos verticales, sin embargo, el mercado ofrece varias opciones para las personas interesadas en producir bajo estos modelos, entre los que se encuentran el de manga colgante de polietileno, el cual permite depositar el sustrato de interés, otorgándole la altura deseada a la manga. Este sistema suele ser utilizado para sembrar apio, cebollino, fresa, perejil, hierbas aromáticas y ornamentales (Soto, 2015). También está disponible el sistema “Green Wall” originario de Portugal, el cual está específicamente diseñado para la producción vertical, ya que, al tener partes ensamblables, se pueden establecer los niveles de siembra que se deseen. Cada nivel de producción posee un drenaje independiente, por lo que no se produce un gradiente de humedad y se disminuye la dispersión de patógenos.

Por otro lado, en proyectos de jardinería vertical es común la utilización de malla geotextil como material de anclaje y soporte para las plantas, ya que permite un óptimo desarrollo radicular y foliar, sin embargo, su uso se ha limitado únicamente a plantas ornamentales.

Actualmente, el único estudio realizado a nivel nacional sobre jardines verticales tuvo como objetivo evaluar los beneficios de la implementación de dichos jardines en edificaciones urbanas como alternativa ecológica. Se evaluaron las concentraciones de CO₂, temperatura y humedad relativa de la habitación en la cual se encontraba el jardín y se encontró que dicha estructura permitió estabilizar la temperatura y la humedad relativa a lo largo del día, no obstante, su potencial en disminución de la temperatura es mínimo. En cuanto a la concentración de CO₂ logró una disminución del 25%, aumentando la calidad del aire (Acuña, 2019).

4. Materiales y métodos

4.1 Sitio experimental

La investigación se realizó en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno (EEFBM), de la Universidad de Costa Rica, ubicada en La Garita, Alajuela, Costa Rica (Figura 1) ($10^{\circ}00'23.10''$ N y $84^{\circ}15'58.07''$ O), a una altitud de 840 m.s.n.m. y valores de precipitación anuales de 1940 mm, humedad relativa promedio del 78% (Figura 2) una temperatura promedio de 22°C (Figura 3) y valores de radiación solar diaria (DLI) mayormente entre $8 - 15 \text{ mol m}^2 \text{ día}^{-1}$ (Figura 4) durante el periodo de evaluación de este estudio.

El estudio se llevó a cabo durante los meses de octubre hasta diciembre del 2021 en un invernadero tipo multitúnel de hierro galvanizado con cubierta de polietileno transparente ($200 \mu\text{m}$) y malla anti-insectos (43 mesh) en las paredes, formado por cuatro naves de 9,6 m de ancho y 50 m de largo, altura de 6 m a la cumbre y 4 m a la canoa, con orientación en dirección este-oeste. La ventilación es pasiva en las paredes laterales combinada con apertura automatizada de ventanas cenitales según temperatura, velocidad del viento e intensidad de lluvia monitoreados con sensores.



Figura 1. Imagen satelital del invernadero en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, La Garita, Alajuela. El recuadro en rojo indica el área donde se realizó la investigación.

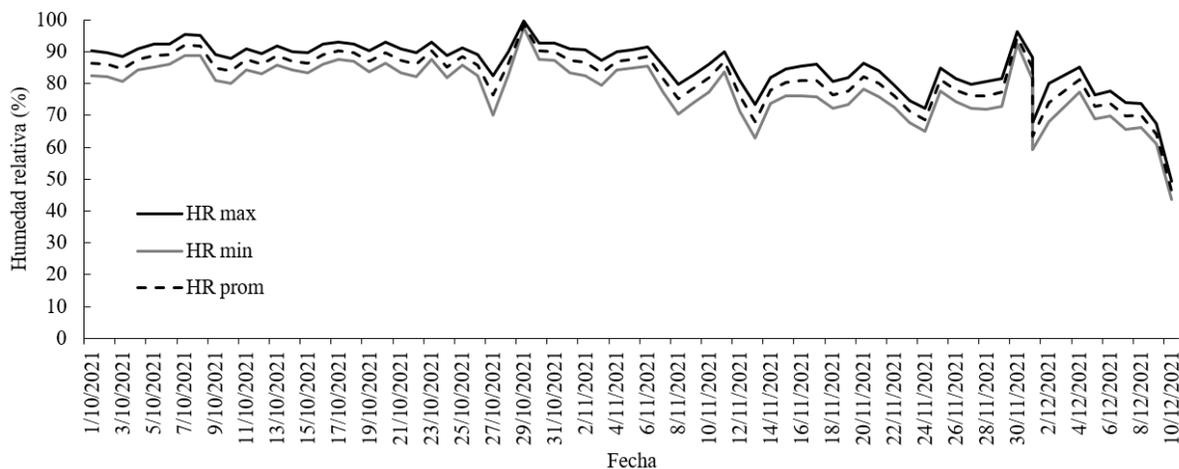


Figura 2. Humedad relativa (máxima, mínima y promedio) reportada durante los meses de octubre-diciembre del 2021 en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno.

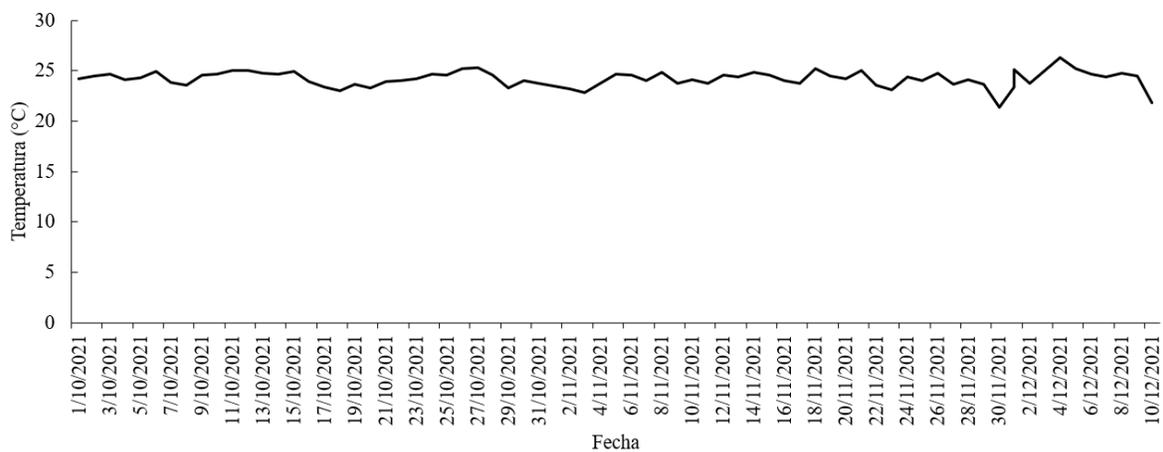


Figura 3. Temperatura promedio del aire reportada durante los meses de octubre-diciembre del 2021 en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno.

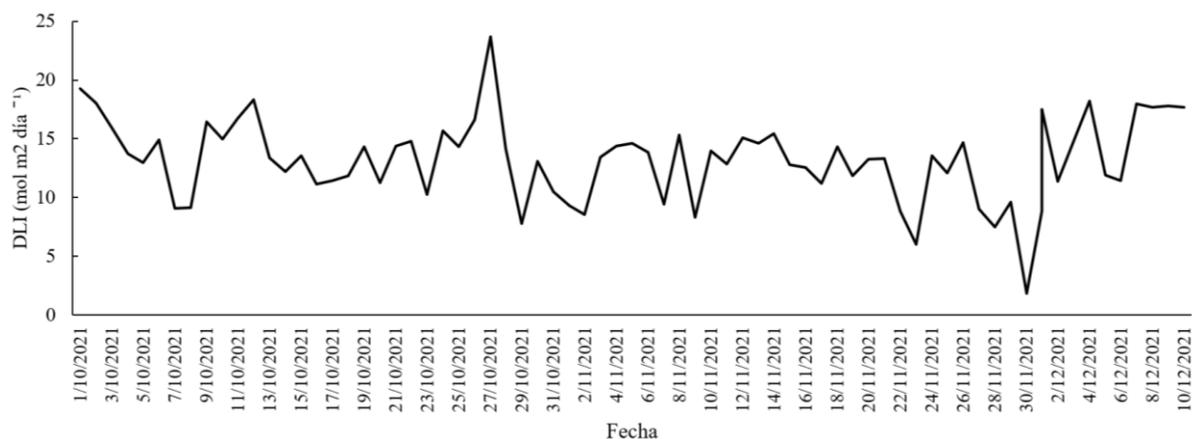


Figura 4. Integral de radiación solar diaria (DLI) dentro del invernadero de hortalizas, reportada durante los meses de octubre-diciembre del 2021.

4.2 Material vegetal experimental

Se utilizaron plántulas de lechuga tipo americana var. BG (Bergam's Green), que se caracteriza por tener un crecimiento uniforme, un ciclo del cultivo de cinco a seis semanas y un peso promedio de 450 g a la cosecha. Además, presenta una gran adaptabilidad a distintas condiciones climáticas, tanto en época seca como lluviosa. Es un material de hoja abierta que no forma cabeza, lo cual favorece el control de plagas y enfermedades.

4.3 Descripción del experimento y tratamientos

En este proyecto se evaluaron tres sistemas de producción hidropónica vertical con diferente nivel tecnológico en función a su estructura, durante dos ciclos consecutivos de siembra. Los sistemas de producción vertical utilizados fueron:

- Producción en mangas colgantes (1-MC).
- Producción en malla geotextil (2-MG)
- Producción “Green Wall” (3-SG).

4.3.1 Sistema de manga colgante (1-MC)

El sistema de producción de manga colgante presenta el menor nivel tecnológico, compuesto de sacos (mangas) colgantes de polietileno color negro en su interior y blanco externo, con una longitud de 1,6 m y un diámetro aproximado de 80 cm

A lo largo de la manga colgante se colocaron ocho niveles de producción con una distribución de cultivo en “zig zag”, sembrando tres plantas por nivel para un total de 24 lechugas por manga colgante, y un área total de siembra por módulo de 1,05 m² (Figura 5).

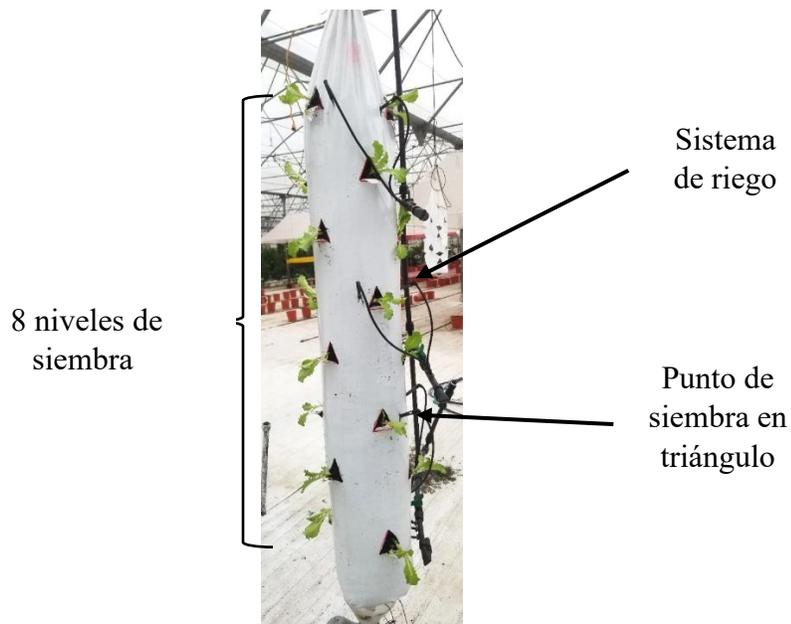


Figura 5. Distribución de siembra de las lechugas var. BG en el sistema de mangas colgantes. Alajuela 2021.

4.3.1.1 Ensamblaje de la manga colgante

En primer lugar, se midió que el tubo para mangas hidropónicas tuviera una longitud de 1,6 m, una vez verificado, se procedió a cortar la manga y realizar un nudo en la parte inferior para sellar y evitar la pérdida de sustrato.

Se depositaron 55 L de sustrato de fibra de coco, procurando rellenar en su totalidad el volumen de la manga. Una vez alcanzada la altura requerida se realizó otro nudo en la parte superior para sellar ambos extremos.

Se trazaron y marcaron los puntos de siembra en la manga en una distribución en “zigzag”, iniciando con los puntos de siembra en el primer nivel en forma ascendente a 10 cm de altura de la base de la manga. En cada sitio de siembra se trazó un triángulo con una altura de 5 cm manteniendo una distancia entre niveles de 10 cm. Con un cúter se cortaron los triángulos trazados, dejando únicamente la base sin cortar para que sirviera como apoyo de las plántulas. En cada uno de los sitios de siembra se sembró una planta de lechuga.

4.3.2 Pared vertical con malla geotextil (2-MG)

El sistema 2-MG utilizó un geotextil diseñado para cultivos verticales (proporcionado por la empresa Plántica), soportado sobre una estructura de hierro galvanizado de 0,5m de ancho x 2m de alto (Figura 6). El sistema tiene la ventaja que permite ubicar los puntos de siembra según la distancia deseada para el cultivo. En cada unidad se establecieron 10 filas de plantas separadas a 20 cm unas de otras, dejando 2,5 cm de borde. En cada fila se sembraron tres plantas espaciadas a 15 cm, para un total de 30 lechugas por unidad de cultivo y un área por módulo de 1 m².



Figura 6. Distribución de siembra de la lechuga americana var. BG en el tratamiento 2-MG. Alajuela 2021.

4.3.2.2 Ensamblaje malla geotextil

Para el montaje de la malla se utilizó una estructura de hierro negro, que consistió en marcos de 0,5 m de ancho y 1 m de alto. Se unieron dos marcos atornillados, uno encima de otro para obtener un marco de 2 m de altura. Posterior a esto, se colocó alambre a lo ancho del marco con el fin de dar soporte trasero al geotextil.

Se procedió a medir y cortar los geotextiles (dejando 10 cm de más a cada lado) para luego coserlo a los bordes del marco de hierro galvanizado. Una vez realizado esto, se engrapó un segundo geotextil sobre el primero, en el cual se definieron los puntos de siembra de cada planta.

Finalmente, se cortó con cúter una línea superior de cada espacio de siembra, para depositar 1 L de sustrato de fibra de coco por compartimento donde se sembró una planta por sitio.

4.3.3 Sistema “Green Wall” (3-SG)

El sistema de producción “Green Wall” consiste en una estructura vertical especialmente diseñada para huertas verticales (proporcionado por la empresa Agroverde). Fue diseñado por Paula Magessi (Minigarden, s.f). Se conforma por piezas de tres potes ensamblables tipo lego hechas a base de polipropileno copolímero con protección UV (Figura 7). Para la realización de este proyecto se empleó un módulo de seis niveles de cultivo, con tres plantas por nivel; para un total de 18 lechugas, y un área por módulo de 1,05 m². Se usó fibra de coco como sustrato.



Figura 7. Distribución de siembra del sistema de producción vertical “Green Wall”. Alajuela 2021.

4.3.3.3 Ensamblaje sistema “Green Wall”

El sistema “Green Wall” presenta la ventaja de ser fácilmente armables, ya que simplemente hay que colocar la cantidad de niveles que se deseen uno encima de otro. Una vez que se terminaron de instalar los seis niveles, se procedió a llenar con 8 L de sustrato cada nivel.

4.4 Sistema del cultivo

En este estudio se utilizó como sustrato la fibra de coco (FICO®), cuyas características fisicoquímicas fueron determinadas en el laboratorio de ambientes protegidos de la EEFBM (Cuadro 1) según la metodología propuesta por AENOR (2007).

Cuadro 1. Características físicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de lechuga en un sistema hidropónico de producción vertical en invernadero.

| Características físicas | Fibra de coco | % óptimo | Vol. (L) |
|---|---------------|----------|----------|
| Indice de grosor (%) | 87,5 | - | |
| Partículas >4 mm (%) | 75 | - | |
| Partículas entre 1 y 4 mm (%) | 19 | - | |
| Partículas entre >0,25 mm (%) | 6 | - | |
| Densidad aparente (Dap) g/ml en base seca | 0,62 | - | |
| Densidad real (Dr) g/ml método del picnómetro | 1,45 | - | |
| Porosidad total (PT): $1-(Dap/Dr)$ | 95,72 | >85% | 17,4 |
| % Fase sólida (FS): $100-PT$ | 4,28 | <15% | 0,8 |
| Componentes totales: partículas, aire y agua | 100 | | 18,2 |

Con la información generada se construyó la curva de liberación de agua y de aireación del sustrato (Figura 8), que permite determinar los diferentes tipos de agua disponible para el cultivo entre la humedad volumétrica a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) y la capacidad de aireación del sustrato (Soto, 2015).

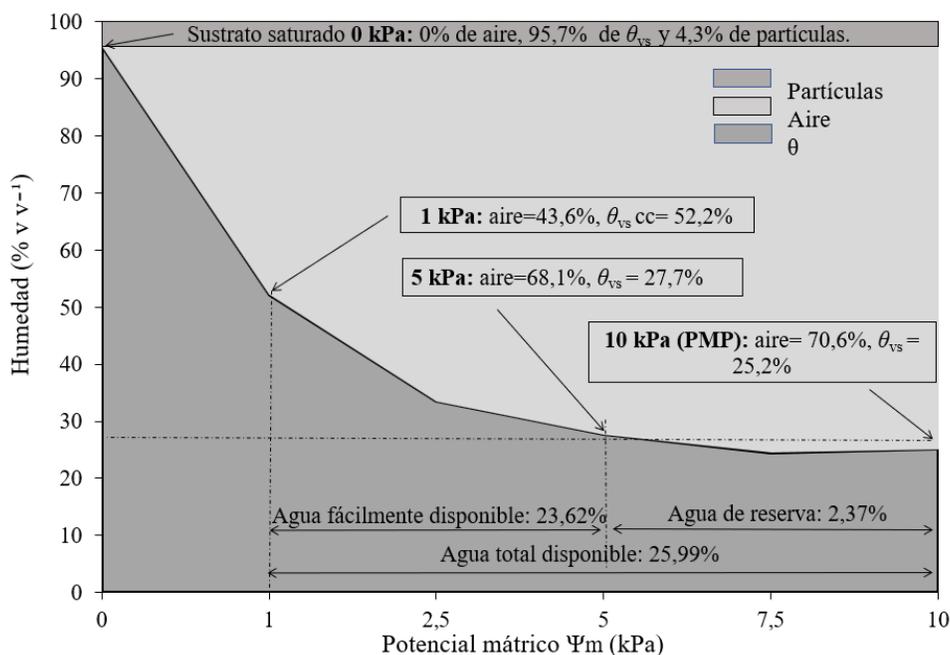


Figura 8. Contenido de partículas sólidas y curva de desorción de agua: aire que muestra los porcentajes de humedad volumétrica (θ) y de capacidad de aireación a diferentes valores de potencial mátrico (ψ_m); y contenidos de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible, en el sustrato de fibra de coco. Alajuela 2021.

El manejo fitosanitario del cultivo se realizó de forma preventiva, basado en los resultados obtenidos en monitoreos semanales de plagas y enfermedades y aplicando las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA's) según protocolo establecido en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno.

Todos los tratamientos y sus respectivas repeticiones tuvieron las mismas prácticas culturales, manejo integrado de problemas fitosanitarios y nutrición. La fertilización utilizada fue la indicada por Soto (2015) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Concentración de nutrientes y conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva utilizada en el cultivo de lechuga.

| Macronutrientes (mg L^{-1}) | | | | | | Micronutrientes (mg L^{-1}) | | | | | | CE |
|--|----|-----|----|-----|------|--|-----|----|-----|-----|-------|------------------------|
| N | P | K | Mg | Ca | S | Fe | Cu | Mn | Zn | B | Mo | (dS m^{-1}) |
| 200 | 57 | 280 | 57 | 122 | 3,75 | 5 | 1,9 | 5 | 1,9 | 0,4 | 0,125 | 1,5 |

La fertilización se aplicó a través de una solución nutritiva mediante riego por goteo. Las sales utilizadas fueron fosfato monopotásico, nitrato de potasio, sulfato de magnesio, Fetrilon® Combi 1, ácido bórico y nitrato de calcio. El pH de la solución nutritiva se ajustó con ácido nítrico a pH de 5,5 con el objetivo de degradar los HCO_3^- y mantenerlo en el rango óptimo (pH: 5 a 6) para la lechuga (Alvarado et al. 2001).

En el cultivo de la lechuga, Soto (2013) recomendó aplicar entre $3\text{-}7 \text{ L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para satisfacer las necesidades hídricas en días con temperaturas que alcanzan los 35°C , por lo que se utilizó este valor como requerimientos base. Sin embargo, a lo largo del ciclo los aportes de agua se modificaban en función del porcentaje de drenaje, del contenido de humedad del sustrato (Figura 9, 10 y 11) y del pH y la conductividad eléctrica (CE) en la solución drenada.

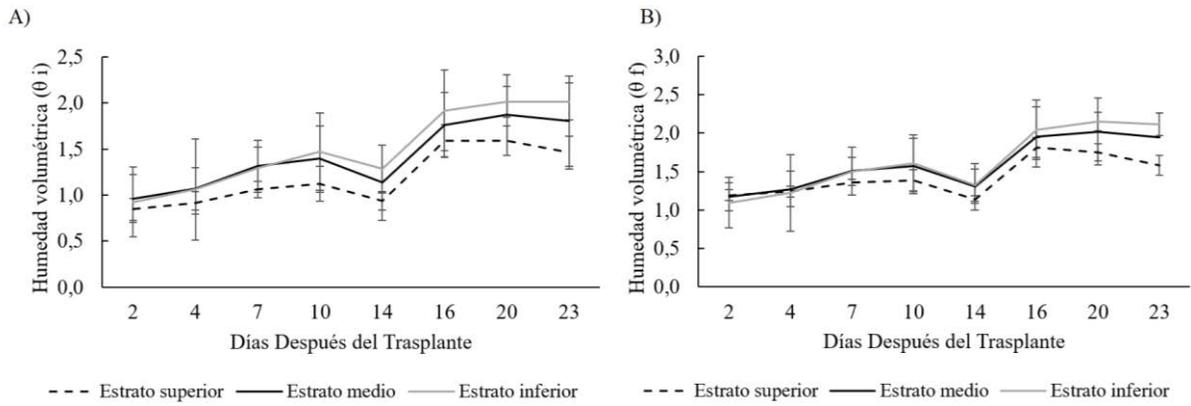


Figura 9. Contenido de humedad volumétrica A) inicial y B) final en el sustrato del tratamiento 1-MC durante el segundo ciclo de producción

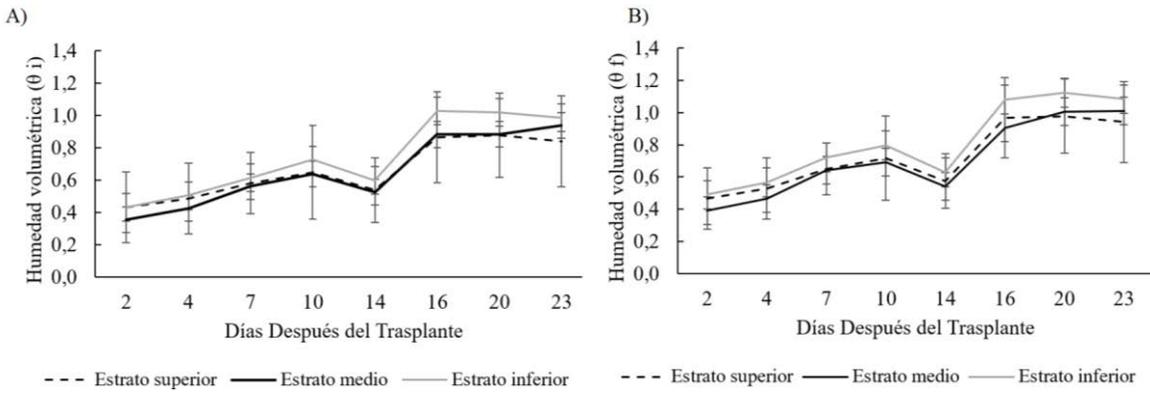


Figura 10. Contenido de humedad volumétrica A) inicial y B) final en el sustrato del tratamiento 2-MG durante el segundo ciclo de producción

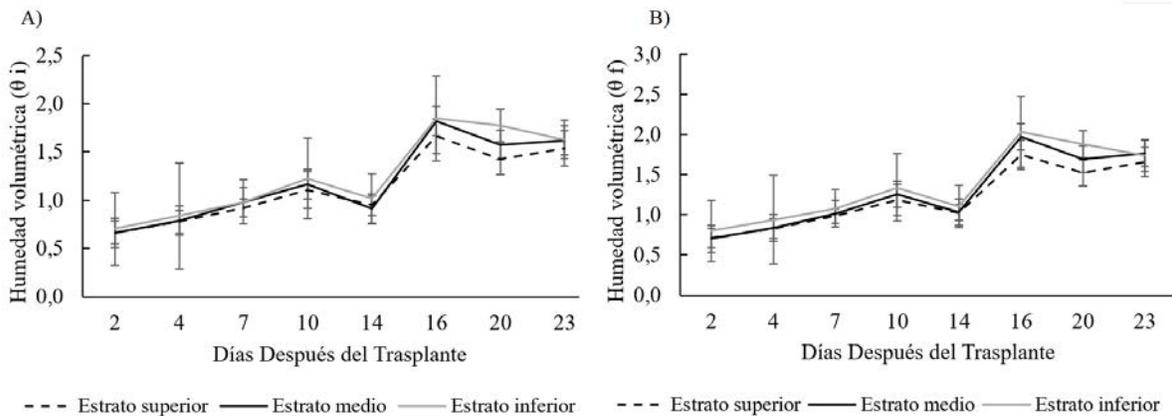


Figura 11. Contenido de humedad volumétrica A) inicial y B) final en el sustrato del tratamiento 3-SG durante el segundo ciclo de producción

4.5 Sistema de riego

Se utilizó un tanque de polietileno de 2 000 L para la solución nutritiva diluida, la cual fue distribuida a través de tuberías de polietileno de 16 mm de diámetro hasta los diferentes tratamientos a una velocidad de $1,3 \text{ m s}^{-1}$.

El sistema de riego se instaló a 2,5 m por encima del suelo, se colocaron las tuberías sobre los perlín anteriormente instalados del invernadero. Se utilizaron goteros autocompensados y antidrenantes (4 L h^{-1}) en cada tratamiento con una presión de 10 psi y un coeficiente de uniformidad (CU) de 87 ml min^{-1} para el sistema de manga colgante, 72 ml min^{-1} para el 2-MG y 96 ml min^{-1} en el 3-SG. En el caso de los sistemas 1-MC y 2-MG los goteros (9 y 18 respectivamente) se colocaron en los estratos superior, medio e inferior para suplir el agua por medio de una gradiente; por el contrario, en el sistema 3-SG se colocó un gotero por punto de siembra.

En el cabezal de riego se instalaron válvulas solenoides para que cada tratamiento tuviera un sector de riego independiente, lo que permitía cambiar el volumen del riego según la demanda del cultivo en cada sistema, mas no así su frecuencia. A raíz de esto, al inicio del ciclo se programó el sistema de riego para regar cuatro veces al día, a las 10:00 a.m., 12:00 p.m., 1:00 p.m. y 3:00 p.m. La duración del riego se modificó en ambos ciclos del cultivo en función del contenido de humedad volumétrica del sustrato y del porcentaje de drenaje (Cuadro 3 y 4).

Cuadro 3. Duración, frecuencia de riego y volumen de riego aplicado a cada unidad experimental (UE) y tratamiento a lo largo del primer ciclo del cultivo de lechuga.

| DDT | Tratamiento | Volumen aplicado (L/min/UE) | Tiempo de riego programado (min) | Cantidad de riegos/día | Volumen aplicado (L/día/UE) | Volumen aplicado (L/día/tratamiento) |
|------------|--------------------|------------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------------|---|
| 6 | 1-MC | 0,8 | 2 | 4 | 6,4 | 38,4 |
| | 2-MG | 1,3 | 1 | 4 | 5,2 | 31,2 |
| | 3-SG | 1,8 | 1 | 4 | 7,2 | 43,2 |
| 8 | 1-MC | 0,8 | 2 | 4 | 6,4 | 38,4 |
| | 2-MG | 1,3 | 1 | 4 | 5,2 | 31,2 |
| | 3-SG | 1,8 | 1 | 4 | 7,2 | 43,2 |
| 13 | 1-MC | 0,8 | 2 | 4 | 6,4 | 38,4 |
| | 2-MG | 1,3 | 2 | 4 | 10,4 | 62,4 |
| | 3-SG | 1,8 | 1 | 4 | 7,2 | 43,2 |
| 16 | 1-MC | 0,8 | 3 | 4 | 9,6 | 57,6 |
| | 2-MG | 1,3 | 2 | 4 | 10,4 | 62,4 |
| | 3-SG | 1,8 | 2 | 4 | 14,4 | 86,4 |
| 20 | 1-MC | 0,8 | 4 | 4 | 12,8 | 76,8 |
| | 2-MG | 1,3 | 2 | 4 | 10,4 | 62,4 |
| | 3-SG | 1,8 | 2 | 4 | 14,4 | 86,4 |
| 23 | 1-MC | 0,8 | 4 | 4 | 12,8 | 76,8 |
| | 2-MG | 1,3 | 3 | 4 | 15,6 | 93,6 |
| | 3-SG | 1,8 | 2 | 4 | 14,4 | 86,4 |

Cuadro 4. Duración, frecuencia de riego y volumen de riego aplicado a cada unidad experimental (UE) y tratamiento a lo largo del segundo ciclo del cultivo de lechuga.

| DDT | Tratamiento | Volumen aplicado (L/min/UE) | Tiempo de riego programado (min) | Cantidad de riegos/día | Volumen aplicado (L/día/UE) | Volumen aplicado (L/día/tratamiento) |
|-----|-------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 2 | 1-MC | 0,8 | 2 | 5 | 8 | 48 |
| | 2-MG | 1,3 | 1 | 5 | 6,5 | 39 |
| | 3-SG | 1,8 | 1 | 5 | 9 | 54 |
| 8 | 1-MC | 2,3 | 2 | 5 | 23 | 138 |
| | 2-MG | 2,8 | 2 | 5 | 28 | 168 |
| | 3-SG | 3,3 | 1 | 5 | 16,5 | 99 |
| 15 | 1-MC | 3,8 | 2 | 5 | 38 | 228 |
| | 2-MG | 4,3 | 2 | 5 | 43 | 258 |
| | 3-SG | 4,8 | 1 | 5 | 24 | 144 |
| 17 | 1-MC | 5,3 | 2 | 5 | 53 | 318 |
| | 2-MG | 5,8 | 2 | 5 | 58 | 348 |
| | 3-SG | 6,3 | 1 | 5 | 31,5 | 189 |
| 21 | 1-MC | 6,8 | 3 | 5 | 102 | 612 |
| | 2-MG | 7,3 | 2 | 5 | 73 | 438 |
| | 3-SG | 7,8 | 1 | 5 | 39 | 234 |
| 23 | 1-MC | 8,3 | 3 | 5 | 124,5 | 747 |
| | 2-MG | 8,8 | 2 | 5 | 88 | 528 |
| | 3-SG | 9,3 | 1 | 5 | 46,5 | 279 |

4.6 Diseño experimental

El experimento consistió en un diseño factorial de bloques, donde los tratamientos fueron los distintos sistemas de producción vertical (1-MC, 2-MG y 3-SG) en dos ciclos de producción consecutivos, para un total de seis tratamientos con seis repeticiones de cada uno, para un total de 18 unidades experimentales. El sistema 1-MC tuvo un total de 24 plantas por repetición equivalente a un área de siembra de 1,05 m², el 2-MG contó con 30 plantas por repetición con un área de siembra de 1,00 m², y el sistema 3-SG tuvo 18 plantas por repetición y un área de siembra de 1,05 m². En el caso de los tratamientos 2-MG y 3-SG, se mantuvo una orientación este-oeste de los módulos para homogenizar la iluminación natural

recibida. El área de investigación se conformó por seis bloques, con un distanciamiento de 1,5 m entre hileras y 1,5 m entre columnas (Figura 12).

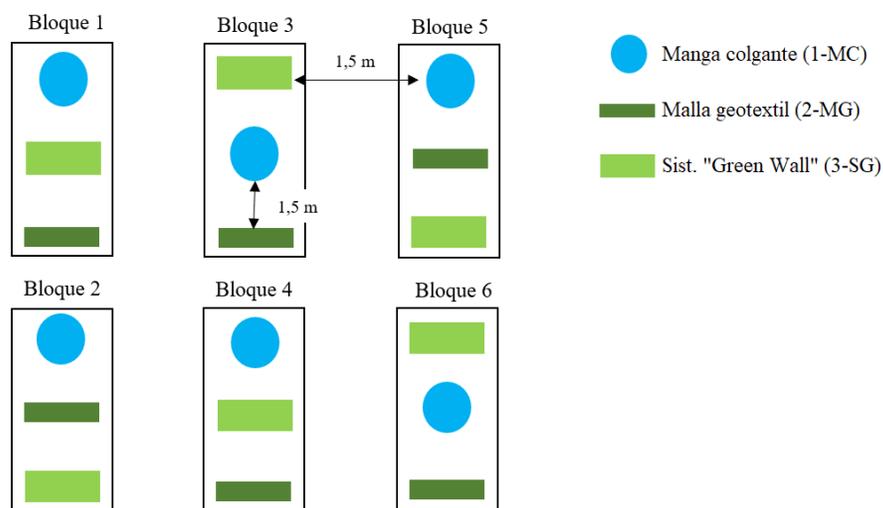


Figura 12. Diseño experimental en un arreglo factorial de bloques, con la distribución de los tratamientos manga colgante (1-MC), malla geotextil (2-MG), sistema “Green Wall” (3-SG) en sus respectivos bloques. Alajuela 2021.

4.7 Variables de respuesta

En el presente estudio se evaluaron variables relacionadas con la caracterización del crecimiento del cultivo, eficiencia productiva en términos de rendimiento fresco, parámetros de manejo del riego y la eficiencia de uso de agua. Además, se realizó un estudio de costos para cada tratamiento.

4.7.1 Caracterización del crecimiento.

Para el trasplante se utilizaron plántulas de almácigo con cuatro hojas verdaderas. A estas se les evaluaron parámetros de calidad previo al trasplante tales como peso fresco total (g planta^{-1}), grosor del tallo (mm), longitud de raíz y de tallo (cm) y número de hojas, con la finalidad de caracterizar la calidad del almácigo.

El patrón de crecimiento de la lechuga se evaluó semanalmente mediante el número de hojas y altura de la planta. Para dichas variables, en los tratamientos 2-MG y 3-SG se

utilizaron seis plantas por unidad experimental (UE), seleccionadas al azar y distribuidas en los estratos superior, medio e inferior (dos plantas por estrato). En el tratamiento de mangas colgantes, las evaluaciones se realizaron en los estratos superior e inferior (dos plantas por estrato) para un total de cuatro plantas por UE.

Al finalizar el ciclo de producción se cuantificó el rendimiento fresco para cada UE y tratamiento. Para ello, con una balanza granataria se cuantificó el peso fresco total, de la raíz, de hojas y del tallo de siete plantas por UE en los tratamientos 2-MG y 3-SG, y ocho plantas por UE del tratamiento 1-MC. Se midió el AF (Área foliar) con el medidor de área foliar marca LI-COR (modelo LI-3100C area meter, Estados Unidos), utilizando la totalidad de hojas de siete plantas por UE. Para posteriormente calcular el índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (IAF) utilizando la siguiente ecuación (Ec. 1).

$$\text{IAF} = \frac{\text{AF} \times \text{número plantas m}^{-2}}{\text{área m}^{-2}} \quad (\text{Ec. 1})$$

El rendimiento total en términos de peso fresco (kg m^{-2}) para cada UE y tratamiento, se calculó con la ecuación 2 (Ec. 2)

$$R = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

R = rendimiento fresco (kg m^{-2})

P= peso de las 15 lechugas pesadas (kg)

A= área de cada tratamiento

Para el peso seco, las plantas cosechadas por UE y tratamiento se colocaron dentro de una estufa a 105°C hasta obtener peso seco constante. Finalmente, se pesaron y se calculó el peso seco promedio por cada UE y respectivo estrato vertical.

4.7.2 Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia de uso del agua ($EUA=L\ Kg^{-1}$), se evalúa en términos de la Productividad del Agua (PA), ya sea como PA física o PA económica. La PA física se obtiene a partir del cociente entre el agua de riego usada ($ETc= m^3\ m^{-2}$) y el rendimiento comercial (Salazar *et al.* 2014) (Ec. 3).

$$EUA = \frac{ETc}{R} \quad (\text{Ec. 3})$$

4.7.2.1 Evapotranspiración del cultivo (ETc)

La ETc total se determinó únicamente en el segundo ciclo experimental del estudio, en cada repetición y tratamiento, a partir del balance de agua en el sistema según la siguiente ecuación (Soto, 2013) (Ec. 4). Se realizó una regresión en el tiempo para cada tratamiento con el fin de obtener valores de ETc en los días que no se realizaron mediciones.

$$ETc = (H_{vi} - H_{vf}) + R - D \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

ETc= evapotranspiración del cultivo ($L\ m^{-2}$).

θ_i = contenido de humedad volumétrica del sustrato al inicio del período (L)

θ_f = contenido de humedad volumétrica del sustrato al final del período (L)

R= volumen de riego (L)

Dr= volumen de drenaje (L)

El contenido volumétrico de agua en el sustrato se midió semanalmente utilizando un sensor de humedad capacitivo (Mod GS3 Decagon). En cada UE, el volumen drenado (D) después de un riego fue recolectado en recipientes, y medido con una probeta.

Otros parámetros de riego fueron evaluados dos veces por semana, tales como el porcentaje de drenaje (%Dr), el pH y la CE en el drenaje y en el sustrato. El pH y la CE del drenaje se monitorearon con un pHmetro-conductivímetro (HANNA Mod.HI98129). La CE del sustrato se obtuvo “in situ” en tiempo real colocando un TDR (Time Domain Reflectometry).

Del volumen de drenaje recolectado en los recipientes colocados debajo de cada repetición se tomaron submuestras para medir el pH y CE de los drenajes. El %Dr se calculó como el cociente entre el Dr y el volumen de riego aplicado (VA) según la siguiente ecuación (Ec. 5):

$$\%Dr = \frac{Dr}{VA} \times 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

4.7.3 Estudio de costos

Para el desarrollo del estudio de costos se implementó la metodología de presupuestos parciales propuesto por el CIMMYT (1988), en función al método planteado por Reyes (2001), el cual consta de una serie de pasos. Dicho enfoque tiene como objetivo estimar la relación costo-beneficio de los distintos tratamientos y realizar un análisis de dominancia (CIMMYT, 1988). En esta investigación las variables económicas de respuesta fueron los costos variables, el beneficio neto en campo, análisis de dominancia y la Tasa de Retorno Marginal. Se realizó un análisis descriptivo de los resultados.

Los 12 pasos para la realización del enfoque propuesto por Reyes (2001) se detallan a continuación:

- 1) Identificar rubros de costos variables para cada tratamiento evaluado.
- 2) Estimar los precios de campo de los insumos (Ec. 6).

$$PCI = PMI + CUC \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

PCI= precio de campo del insumo

PMI= precio de mercado del insumo

CUC= precio unitario de llevar el insumo al lugar requerido.

3) Estimación de costos variables (Ec. 7).

$$CV = \sum PCI \times NI \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

CV= costo variable de cada tratamiento

PCI= precio de campo del insumo

NI= nivel de empleo del insumo en cada tratamiento

4) Estimación de precios de campo del insumo (Ec. 8).

$$PCQ = PMQ - CUCYC \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

PCQ= precio de campo del producto

PMQ= precio de mercado del producto

CUCYC= costos unitarios de cosecha y comercialización

5) Estimar rendimientos ajustados (RA) (Ec.9).

$$RA = \text{Rend. experimental} \times (1 - \text{tasa de ajuste}) \quad (\text{Ec.9})$$

6) Estimar beneficios brutos de campo (BB) (Ec. 10).

$$BB = PCQ \times RA \quad (\text{Ec. 10})$$

7) Estimar los beneficios netos de campo (BN) (Ec. 11).

$$BN = BB - CV \quad (\text{Ec. 11})$$

8) Realizar análisis de dominancia

El objetivo del análisis de dominancia es identificar cual tratamiento se le recomendaría a los productores o personas interesadas.

9) Cálculo de tasa de retorno marginal (TRM) (Ec. 12).

$$\text{TRM} = \frac{\Delta \text{BN}}{\Delta \text{CV}} \times 100 \quad (\text{Ec. 12})$$

10) Cálculo de la tasa mínima de retorno (TAMIR)

11) Determinación del tratamiento más rentable

12) Análisis de residuos (Ec. 13).

$$\text{Residuo} = \text{BN} - \left[\left(\frac{\text{TAMIR}}{100} \right) \times \text{CV} \right] \quad (\text{Ec. 13})$$

4.8 Análisis estadísticos de datos

Una vez obtenidos los datos, estos fueron sometidos a un análisis de normalidad y homocedasticidad con el programa JMP[®], Versión 15. SAS Institute Inc. Cuando se cumplieron dichos supuestos se realizó un análisis de varianza (ANDEVA), y si hay efectos estadísticamente significativos al nivel de significancia del 5% se realizó la comparación múltiple de medias mediante la prueba Tukey ($P < 0,05$).

Para el diseño experimental con arreglo factorial en bloques el modelo estadístico del ANDEVA fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + \beta_j + AB_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Y_{ijk} = Observación de la variable respuesta obtenida del tratamiento con el i-ésimo nivel de A, el j-ésimo nivel de B y la repetición k-ésima.

μ = Media general.

A_i = Efecto del i-ésimo nivel del factor A.

B_j = Efecto del j-ésimo nivel del factor B.

AB_{ij} = Efecto de la interacción del i-ésimo nivel del factor A y el j-ésimo nivel del factor B en su repetición k.

ϵ_{ijk} = Error

5. Resultados

5.1 Comportamiento agronómico

Los resultados obtenidos en el comportamiento agronómico permitieron caracterizar el crecimiento de la lechuga durante dos ciclos de producción, observando una disminución en todas las variables de respuesta durante el segundo ciclo en comparación al primer ciclo, siendo el tratamiento 2-MG el más afectado en ese segundo periodo.

Con respecto al número de hojas, el tratamiento de manga colgante presentó una mayor producción de hojas al final del primer ciclo que los demás tratamientos ($P < 0,05$) (Figura 13). No hubo diferencias significativas en el tratamiento de malla geotextil y el sistema “Green Wall” ($P > 0,05$).

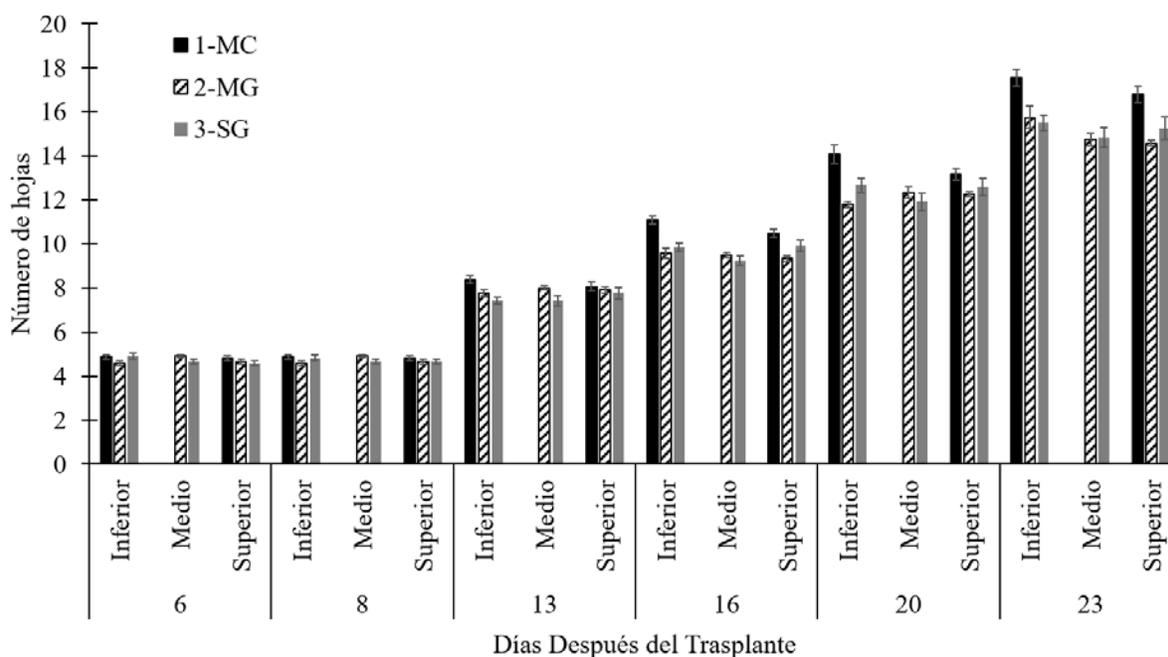


Figura 13. Número de hojas por planta de lechuga en los tratamientos de manga colgante, malla geotextil y sistema “Green Wall” según su estrato vertical (inferior o superior) durante el primer ciclo de producción. Alajuela 2021.

Al final del primer ciclo, todos los tratamientos, sin importar su estrato vertical, presentaron una altura de planta similar ($P>0,05$), con excepción del estrato superior del sistema “Green Wall” ($P<0,05$) (Figura 14).

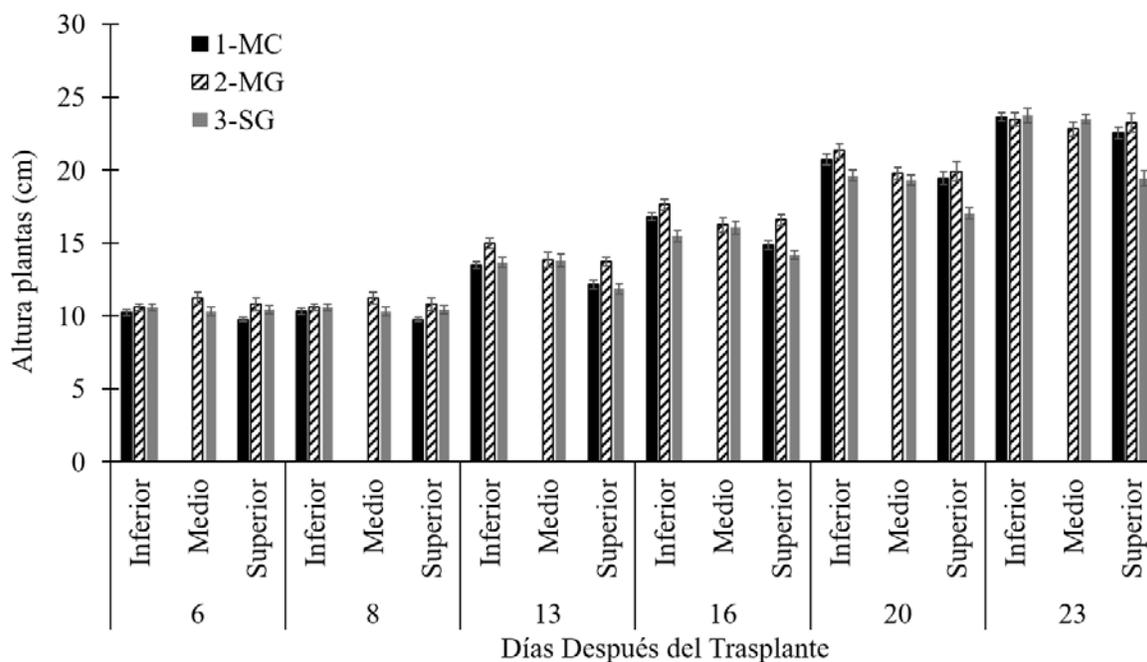


Figura 14. Altura de planta de lechuga en los tratamientos de manga colgante, malla geotextil y sistema “Green Wall” según su estrato vertical (inferior o superior) durante el primer ciclo de producción. Alajuela 2021.

Al final del segundo ciclo, el tratamiento de manga colgante presentó una mayor producción de hojas en comparación a los demás sistemas ($P<0,05$) (Figura 15). En el tratamiento de malla geotextil se observaron valores inferiores ($P<0,05$).

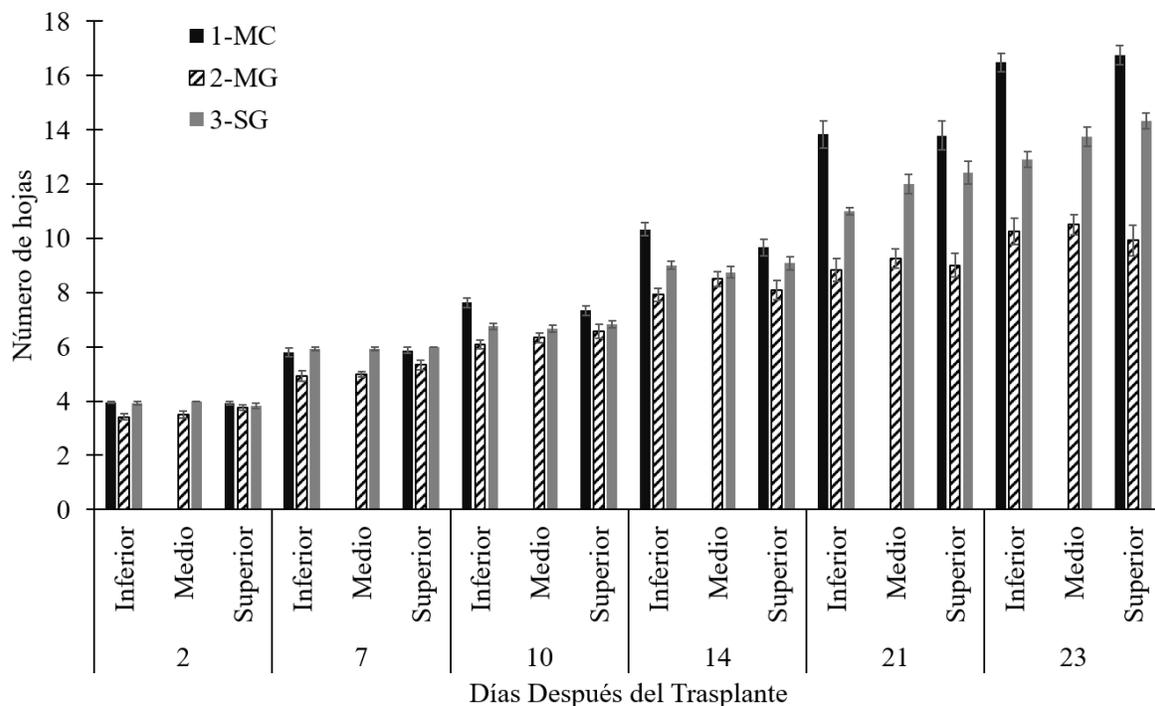


Figura 15. Número de hojas por planta de lechuga en los tratamientos de manga colgante, malla geotextil y sistema “Green Wall” según su estrato vertical (inferior o superior) durante el segundo ciclo de producción. Alajuéla 2021.

Con respecto a la altura de planta al final del segundo ciclo (Figura 16), los tratamientos 3-SG y 1-MC no presentaron diferencias significativas entre sus estratos verticales ($P > 0,05$). El sistema de malla geotextil reportó la menor altura de planta a lo largo de todo el segundo ciclo en comparación a los demás tratamientos ($P < 0,05$).

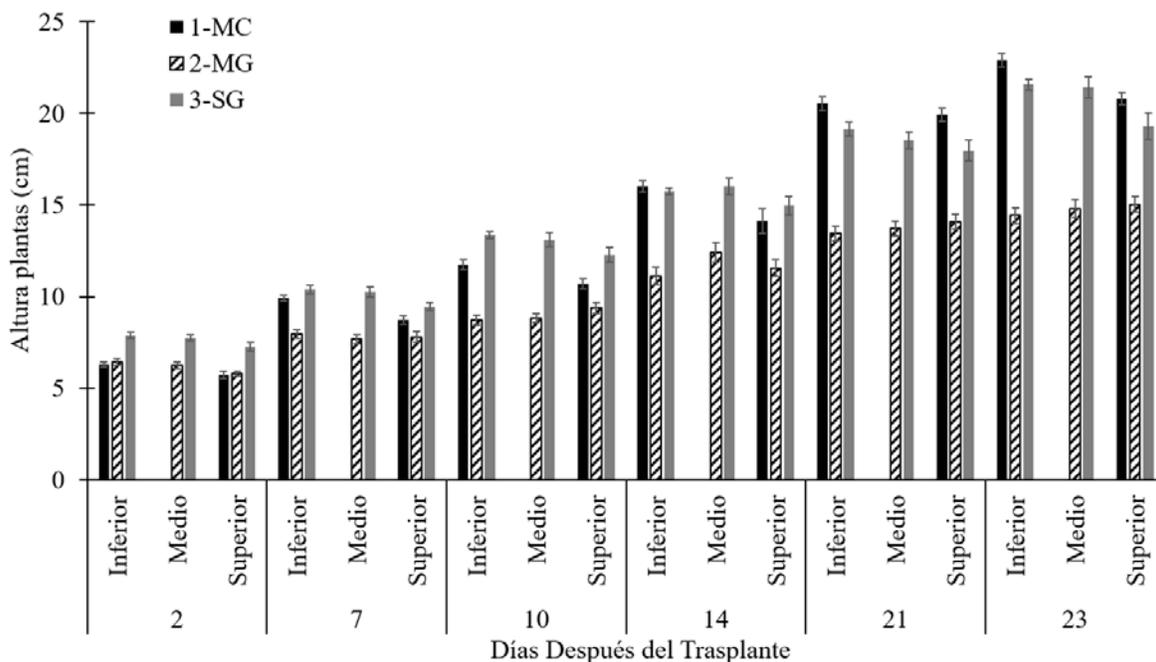


Figura 16. Altura de planta de lechuga en los tratamientos de manga colgante, malla geotextil y sistema “Green Wall” según su estrato vertical (inferior o superior) durante el segundo ciclo de producción. Alajuela 2021.

5.1.1 Rendimiento fresco

Las variables de rendimiento presentaron una disminución en la calidad de la lechuga para los distintos tratamientos durante el segundo ciclo. El sistema 2-MG fue el más afectado en comparación al 1-MC y 3-SG.

En ambos ciclos de producción se puede observar que el tratamiento de mangas colgantes presentó los mayores rendimientos en comparación a los demás tratamientos ($P < 0,05$) (Figura 17). En el primer ciclo se obtuvieron mayores pesos frescos en todos los sistemas de producción que en el segundo ciclo ($P < 0,05$).

En términos de rendimiento fresco/m², en el primer ciclo de producción los tratamientos 1-MC, 2-MG y 3-MG presentaron valores respectivos de 1,4 kg, 0,8 kg y 0,8 kg. Por el contrario, durante el segundo ciclo de producción los tratamientos 1-MC, 2-MG y 3-MG presentaron valores respectivos de 0,7 kg, 0,086 kg y 0,3 kg.

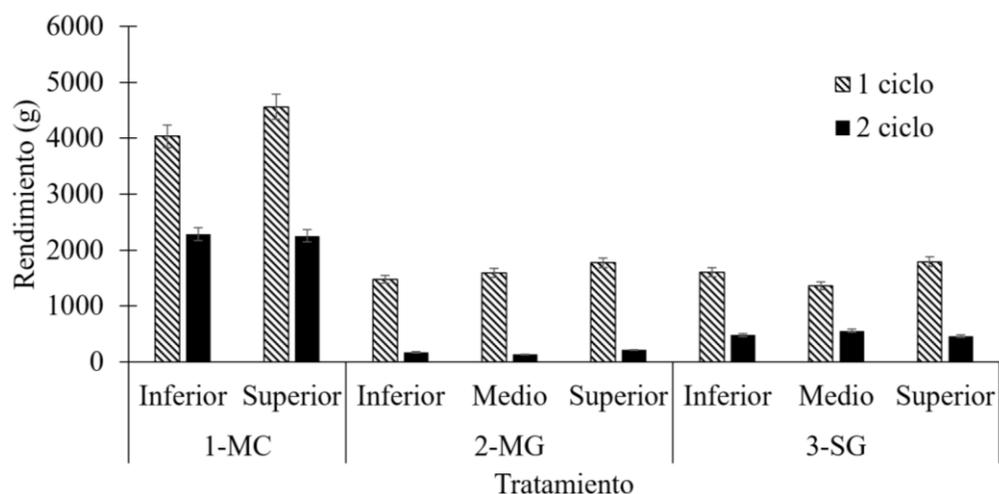


Figura 17. Rendimiento fresco de lechuga en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción. Alajuela 2021.

En el peso seco por planta (Figura 18), durante el primer ciclo se puede observar un mayor peso en los estratos superiores de los tratamientos 2-MG y 3-SG en comparación a los estratos inferiores ($P < 0,05$). En el segundo ciclo de producción el tratamiento de mangas colgantes presentó valores superiores en comparación a los demás tratamientos ($P < 0,05$).

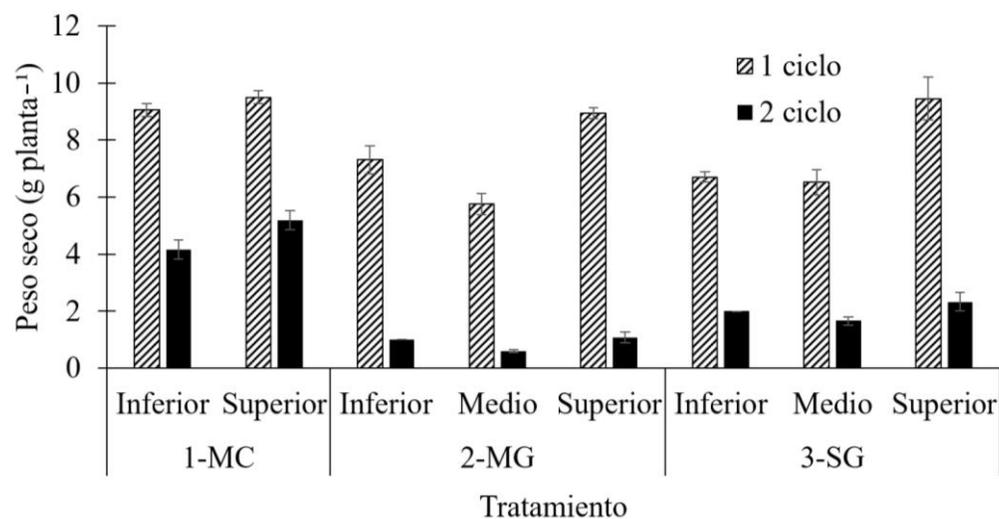


Figura 18. Peso seco (g) por planta de lechuga en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción. Alajuela 2021.

El peso fresco de las hojas al final del segundo ciclo presenta valores superiores provenientes del tratamiento de manga colgante en comparación a los demás tratamientos ($P<0,05$). Al comparar ambos ciclos de producción, los pesos fueron superiores en el primer ciclo para todos los tratamientos ($P<0,05$) (Figura 19).

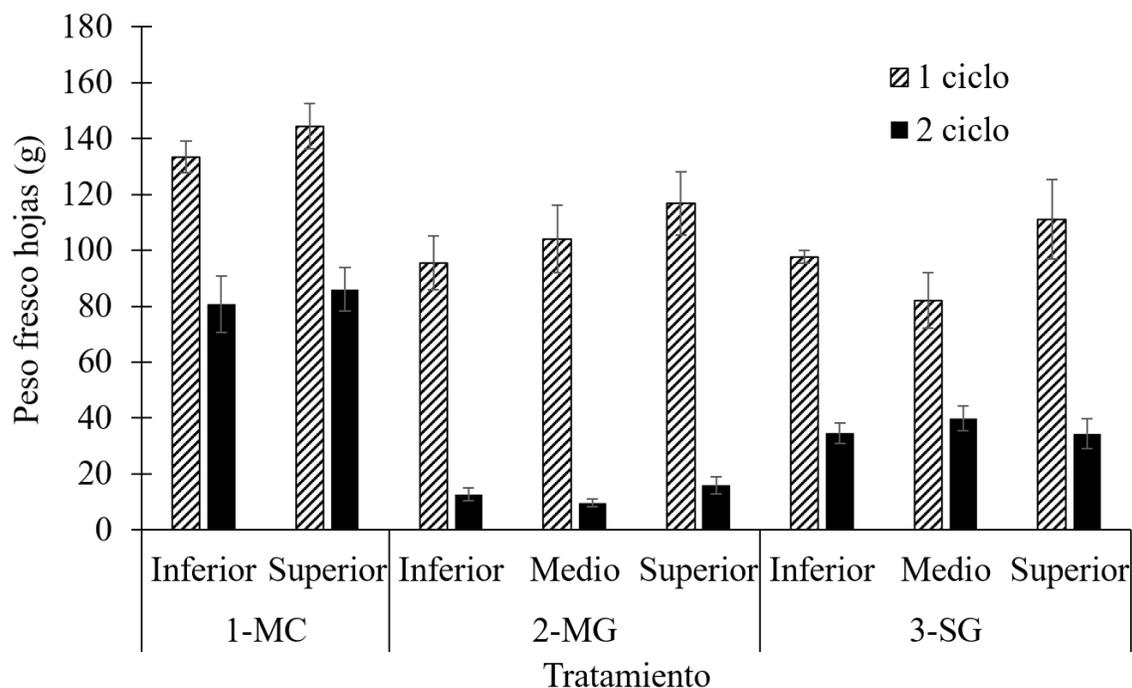


Figura 19. Peso fresco (g) de hojas de lechuga en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción. Alajuela 2021.

En ambos ciclos de producción el tratamiento de manga colgantes presentó los mayores pesos frescos del tallo en comparación a los demás tratamientos ($P<0,05$). Por otro lado, el tratamiento de malla geotextil obtuvo el menor peso durante el segundo ciclo productivo en comparación a los demás tratamientos ($P<0,05$) (Figura 20).

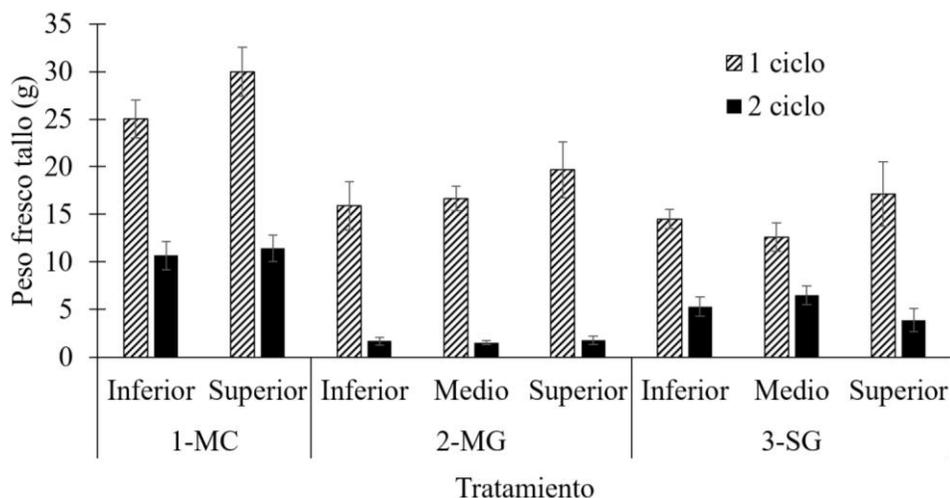


Figura 20. Peso fresco (g) del tallo de lechuga en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción. Alajuela 2021.

En el primer ciclo el estrato superior del sistema 1-MC presentó niveles mayores a los demás tratamientos ($P < 0,05$) (Figura 21). Al finalizar el segundo ciclo de producción el tratamiento 2-MG obtuvo valores de IAF inferiores a los sistemas 1-MC y 3-SG ($P < 0,05$).

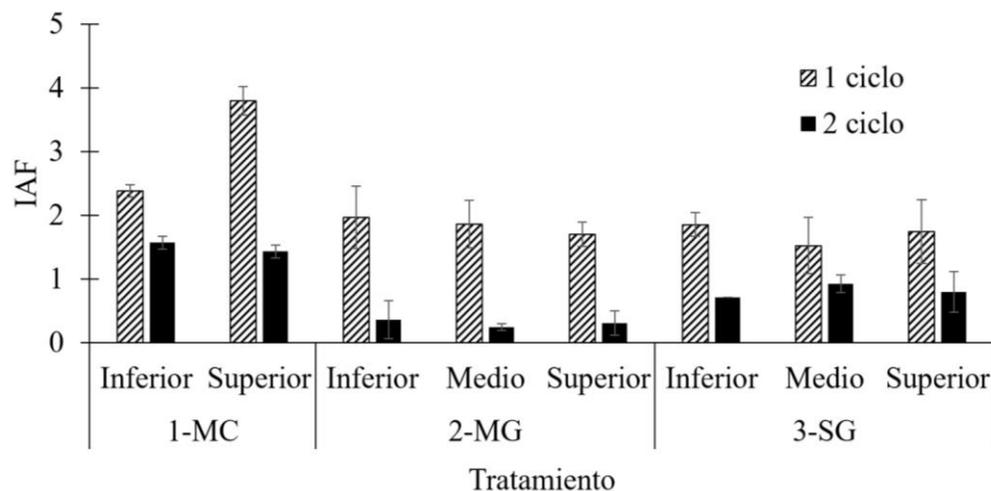


Figura 21. Índice de Área Foliar (IAF) en los distintos tratamientos (1-MC, 2-MG y 3-SG) según su estrato vertical (inferior, medio o superior) durante ambos ciclos de producción, con su respectivo error estándar. Alajuela 2021.

5.2 Parámetros de riego

Durante el segundo ciclo se estimaron los parámetros de riego, se observó un exceso de salinidad tanto en el sustrato como en el drenaje. Lo anterior repercutió en el rendimiento y por ende en la EUA de los distintos tratamientos, donde el sistema 2-MG fue el más afectado.

El porcentaje de drenaje (Figura 22) indicó que el sistema “Green Wall” presentó valores superiores que los demás tratamientos a lo largo del ciclo ($P < 0,05$), sin embargo, al final de este el sistema 2-MG tuvo un mayor drenaje ($P < 0,05$).

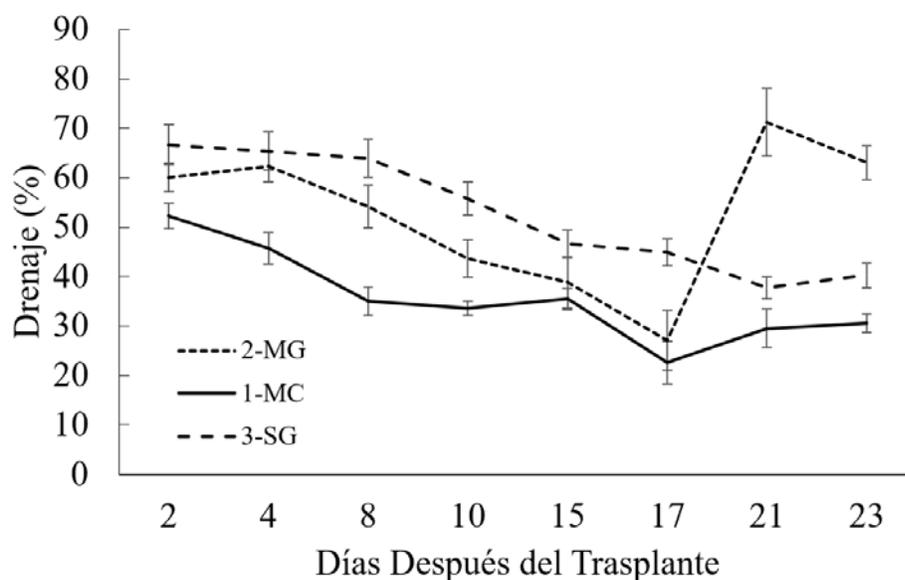


Figura 22. Porcentaje de drenaje en los distintos tratamientos a lo largo del segundo ciclo de producción. Alajuela 2021.

En la Figura 23 se observa que durante el primer ciclo productivo la CE del sustrato y el drenaje se mantuvo en su mayoría dentro del rango tolerable ($1,3-1,5 \mu\text{S m}^{-1}$) para el cultivo de lechuga en los distintos tratamientos

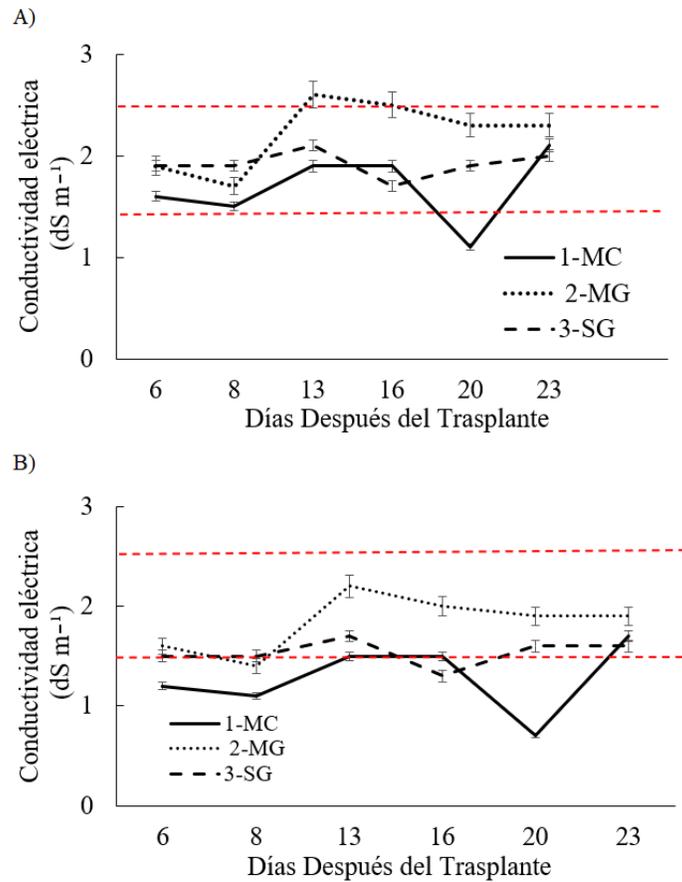


Figura 23. Conductividad eléctrica en el A) sustrato y B) drenaje de los distintos tratamientos durante el primer ciclo de producción. La línea punteada en rojo indica el rango óptimo para el cultivo de lechuga. Alajuela 2021.

Las primeras dos semanas del ciclo el pH del sustrato y el drenaje se mantuvo en el rango óptimo (5,5-6,5), sin embargo, se observó una tendencia a acidificarse en los distintos tratamientos al final del ciclo productivo (Figura 24).

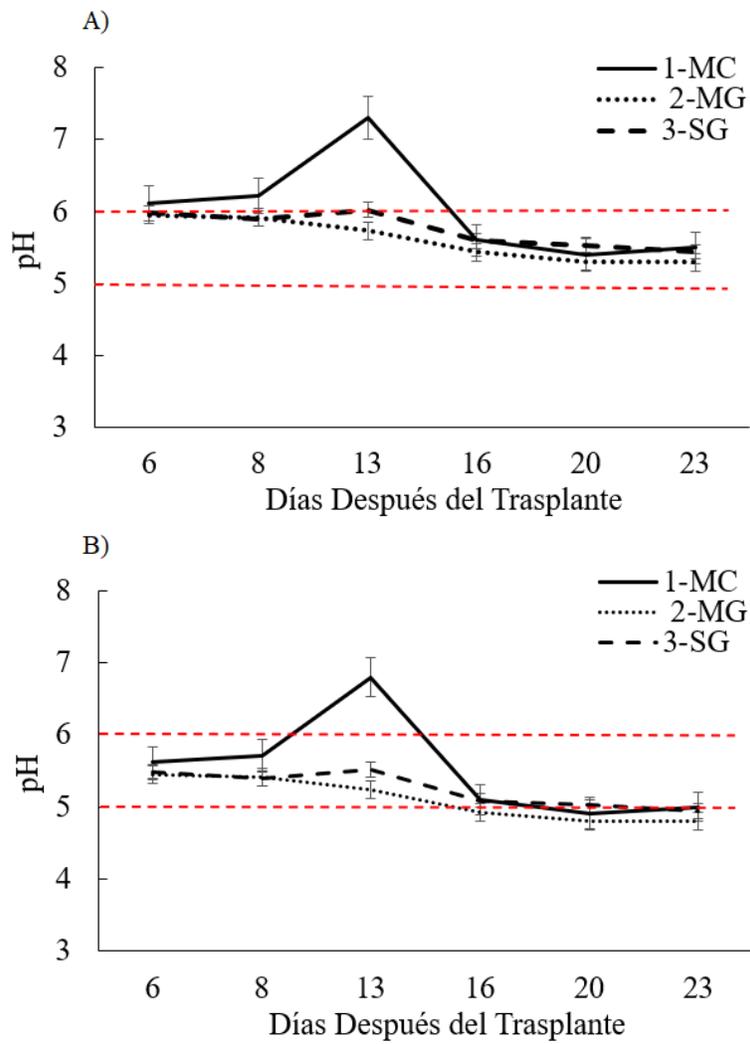


Figura 24. pH del A) sustrato y B) drenaje de los distintos tratamientos durante el primer ciclo de producción. La línea punteada en rojo indica el rango óptimo para el cultivo de lechuga. Alajuela 2021.

La CE del sustrato y drenaje durante el segundo ciclo de producción se mantuvo por encima del rango óptimo en los diferentes tratamientos (Figura 25). Se observaron niveles superiores de salinidad en el tratamiento 2-MG.

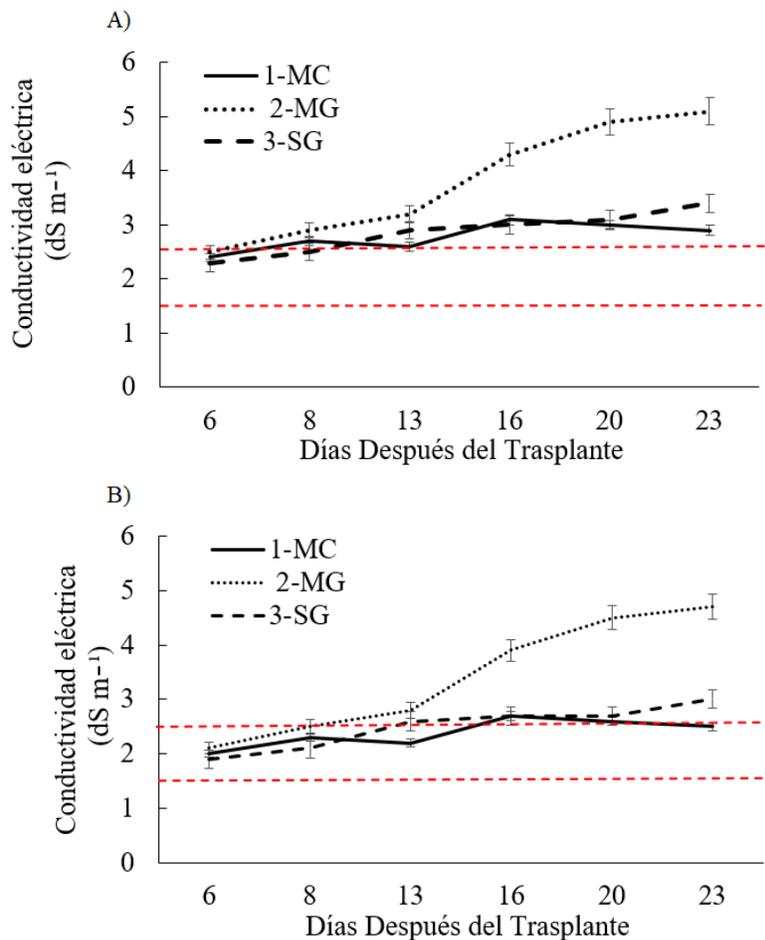


Figura 25. Conductividad eléctrica del A) sustrato y B) drenaje de los distintos tratamientos durante el segundo ciclo de producción. La línea punteada en rojo indica el rango óptimo para el cultivo de lechuga. Alajuela 2021.

En los tratamientos de manga colgante y sistema “Green Wall” se presentaron valores de pH en el sustrato y drenaje dentro del rango óptimo (Figura 26), sin embargo, en el sistema 2-MG se observó un pH por debajo de dicho rango (6,5-5,5).

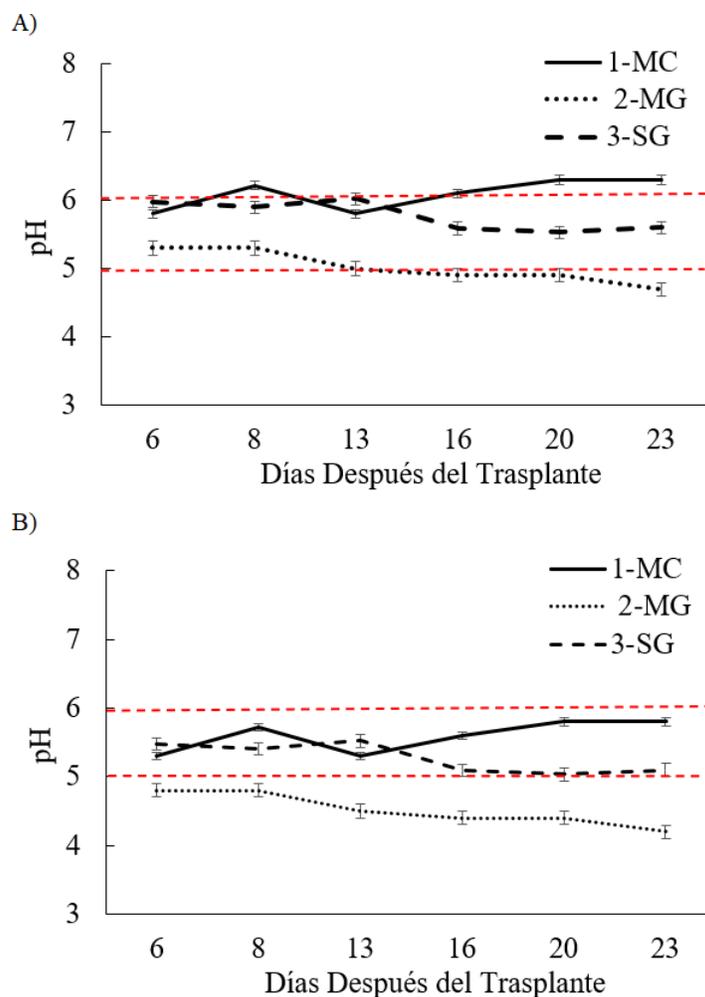


Figura 26. pH del A) sustrato y B) drenaje de los distintos tratamientos durante el segundo ciclo de producción. La línea punteada en rojo indica el rango óptimo para el cultivo de lechuga. Alajuela 2021.

5.2.1 Evapotranspiración del cultivo (ETc)

Conforme avanzó el segundo ciclo de producción la ETc fue en aumento en el tratamiento de mangas colgantes, tal y como se desprende de la Figura 27. El promedio de ETc durante el ciclo fue de 3704 ml m⁻², siendo el valor máximo de 6040 ml m⁻² y mínimo

de 1699 ml m^{-2} . En el tratamiento de malla geotextil el aumento en la ETc fue menos acentuada que en el 1-MC, con valores de evapotranspiración menores al tratamiento de mangas colgantes. El promedio de ETc en el tratamiento 2-MG durante el ciclo fue de 2343 ml m^{-2} , siendo el valor máximo de 2782 ml m^{-2} y mínimo de 1666 ml m^{-2} . La ETc del sistema “Green Wall” mantuvo un patrón similar al tratamiento de mangas colgantes, también con un crecimiento sostenido. El promedio de ETc en el tratamiento 3-SG durante el ciclo fue de 2808 ml m^{-2} , siendo el valor máximo de 5442 ml m^{-2} y mínimo de 270 ml m^{-2} .

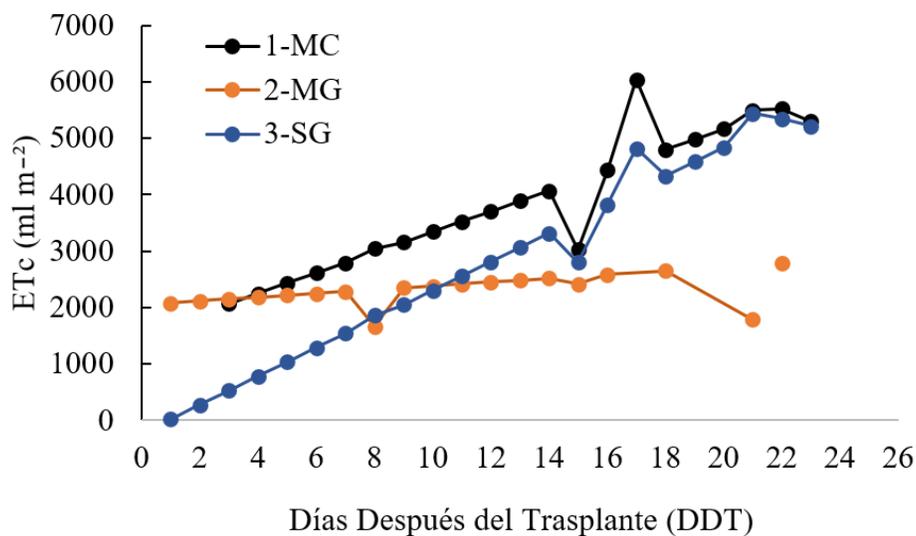


Figura 27. Evapotranspiración del cultivo (ETc) de lechuga durante el segundo ciclo de producción en los distintos tratamientos. Alajuela 2021.

5.2.2 Eficiencia en el uso del agua

Al analizar los resultados de eficiencia en el uso del agua (Cuadro 5) se pueden observar valores superiores por parte del tratamiento de manga colgante, indicando que dicho sistema produce más materia fresca por litro de agua consumido. El sistema de malla geotextil presentó los valores más bajos en comparación a los demás tratamientos.

Cuadro 5. Eficiencia en el uso del agua en los tratamientos de manga colgante (1-MC), malla geotextil (2-MG) y sistema “Green Wall” (3-SG) del segundo ciclo de producción del cultivo de lechuga var. BG. (Los rendimientos frescos presentados son la sumatoria de los módulos de cada tratamiento).

| Tratamiento | Sumatoria Etc (L m⁻²) | Rend. Fresco (g) | EUA (L kg⁻¹) |
|--------------------|---|-------------------------|--------------------------------|
| 1-MC | 85,21 | 4540 | 0,053 |
| 2-MG | 51,56 | 500 | 0,010 |
| 3-SG | 64,60 | 1500 | 0,023 |

5.3 Estudio de costos

Los resultados obtenidos indicaron que el sistema de manga colgante es el tratamiento dominante, ya que presentó los menores costos variables y los mayores beneficios netos en campo.

A continuación, el cuadro 6 resume los costos variables totales por tratamiento. Se observa que el sistema “Green Wall” supera el costo total de los demás tratamientos.

Cuadro 6. Costo variable total por tratamiento.

| Tratamiento | Costo de materiales variables | | Costo de la mano de obra variable | | TOTAL |
|--------------------|--------------------------------------|---------|--|--------|--------------|
| 1-MC | ₡ | 75 581 | ₡ | 11 668 | ₡ 87 249 |
| 2-MG | ₡ | 131 548 | ₡ | 9 073 | ₡ 140 621 |
| 3-SG | ₡ | 292 851 | ₡ | 7 431 | ₡ 300 282 |

El cuadro 7 presenta el ingreso respectivo a cada tratamiento en función a la cantidad de lechugas comercializables para cada ciclo de producción. El sistema de manga colgante obtuvo el mayor ingreso en comparación a los demás tratamientos en ambos ciclos de producción.

Cuadro 7. Ingreso total por tratamiento en ambos ciclos de producción.

| Tratamiento | Ciclo de producción | Lechugas comercializables | Precio unitario/lechuga | Ingreso total |
|-------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|---------------|
| 1-MC | | 144 | ₡ 350 | ₡ 50 400 |
| 2-MG | I ciclo | 180 | ₡ 350 | ₡ 63 000 |
| 3-SG | | 108 | ₡ 350 | ₡ 37 800 |
| 1-MC | | 102 | ₡ 350 | ₡ 35 700 |
| 2-MG | II ciclo | 15 | ₡ 350 | ₡ 5 250 |
| 3-SG | | 60 | ₡ 350 | ₡ 21 000 |

*Precio unitario de lechuga obtenido de CENADA diciembre 2021.

El beneficio neto es el resultado de restar los costos variables al beneficio bruto de campo (Ec. 11). Los resultados expuestos en el cuadro 8 muestran que el tratamiento con el mayor beneficio neto de campo es el de manga colgante además de presentar los menores costos variables.

Cuadro 8. Beneficio neto de campo de cada tratamiento

| Tratamiento | Beneficio bruto de campo | Costo variable | Beneficio neto de campo |
|-------------|--------------------------|----------------|-------------------------|
| 1-MC | 86 100 | ₡ 87 249,43 | -₡ 1 149 |
| 2-MG | 68 250 | ₡ 140 620,98 | -₡ 72 371 |
| 3-SG | 58 800 | ₡ 300 282,42 | -₡ 241 482 |

El sistema de manga colgante se considera el tratamiento dominante ya que presentó el mayor beneficio neto y los menores costos variables en comparación a los demás tratamientos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Análisis de dominancia para cada tratamiento experimental.

| Tratamiento | Costo variable | Beneficio neto de campo | Condición |
|-------------|----------------|-------------------------|-------------|
| 1-MC | ₡ 87 249,43 | -₡ 1 149 | NO DOMINADO |
| 2-MG | ₡ 140 620,98 | -₡ 72 371 | DOMINADO |
| 3-SG | ₡ 300 282,42 | -₡ 241 482 | DOMINADO |

En este proyecto no fue posible calcular la Tasa de Retorno Marginal, la cual muestra los cambios en los beneficios netos al ocurrir cambios en el costo variable, ya que se presentó un único tratamiento dominante, por lo que se utilizó el beneficio neto como parámetro de selección (CIMMYT, 1988).

6. Discusión

El presente estudio ha demostrado que los sistemas de producción vertical presentan una serie de ventajas en la eficiencia del uso de los recursos, lo cual ha impulsado su desarrollo en diversos países (Anda et al., 2017, Kalantari et al., 2017), por lo que representa una oportunidad también en Costa Rica.

Durante el primer ciclo experimental, las variables respectivas al comportamiento agronómico presentaron resultados similares entre tratamientos al final de ciclo. Sin embargo, durante el segundo ciclo de producción el sistema de manga colgante presentó valores superiores en un 45% en el número de hojas (Figura 15), 35% en altura de plantas (Figura 16), 95% en rendimiento fresco (Figura 17) y 67% en pesos seco (Figura 18) comparado a los demás tratamientos, mientras que el sistema de malla geotextil presentó resultados por debajo del 50% en comparación a los otros sistemas.

Al comparar los resultados obtenidos con la literatura se encontró que durante ambos ciclos de producción los tratamientos evaluados presentaron 32% menos en cantidad de hojas y una altura de plantas un 34% inferior a las reportadas por Meoño (2018), Zambrano (2014), Pérez (2021) y Touliatos (2016). Sin embargo, el rendimiento obtenido en el sistema de mangas colgantes en el primer ciclo fue similar al reportado por Zambrano (2014). Estos resultados pueden deberse a diversos factores, entre ellos la retención de humedad intrínseca de cada sistema y la acumulación de sales.

A pesar de que se realizaron ajustes en la duración y frecuencia del riego, los goteros utilizados tenían un alto caudal (4 L h^{-1}), que, en conjunto a la arquitectura vertical de cada sistema, favoreció un incremento sustancial en el porcentaje de drenaje de hasta el 70% (Figura 22). Además, un aporte insuficiente de agua pudo afectar la formación de un adecuado bulbo húmedo de riego, lo cual afectó el desarrollo del sistema radical y el mantenimiento de un contenido de humedad volumétrica constante y óptima en el sustrato.

La pérdida de humedad en el sustrato, al relacionarse directamente con la cantidad de agua que demanda la planta es un factor crucial en el crecimiento y el rendimiento del cultivo, ya que se ve afectada la fotólisis y consecuentemente la fotosíntesis. La fotólisis es el

mecanismo en el cual la molécula de agua al recibir energía luminosa se descompone en hidrogeno y oxígeno, manteniendo un flujo constante de electrones desde el agua hasta el fotosistema II y luego al fotosistema I, generando una corriente eléctrica que permite la fotosíntesis (Tavares et al. 2018). Las moléculas de agua son fundamentales para llevar a cabo la respiración celular y producir el Adenosin Trifosfato (ATP) necesario para los procesos metabólicos y de desarrollo de órganos (Tavares et al. 2018). Al verse limitado el recurso hídrico la planta no logra realizar dichos procesos correctamente repercutiendo en parámetros morfológicos tales como el número de hojas, área foliar y producción de biomasa.

En este estudio, cada sistema tuvo diferentes cantidades de sustrato, donde el sistema de malla geotextil tuvo menor cantidad por planta, mientras que el sistema de manga colgante dispuso de una mayor cantidad de sustrato por planta. Dichas diferencias, pudieron repercutir en la capacidad de retener humedad de cada sistema y la concentración de sales del sustrato, además, el sistema 2-MG al tener menor espacio disponible y cantidad de sustrato pudo tener menor desarrollo radical. El sistema 2-MG utilizó 1 L de sustrato por planta, por lo que una gran parte del sustrato utilizado por planta estaba en contacto con el geotextil, y consecuentemente tuvo una mayor pérdida de humedad por capilaridad. Además, en el caso del sistema 1-MC, un mayor volumen de sustrato disponible favorece un mejor desarrollo radical en la planta que incide en la absorción de agua y nutrientes y por ende en su desarrollo (Tavares et al. 2018), en el caso del cultivo de lechuga se recomienda 3L de sustrato por planta (Buitrago et al. 2018).

Por otra parte, altos niveles de conductividad eléctrica (CE) se traducen en altas concentraciones de sales y un aumento en el potencial osmótico en el medio de cultivo, lo cual repercute de forma directa en una disminución del rendimiento al limitarse la absorción de agua y nutrientes debido a una disminución en el desarrollo de las raíces y pérdida de pelos absorbentes. En el caso de lechuga valores de CE de $2,1 \text{ dS m}^{-1}$ generan una reducción en el rendimiento del 25% (Intagri, 2017).

Al comparar los resultados del primer y segundo ciclo se puede observar una disminución considerable en el rendimiento y crecimiento del cultivo en todos los tratamientos durante el segundo ciclo de producción (Figura 17). Este comportamiento puede

deberse a un mayor acúmulo de CE en el sustrato y más drenaje durante el segundo ciclo (Figura 25).

En los sistemas de producción hidropónicos es habitual una práctica cultural que consiste en realizar lavados al sustrato únicamente con agua, con la finalidad de disminuir concentraciones de sales y prepararlo para el ciclo de producción siguiente (Soto, 2015). En esta investigación se omitió dicha práctica, lo que puede explicar los valores elevados de conductividad eléctrica (CE) durante el segundo ciclo, que consecuentemente afectaron el desarrollo del cultivo y su rendimiento.

Además, el sustrato utilizado se recicló de una investigación anterior. A pesar de realizar la desinfección respectiva del sustrato no se realizó un lavado con agua para disminuir la concentración de sales acumuladas, ya que en ese momento se determinó la CE y no sobrepasó los $1,5 \text{ dS m}^{-1}$.

La salinidad afecta algunas características morfológicas y funcionales de las plantas, siendo el área foliar el parámetro más sensible al estrés salino, ya que esta disminuye y consecuentemente se limita la transpiración y la pérdida de agua (Pascual 2022). En esta investigación, se observó una disminución en el IAF del segundo ciclo (Figura 21) en todos los tratamientos, siendo de 62,5% en el 1-MC, de 75% en el 2-MG y de 50% en el 3-SG en comparación al primer ciclo de producción.

Los sustratos salinizados tienen una menor tasa de pérdida de humedad, ya que se inhibe la evaporación de la superficie (aunque en menor medida que en los suelos), debido a una mayor densidad del agua y su viscosidad, así como la formación de costras de sal en la superficie del suelo o sustrato. Además, disminuye el consumo de agua por parte de la planta, así como la tasa de evapotranspiración debido al efecto osmótico que generan las sales (Pascual 2022).

En esta investigación la mayor CE se obtuvo en el sistema 2-MG, que a su vez presentó aproximadamente un 47% menos de contenido de humedad volumétrica en el sustrato, que los demás tratamientos. Esto pudo deberse a las características intrínsecas del geotextil, que, al ser un material poroso favorece una mayor pérdida de agua por evaporación en comparación a los demás tratamientos.

El escaso desarrollo foliar del cultivo en el segundo ciclo favoreció la incidencia directa de la radiación solar a nivel de sustrato, ocasionando altas temperaturas que pudieron afectar la absorción de nutrientes y la concentración de oxígeno en el medio del cultivo, el cual es un nutriente no mineral esencial para el metabolismo y la absorción radical (Urrestarazu et al. 2004). Cuando la temperatura aumenta, ocasiona un déficit de oxígeno en la solución nutritiva debido a la demanda de oxígeno de la rizosfera asociada a la respiración de mantenimiento de las raíces, la cual duplica su ritmo (Urrestarazu et al. 2004).

Una temperatura óptima en el ambiente radical fomenta el desarrollo de raíces y aéreo, el consumo hídrico y la absorción de ciertos nutrientes, promoviendo una mayor producción de biomasa y rendimientos. Sin embargo, cuando la temperatura del sustrato se sale del rango óptimo se vuelve un factor limitante. De forma general los sustratos presentan una menor inercia térmica que el suelo, la cual se ve afectada ante volúmenes menores de sustrato y menor cantidad de agua retenida (Urrestarazu et al. 2004), condición observada en el presente trabajo.

En esta investigación las tuberías de riego eran de color negro, estaban expuestas y fueron instaladas a una altura superior al cultivo, por lo que eran más propensas a calentarse por las altas temperaturas dentro del invernadero, y, ya que el agua de riego caliente también es un factor limitante de oxígeno en las raíces no se puede descartar que este factor influyera en la disminución del desarrollo de las plantas. Sin embargo, es importante aclarar que no se monitoreó la temperatura del agua de riego, por lo que es solamente una suposición.

Conforme aumenta la temperatura por encima de los rangos óptimos hay una mayor actividad bioquímica que afecta la absorción de nutrientes, entre ellos el fósforo y el potasio, que podría causar síntomas de toxicidad (Urrestarazu *et al.* 2004) como la quema de bordes observada en el sistema 2-MG.

El sistema “Green Wall”, presentó un comportamiento agronómico y de cosecha más limitado que el sistema de manga colgante pero superior al sistema de malla geotextil. Esto pudo deberse a las temperaturas alcanzadas por el módulo durante el ciclo de producción debido a la coloración negra de los recipientes de cultivo (Anexo 6). El color negro posee la característica de absorber el calor en mayor medida que los demás colores (Vintimilla, 2013),

por lo que las lechugas en este sistema soportaron temperaturas de hasta 50 °C en su estructura durante todo el ciclo, de forma similar al sistema de malla geotextil (Anexo 5), lo cual repercutió en el crecimiento y el rendimiento. Sin embargo, obtuvo mejores resultados que el sistema 2-MG debido a su estructura plástica que evitó la pérdida de humedad del sustrato y tuvo un mayor volumen de sustrato por planta.

Con respecto a la EUA, la literatura reporta resultados desde 0,052 L kg⁻¹ hasta 0,026 L kg⁻¹ en el cultivo de lechuga al final del ciclo (Defilipis et al. 2014). En el caso de la presente investigación, la EUA obtenida en manga colgante (0,054 L kg⁻¹) fue superior a los datos reportados por Defilipis et al. (2014) en un 33%, contrario al sistema de malla geotextil y “Green Wall” cuyos resultados fueron inferiores a los indicados en la literatura en un 77% y 41%, respectivamente.

La eficiencia en el uso del agua se calculó a partir del rendimiento en peso fresco y el consumo de agua (ETc) obtenidos durante el segundo ciclo, en esta investigación al haber una reducción en el desarrollo de la planta durante dicho ciclo de producción, se vio afectado el consumo de agua y por ende el rendimiento de cada tratamiento, como se mencionó anteriormente, el agua desempeña un papel crucial en los procesos fisiológicos de las plantas. Dado que el sistema de malla geotextil y “Green Wall” presentaron los valores más bajos de producción de biomasa es congruente que presentaran una menor eficiencia hídrica. Como se mencionó anteriormente, el exceso de salinidad en el sistema 2-MG durante el segundo ciclo (Figura 25) pudo haber repercutido directamente en su rendimiento y por ende en la EUA.

A pesar de que el sistema de manga colgante presentó valores positivos conforme a lo reportado en la literatura, el crecimiento de la planta también se vio afectado, aunque en menor medida, por el exceso de salinidad.

El estudio de costos realizado indicó que el sistema dominante es el de manga colgante (Cuadro 9), ya que es el tratamiento con el mayor beneficio neto en campo y el menor costo variable. Sin embargo, con solo dos ciclos productivos y el rendimiento obtenido, no se obtienen ganancias ni el retorno de la inversión en ninguno de los tratamientos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Zambrano (2014) y Tapia (2016), donde se especula que son necesarios al menos cuatro ciclos de producción para el

retorno de la inversión. En dichas investigaciones la producción de lechuga se realizó bajo condiciones óptimas.

Durante el segundo ciclo de producción hubo repercusiones en el rendimiento de las lechugas en los distintos tratamientos ocasionadas por la cantidad de sustrato y exceso de salinidad. Esa situación que ocurrió como parte del ensayo, para efectos de la evaluación económica presenta datos no concluyentes, ya que los rendimientos obtenidos no se dieron en las condiciones óptimas y afectan el beneficio neto en campo.

Sin embargo, durante el primer ciclo de producción el desarrollo de las lechugas se dio bajo mejores condiciones y el 100% de las lechugas resultaron comercializables, por lo que se calculó el retorno de la inversión en base a los ingresos obtenidos durante el primer ciclo.

En función a esto, se determinó que el sistema de manga colgante necesita de dos ciclos de producción para obtener el retorno de la inversión y empezar a ver ganancias. El sistema de malla geotextil necesita de tres ciclos de producción para cubrir los costos y empezar a percibir ganancias. Mientras que con el sistema “Green Wall” son necesarios 8 ciclos de producción para recuperar lo invertido y empezar a percibir ganancias (Anexo 15).

7. Conclusiones

Al finalizar la evaluación de los tratamientos verticales con respecto a su comportamiento agronómico, eficiencia en el uso del agua y estudio de costos, se puede concluir que:

- El tratamiento de mangas colgantes presentó los mejores resultados en las variables de comportamiento agronómico y eficiencia en el uso del agua en ambos ciclos de producción.
- Bajo las condiciones efectuadas, los sistemas de producción evaluados permiten un ciclo de producción de máximo 23 DDT. Luego de ese periodo las plantas de lechuga presentan etiolación.
- Durante el segundo ciclo de producción la acumulación de sales ocasionó una disminución considerable en el desarrollo y rendimiento de los distintos tratamientos, siendo el sistema de malla geotextil el más propenso a la salinización.
- Se presentaron datos no concluyentes en la EUA debido a la afectación en el rendimiento.
- El estudio de costos presentó datos no concluyentes ya que el rendimiento de las lechugas se vio afectado durante el segundo ciclo, lo que a su vez afectó el beneficio neto en campo.

8. Recomendaciones

Al conocer los resultados y finalizar el proceso de producción en los tratamientos verticales se recomienda:

- Realizar lavados con agua al sustrato periódicamente para evitar la acumulación de sales.
- Utilizar goteros con un caudal menor a 4 L h^{-1} para favorecer la formación del bulbo húmedo en las raíces de la planta.
- Instalar una cubierta impermeable en la parte trasera del sistema de malla geotextil, con el fin de promover la retención de humedad.
- Utilizar sistemas “Green Wall” de color blanco, para evitar el sobrecalentamiento propio del color negro.
- Utilizar mayores volúmenes de sustrato en los sistemas “Green Wall” y de malla geotextil.

9. Bibliografía

- Acuña, L. (2019). *Evaluación del uso de jardines verticales como alternativa ecológica en edificaciones urbanas*. [Trabajo Final de Graduación, Universidad de Costa Rica]. Repositorio SIBDI Universidad de Costa Rica <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/8992/1/43928.pdf>
- Alvarado, D., Chávez, F., & Wilhelmina, K. (2001). *Lechugas hidropónicas*. [Trabajo Final de Graduación, Universidad del Pacífico: Facultad de administración y contabilidad] https://www.academia.edu/8258191/www.upbusiness.net_Seminario_de_Agro_Negocios_Lechugas_hidrop%C3%B3nicas_PROFESOR
- Anda, J., & Shear, H. (2017). Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico. *Sustainability* 1(1), Article 140. <https://doi.org/10.3390/su9010140>
- Arias, O. (2005). Retos para la agricultura en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29 (2): 157-166. https://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n02_157.pdf
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *Norma española UNE-EN 13041: Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas. Densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total*. <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0038538>
- Ayuso, A. (2016). *Evaluación del comportamiento hídrico de un jardín vertical de interior*. [Trabajo Final de Graduación, Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5826/tfe-ayuso-eva.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Benke, K., Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability* 13(1): 13–26. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>
- Buitrago, E., Fernanda, L., Acosta, D. (2018). *Optimización de sustrato para germinación de semilla de lechuga crespa en cultivos hidropónicos*. [Trabajo Final de Graduación, Universidad EAFIT].

https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/13336/LuisaFernanda_EcheverryBuitrago_2018.Tesis.pdf?isAllowed=y&sequence=2

- Cardozo, D., Rodríguez, L., & Zubelu, S. (2018). Crop coefficients analysis for green walls. *Congress on Project Management and Engineering* 1(1): 1-10. http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/1636/AT04-009_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Censo Nacional Agropecuario. (2014). Cultivos agrícolas: Total de fincas con cultivo de lechuga por extensión sembrada y cosechada en hectáreas, por provincia. *Instituto Nacional de estadísticas y Censos*. https://www.inec.cr/agropecuario/actividad-agricola?keys=lechuga&shs_term_node_tid_depth=All&field_periodo_tid=All&field_anio_documento_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (1988). La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: Un manual metodológico de evaluación económica. *CIMMYT*. <https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/1063/9031.pdf>
- Cochi, R. (2017). *Evaluación del comportamiento agronómico de la frutilla (Fragaria x ananassa Duch.) en cultivos verticales bajo dos densidades de plantación y tres niveles de humus de lombriz en la estación experimental de Cota Cota*. [Tesis de licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/13313/T-2420.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Defilipis, C., Pariani, S., Jimenez, A., & Bouzo, A. (2014). *Respuesta al riego de lechuga (Lactuca sativa L.) cultivada en invernadero*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Luján]. https://www.researchgate.net/publication/228910447_Respuesta_al_riego_de_lechuga_Lactuca_sativa_L_cultivada_en_invernadero
- Degenhart, B. (2016). La agricultura urbana: un fenómeno global. *Nueva Sociedad*. 1 (262): 1-12. <https://nuso.org/articulo/la-agricultura-urbana-un-fenomeno->

[global/#:~:text=Vista%20desde%20una%20perspectiva%20global,habitantes%20de%20alimentos%20b%C3%A1sicos%20suficientes.](#)

FAO (2003). Manual técnico la huerta hidropónica: Producción de hortalizas y forraje verde hidropónico. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* 1 (3): 15-16. <http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III.%20Desarrollo%20Social/Lombricultura%20y%20Abonos/LA%20HUERTA%20HIDROP%C3%93NICA%20POPULAR.pdf>

Fereres, E. (2009). Trayectoria reciente de la agricultura y la alimentación: retos del futuro. *Revista Española de Estudios Agrosociables y Pesqueros*. 1(224): 111-124. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_REEAP/r224_111_124.pdf

Fernández, C. (2005). Eficiencia en el uso del agua. *Revista Viveros*. 86–89. <https://www.franciscocamachoferre.es/investigacion/>

Friedrich, T. (2014). La seguridad alimentaria: retos actuales. *Revista cubana de ciencia agrícola* 48 (4): 319-322. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193033033001.pdf>

Godoy, E. (2015). Fincas verticales, una forma de la agricultura del futuro. *Inter Press Service News Agency*. <http://www.ipsnoticias.net/2015/11/fincas-verticales-una-forma-de-la-agricultura-del-futuro/>

Gomar, P. (2020). *Desarrollo de un sistema electrónico para controlar el crecimiento de plantas de un huerto vertical hidropónico* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10251/149993>

Granados, J., Peralta, L., Morales, Fernanda., & Rodríguez, Roel. (2021). Análisis de ciclo de vida de lechuga (*Lactuca sativa*) cultivada bajo un sistema orgánico y convencional, como insumo para toma de decisiones en dos fincas agrícolas costarricenses. *Tecnología en Marcha* 34 (3): 108-119. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5108>

- Herrera, A. (2009). Impacto de la agricultura urbana en Cuba. *Novedades en población* 5(9): 1–14. <http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/Cuba/cedem-uh/20100323071744/Impacto.pdf>
- Ibadango, F. (2017). *Eficiencia y rentabilidad del sistema hidropónico vertical frente al convencional en la producción de tres variedades de fresa (Fragaria Vesca L.), en la granja experimental Yuyucocha, Imbabura*. [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6405>
- Intagri. (2017). La conductividad eléctrica del suelo en el desarrollo de los cultivos. *Artículos técnicos de Intagri serie suelos*. 26 (1): 1-5. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos>
- Kalantari, F., Mohd, O., & Mahmoudi, A. (2017). A review of vertical farming technology : a guide for implementation of building integrated agriculture in cities. *Advanced Engineering Forum* 24(1): 76–91. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.24.76>
- Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings* 8(2): 24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
- López, G. (2016). *Estudio comparativo de sustratos de cultivos sostenibles en sistemas de naturación urbana: jardinería vertical y cubierta vegetal*. [Tesis de licenciatura Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.42963>.
- Meoño, A. (2018). *Evaluación de sistema de agricultura vertical tecnificado para producción de cultivos agrícolas que minimicen la inseguridad alimentaria en Camotán, Chiquimula*. [Informe final Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/prunian/INF-2018-09.pdf>
- Minigarden. (s.f). *El minigarden*. <https://cl.minigarden.net/el-minigarden/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2002). Boletín del programa nacional sectorial de producción agrícola bajo ambientes protegidos. *Programa nacional sectorial de*

producción agrícola bajo ambientes protegidos. 1 (12): 1-6
[http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP2\(12\).pdf](http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP2(12).pdf)

Muñoz, G., & Suarez, J. (2020). *Sistema vertical que implementa la recolección de aguas de lluvias y cultivos hidropónicos.* [Tesis de licenciatura Universidad La Gran Colombia].

https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5680/Mu%C3%B1oz_Geraldin_Suarez_Juan_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Muñoz, P., & Mariño, Y. (2019). *Propuesta de diseño de una estructura vertical para promover la agricultura urbana en la vivienda. Estudio de caso comunidad de Yomasa en la localidad de Usme en Bogotá.* [Tesis de licenciatura de Universidad Católica de Colombia].

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23875/1/PROPUESTA%20DE%20DISE%C3%91O%20DE%20UNA%20ESTRUCTURA%20VERTICAL%20PARA%20PROMOVER%20LA%20AGRICULTURA%20URBANA%20EN%20LA%20VIVIENDA.pdf>

Pascual, C. (2022). *Cuantificación de índices de salinidad usando sensores de CE y humedad de suelo en un cultivo en maceta de Euphorbia.* [Tesis de licenciatura de Universidad Politécnica de Cartagena].

<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/11025/tfgpascua.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Pereira, O., da Silva, T., Pastana, A., Bertonha, A., & Previdelli, I. (2018). Analysis of lettuce evapotranspiration across soil water. *Natural Resource Modeling* 1(32), 6-11.

<https://doi.org/10.1111/nrm.12197>

Pérez, J. (2021). *Comparación de producción de tres variedades de lechuga (Lactuca sativa l.) bajo sistema aeropónico vertical automatizado en cantón Daule – Guayas.* [Tesis de licenciatura de Universidad Agraria del Ecuador].

<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/PEREZ%20RONQUILLO%20JOSE%20MIGUEL.pdf>

- PIMA. (2017). Análisis del consumo de frutas, hortalizas, pescado y mariscos en los hogares costarricenses. *Programa Integral de Mercadeo Agropecuario*. <http://www.pima.go.cr/wp-content/uploads/2017/07/Analisis-Consumo.pdf>
- Reyes, M. (2001). Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales: Re-enseñando el uso de este enfoque. *Centro de Información Agro socioeconómica*. https://www.researchgate.net/publication/334655730_Analisis_economico_de_experimentos_agricolas_con_presupuestos_parciales_Re-ensenando_el_uso_de_este_enfoque
- Richmond, F. (2015). Validación de variedades de lechuga tipo americana en sistema hidropónico. *Ministerio de Agricultura y Ganadería*. 1(52), 2-5. [http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP9\(52\).pdf](http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP9(52).pdf)
- Rivera, J. (2020). *Evaluación del comportamiento del cultivo de lechuga (Lactuca sativa L.) y eficiencia del uso de agua utilizando poliacrilato de potasio en la granja experimental la pradera, Imbabura* [Tesis de licenciatura de Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10465/2/03%20AGP%20264%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- Salazar, R., Rojano, A., & López, L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Water Technology and Sciences (in Spanish)* 1 (2): 177–183. <https://www.redalyc.org/pdf/3535/353531987011.pdf>
- Sall, J. (2022). JMP Pro (Nº de versión 15). Windows. España: SAS.
- Soto, F. (2013). *Evaluación de la productividad y la dinámica del agua y el nitrógeno en cultivos hortícolas bajo invernadero con el modelo eu-rotate_n*. [Tesis doctoral Universidad de Almería]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=111687>
- Soto, F. (2015). Hidroponía familiar en sustrato: Hágalo fácil. *Ministerio de Agricultura y Ganadería y Universidad de Costa Rica*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10809.pdf>

- Sumpsi, J. (2010). Los retos de la agricultura para alimentar al mundo en 2050. *Tiempo de paz* 1(106): 37-48. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/autor?codigo=90875>
- Tapia, J. (2016). *Producción Con tres variedades de lechuga en dos sistemas hidropónicos*. [Tesis de licenciatura Universidad de Guayaquil] <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/14085>
- Tavares, A., Sousa, I., da Silva, T., Holanda, R., Braga, C., & Almeida, R. (2018). Evapotranspiration, water use efficiency and crop coefficient of three lettuce varieties grown in a tropical region. *Sociedad de Ciencias Agrarias de Portugal*. 41 (3): 798-805. <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/16744/13636>
- Touliatos, Di., Dodd, I., & McAinsh, M. (2016). Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. *Food and Energy Security* 1(1): 184–91. <https://doi.org/10.1002/fes3.83>
- Urrestarazu, M., Gómez, A., Valera, L., Salas, M., Mazuela, P. (2004). La calefacción de la disolución nutritiva en cultivos hortícolas. *Vida rural* 1 (1): 48-56. https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_vrural%2FVrural_2004_185_48_56.pdf
- Vintimilla, G. (2013). *Uso de materiales para jardines verticales en espacios de interiores*. [Trabajo Final de Graduación, Universidad de Azuay] <http://201.159.222.99/bitstream/datos/2601/1/09789.pdf>
- Wortman, S., Douglass, M., & Kindhart, J. (2016). Cultivar, growing media, and nutrient source influence strawberry yield in a vertical, hydroponic, high tunnel system. *HortTechnology* 26(4): 66–73. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.26.4.466>
- Zabel, F., Delzeit, R., Schneider, J., Seppet, F., & Mauser, W. (2019). Global impacts of future cropland expansion and intensification on agricultural markets and biodiversity. *Nature communications* 10(28): 1-10. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10775-z.pdf>
- Zambrano, A. (2014). *Estudio comparativo de tres genotipos de lechuga (lactuca sativa l.) cultivadas en tres sistemas de producción hidropónica*. [Trabajo Final de Graduación,

Universidad de Guayaquil]
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/6067/1/ZAMBRANOMoraARMANDO.pdf>

Anexos

Solamente la altura de las plantas en el I ciclo resultó no significativo, para las demás pruebas se puede concluir que los promedios en los tratamientos no son iguales, con un nivel de significancia del 5%.

Anexo 1. Probabilidad asociada a la hipótesis de igualdad de promedios en ambos ciclos de producción

| Ciclo de producción | Probabilidad | Variables de medición | | | | | | |
|---------------------|--------------|-----------------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | | Número de hojas | Altura de plantas | IAF | Peso fresco total | Peso fresco hojas | Peso fresco tallo | Peso seco/planta |
| I Ciclo | Prob > F | <,0001* | 0,1044 | 0,0058* | <,0001* | <,0001* | <,0001* | <,0001* |
| II Ciclo | Prob > F | <,0001* | <,0001* | <,0001* | <,0001* | <,0001* | <,0001* | <,0001* |

*Promedios significativos

Anexo 2. Prueba de Tukey con las variables evaluadas del primer ciclo de producción.

| Ciclo | Variable | Tratamiento | | Media de mínimos cuadrados |
|---------|-------------------|-------------|----|----------------------------|
| I Ciclo | Numero de hojas | 1-MC | A | 17,16 |
| | | 2-MG | B | 15,19 |
| | | 3-SG | B | 15,02 |
| | IAF | 1-MC | A | 89073,8 |
| | | 2-MG | AB | 66455,66 |
| | | 3-SG | B | 36884,7 |
| | Peso fresco total | 1-MC | A | 181,74 |
| | | 2-MG | B | 134,55 |
| | | 3-SG | B | 132 |
| | Peso fresco hojas | 1-MC | A | 138,9 |
| | | 2-MG | B | 105,43 |
| | | 3-SG | B | 96,97 |
| | Peso fresco tallo | 1-MC | A | 27,46 |
| | | 2-MG | B | 17,41 |
| | | 3-SG | B | 14,75 |
| | Peso seco/planta | 1-MC | A | 9,05 |
| | | 2-MG | B | 7,56 |
| | | 3-SG | B | 7,34 |

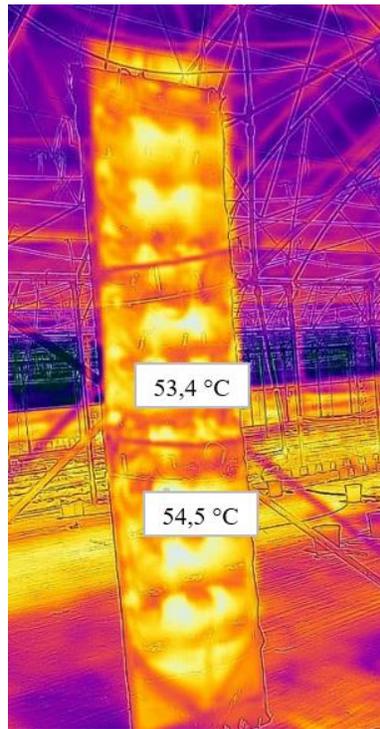
Anexo 3. Prueba de Tukey con las variables evaluadas del segundo ciclo de producción.

| Ciclo | Variable | Tratamiento | | Media de mínimos |
|------------------|-------------------|-------------|------|------------------|
| II Ciclo | Numero de hojas | 1-MC | A | 16,61 |
| | | 2-MG | B | 13,66 |
| | | 3-SG | C | 10,22 |
| | Altura de plantas | 1-MC | A | 21,84 |
| | | 2-MG | A | 20,76 |
| | | 3-SG | B | 14,75 |
| | IAF | 1-MC | A | 43328,6 |
| | | 2-MG | B | 17598,42 |
| | | 3-SG | C | 10955,51 |
| | Peso fresco total | 1-MC | A | 94,63 |
| | | 2-MG | B | 41,53 |
| | | 3-SG | C | 14,44 |
| | Peso fresco hojas | 1-MC | A | 83,35 |
| | | 2-MG | B | 36,29 |
| | | 3-SG | C | 12,7 |
| | Peso fresco tallo | 1-MC | A | 11,05 |
| | | 2-MG | B | 5,23 |
| | | 3-SG | C | 1,66 |
| Peso seco/planta | 1-MC | A | 4,16 | |
| | 2-MG | B | 1,99 | |
| | 3-SG | C | 0,89 | |

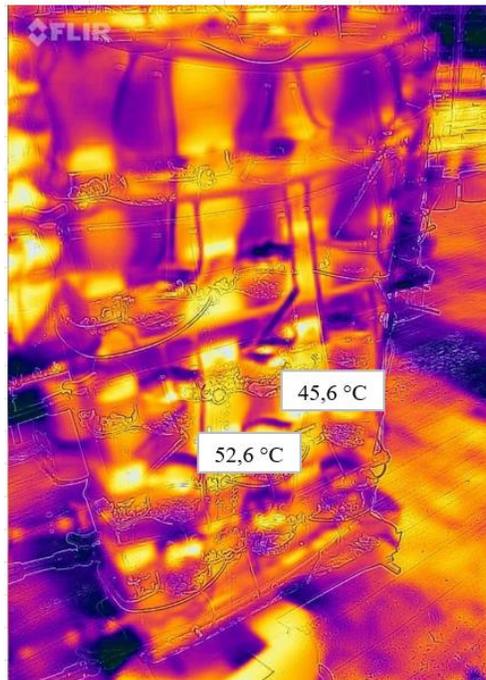
Anexo 4. Temperatura del sistema de manga colgante (1-MC).



Anexo 5. Temperatura del sistema de malla geotextil (2-MG)



Anexo 6. Temperatura del sistema “Green Wall” (3-SG)



Anexo 7. Costo y requerimiento de los materiales variables en el establecimiento del cultivo de lechuga var. BG

| Material | Tratamiento | Cantidad requerida (L o unidades) | Costo unitario | Costo total |
|------------------|-------------|-----------------------------------|----------------|-------------|
| Sustrato | 1-MC | 330 | ¢61,54 | ¢20 308,20 |
| | 2-MG | 180 | ¢61,54 | ¢11 077,20 |
| | 3-SG | 288 | ¢61,54 | ¢17 723,52 |
| Plantas | 1-MC | 144 | ¢20,00 | ¢2 880,00 |
| | 2-MG | 180 | ¢20,00 | ¢3 600,00 |
| | 3-SG | 108 | ¢20,00 | ¢2 160,00 |
| Mangas colgantes | 1-MC | 6 | ¢200,00 | ¢1 200,00 |
| Malla geotextil | 2-MG | 6 | ¢9 626,00 | ¢57 756,00 |

Anexo 8. Costo de los materiales variables en el establecimiento del cultivo de lechuga var. BG.

| Tratamiento | Sustrato | Plantas | Estructura del sistema | TOTAL |
|-------------|------------|-----------|------------------------|------------|
| 1-MC | ¢20 308,20 | ¢2 880,00 | ¢1 200,00 | ¢24 388,20 |
| 2-MG | ¢11 077,20 | ¢3 600,00 | ¢57 756,00 | ¢72 433,20 |
| 3-SG | ¢17 723,52 | ¢2 160,00 | ¢180 000,00 | ¢199 883,5 |

Anexo 9. Costo y requerimiento de los materiales variables en el sistema de riego.

| Material | Tratamiento | Cantidad requerida (unidades) | Costo unitario | Costo total |
|----------------------|-------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| "T" 16 mm | 1-MC | 18 | ¢840 | ¢15 120 |
| | 2-MG | 18 | ¢840 | ¢15 120 |
| | 3-SG | 30 | ¢840 | ¢25 200 |
| Tapón final 16 mm | 1-MC | 18 | ¢470 | ¢8 460 |
| | 2-MG | 18 | ¢470 | ¢8 460 |
| | 3-SG | 30 | ¢470 | ¢14 100 |
| Llave en línea 16 mm | 1-MC | 18 | ¢470 | ¢8 460 |
| | 2-MG | 24 | ¢470 | ¢11 280 |
| | 3-SG | 36 | ¢470 | ¢16 920 |
| Codo 16 mm | 1-MC | 6 | ¢620 | ¢3 720 |
| | 2-MG | 6 | ¢620 | ¢3 720 |

| | | | | |
|-----------|------|----|------|---------|
| | 3-SG | 18 | ¢620 | ¢11 160 |
| Llave en | 1-MC | 6 | ¢470 | ¢2 820 |
| línea con | 2-MG | 18 | ¢470 | ¢8 460 |
| acople | 3-SG | 36 | ¢470 | ¢16 920 |

Anexo 10. Costo de los materiales variables en el sistema de riego

| Tratamiento | "T" 16 mm | Tapón final 16 mm | Llave en línea 16 mm | Codo 16 mm | Llave en línea con acople | TOTAL |
|-------------|------------|----------------------|-------------------------|---------------|---------------------------------|------------|
| 1-MC | ¢15 120,00 | ¢8 460,00 | ¢8 460,00 | ¢3 720,00 | ¢2 820,00 | ¢38 580,00 |
| 2-MG | ¢15 120,00 | ¢8 460,00 | ¢11 280,00 | ¢3 720,00 | ¢8 460,00 | ¢47 040,00 |
| 3-SG | ¢25 200,00 | ¢14 100,00 | ¢16 920,00 | ¢11 160,00 | ¢16 920,00 | ¢84 300,00 |

Anexo 11. Costo del agua aplicada por tratamiento

| Tratamiento | Cantidad de plantas | L agua empleados | m ³ agua empleados | Costo ¢/m ³ | Costo total |
|-------------|------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------|-------------|
| 1-MC | 24 | 6114 | 6,114 | ¢2 063 | ¢12 613 |
| 2-MG | 30 | 5853 | 5,853 | ¢2 063 | ¢12 075 |
| 3-SG | 18 | 4201 | 4,201 | ¢2 063 | ¢8 667 |

Anexo 12. Costo de los materiales variables empleados en cada tratamiento.

| Tratamiento | Establecimiento del cultivo | Sistema de riego | Agua | TOTAL |
|-------------|--------------------------------|------------------|---------|----------|
| 1-MC | ¢24 388 | ¢38 580 | ¢12 613 | ¢75 581 |
| 2-MG | ¢72 433 | ¢47 040 | ¢12 075 | ¢131 548 |
| 3-SG | ¢199 884 | ¢84 300 | ¢8 667 | ¢292 851 |

Anexo 13. Tiempo requerido y costo para labores de mantenimiento variables en cada tratamiento.

| Tratamiento | Tiempo (hrs) | Tiempo (min) | Costo/hora | Costo total |
|-------------|--------------|--------------|------------|-------------|
| 1-MC | 05:18:00 | 318 | 1331 | ₡ 7 054 |
| 2-MG | 05:06:00 | 306 | 1331 | ₡ 6 788 |
| 3-SG | 04:10:00 | 250 | 1331 | ₡ 5 546 |

Anexo 14. Tiempo requerido y costo para labores de cosecha variables en cada tratamiento.

| Tratamiento | Tiempo (hrs) | Tiempo (min) | Costo/hora | Costo total |
|-------------|--------------|--------------|------------|-------------|
| 1-MC | 03:28:00 | 208 | 1331 | ₡ 4 614 |
| 2-MG | 01:43:00 | 103 | 1331 | ₡ 2 285 |
| 3-SG | 01:25:00 | 85 | 1331 | ₡ 1 886 |

Anexo 15. Costo de la mano de obra variable por tratamiento

| Tratamiento | Labores mantenimiento | Labores cosecha | TOTAL |
|-------------|-----------------------|-----------------|----------|
| 1-MC | ₡ 7 054 | ₡ 4 614 | ₡ 11 668 |
| 2-MG | ₡ 6 788 | ₡ 2 285 | ₡ 9 073 |
| 3-SG | ₡ 5 546 | ₡ 1 886 | ₡ 7 431 |

Anexo 16. Especulación de ganancias percibidas según rendimientos obtenidos en el primer ciclo de producción para los distintos tratamientos.

| Tratamiento | Ganancias obtenidas | | | | | |
|-------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 ciclo | 2 ciclos | 3 ciclos | 4 ciclos | 5 ciclos | 8 ciclos |
| 1-MC | ₡ 50 400 | ₡ 100 800 | ₡ 151 200 | ₡ 201 600 | ₡ 252 000 | ₡ 403 200 |
| 2-MG | ₡ 63 000 | ₡ 126 000 | ₡ 189 000 | ₡ 252 000 | ₡ 315 000 | ₡ 504 000 |
| 3-SG | ₡ 37 800 | ₡ 75 600 | ₡ 113 400 | ₡ 151 200 | ₡ 189 000 | ₡ 302 400 |