

Capítulo VII

124

Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá

Diego Alejandro Salinas Velandia
Julio Ricardo Galindo Pacheco
Edwin Andrés Villagrán Munar

Introducción

La horticultura requiere un cambio para enfrentar los problemas de seguridad alimentaria, seguridad nutricional, viabilidad ambiental y viabilidad económica que producen los sistemas agroalimentarios tradicionales. Estos no cumplen las expectativas actuales de la población mundial, pues no han generado el bienestar social que se espera de ellos. No se ha logrado abastecer alimentos asequibles y saludables y, por el contrario, se han generado impactos importantes a nivel medioambiental, así como en la salud pública y la justicia social. (Béné, 2019).

Todas las formas de malnutrición son el resultado de dietas deficientes, limitadas en el consumo de hortalizas, con conocimientos inadecuados, producciones alimentarias carentes de productos inocuos y con entornos insalubres (Degli et al., 2021). Para 2017, alrededor de 820 millones de personas seguían pasando hambre, más de 2.000 millones tenían carencias de vitaminas o minerales esenciales, cerca de 1.900 millones de adultos padecían sobrepeso y obesidad, y alrededor del 45 % de la mortalidad de los niños menores de cinco años estaba relacionada con la desnutrición (Committee on World Food Security, 2017). Al mismo tiempo, se estima que, en 2020, la emaciación¹ seguía amenazando la vida de 45,4 millones de niños menores de cinco años en todo el mundo, que el retraso en el crecimiento² ya había afectado a 149,2 millones, y que 38,9 millones de niños menores de cinco años están afectados por sobrepeso (United Nations International Children's Emergency Fund [Unicef] et al., 2021). Es probable que el impacto de la pandemia de la Covid-19 haya exacerbado estas cifras.

Las actividades relacionadas con los actuales sistemas agroalimentarios tienen un importante impacto medioambiental, acentuado en las producciones convencionales de productos de ciclo corto. Según la Oficina Europea de Medio Ambiente (OEMA), los sistemas agroalimentarios son responsables del

- 1 La emaciación en los niños es el resultado potencialmente mortal de una ingesta deficiente de nutrientes o de una enfermedad. Los niños que sufren emaciación tienen la inmunidad debilitada, son susceptibles de sufrir retrasos en el desarrollo a largo plazo y se enfrentan a un mayor riesgo de muerte, especialmente cuando la emaciación es grave (Unicef et al., 2021).
- 2 Los niños que sufren de retraso en el crecimiento pueden no alcanzar nunca su máxima estatura posible y sus cerebros pueden no desarrollar nunca todo su potencial cognitivo. Estos niños comienzan su vida con una marcada desventaja: se enfrentan a dificultades de aprendizaje en la escuela, ganan menos cuando son adultos y se encuentran con barreras para participar en sus comunidades (Unicef et al., 2021).

26 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo, además de que contribuyen con la contaminación de recursos no renovables y aceleran la pérdida de la biodiversidad. Actualmente, el agua utilizada para riego representa cerca del 70 % de toda el agua dulce destinada al uso humano, y se prevé un aumento del 19 % en el consumo de agua para la agricultura a 2050 (Serrano-Carreón et al., 2022). Un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se refiere a la necesidad de reducir los desequilibrios de nitrógeno y fósforo para, asimismo, reducir la contaminación de las aguas dulces, subterráneas y costeras (Alvarado, 2021). El uso generalizado de plaguicidas persistentes y sistémicos se ha convertido en uno de los principales impulsores de la disminución de la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el control natural de plagas (Jacquet, et al., 2022; Geiger et al., 2010; Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019), y ha contaminado los suelos y las aguas a largo plazo (Pietrzak et al., 2019).

Los esfuerzos realizados en el pasado para hacer frente al hambre y a la malnutrición en el mundo, y que se habían centrado en producir más alimentos a escala industrial, deben además tener en cuenta variables medioambientales, nutricionales, de inocuidad y de justicia social, por lo cual es necesario transitar a sistemas productivos alternativos. La horticultura protegida es una opción sostenible, productiva y rentable. Debido a que permite un uso más eficiente de los recursos y se presta para generar modelos de producción circulares, con la posibilidad de producir alimentos inocuos y nutritivos, la horticultura en ambiente protegido es una alternativa de transición a una agricultura circular de los sistemas agroalimentarios basados en cultivos de ciclo corto.

La producción en ambiente protegido permite mejores cosechas, al brindar la posibilidad de controlar los factores microclimáticos que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas. Al mismo tiempo, genera una barrera física para evitar infestaciones por plagas y cuenta con sistemas de riego que son utilizados en función de las necesidades del cultivo. Por lo tanto, un modelo productivo bajo ambiente protegido permite, con mayor facilidad, una gestión más eficiente de los recursos, al utilizar menor cantidad de plaguicidas y al hacer un uso racional del agua y los fertilizantes. Además, la agricultura protegida es una de las técnicas más productivas. Según Mechaqrane y Ouazzani Chahidi (2021), su rendimiento por superficie cultivada es 10 veces mayor que el del cultivo en campo libre, y la implementación de modelos circulares se facilita en producciones bajo cubierta. La agricultura protegida ha venido en aumento en las últimas tres décadas. Este modelo, que ha tenido gran alcance en la producción de plantas ornamentales, plantas medicinales y cultivos hortícolas, ha logrado proporcionar una cosecha de alta calidad, con un mayor potencial de rendimiento (Batra y Gandhi, 2019).

El alcance de la eficiencia de la agricultura protegida está determinado por su nivel tecnológico. La adopción de tecnologías permite que el modelo tenga mayores capacidades para hacer frente a los retos de sostenibilidad ambiental y económica. Así, un modelo de agricultura protegida que incorpore mayores niveles tecnológicos tendrá mejores perspectivas productivas que un sistema con limitaciones (Montero et al, 2013). Los sistemas de funcionamiento de la agricultura en ambiente protegido dependen de su capacidad, su orientación y sus materiales, así como del viento, la radiación y los métodos de control de sus parámetros climáticos interiores (Mortensen, 1986; Pontikakos et al., 2006).

Las estructuras de agricultura protegida se pueden clasificar en dos: activas y pasivas, dependiendo del nivel tecnológico utilizado para adaptar las condiciones microclimáticas, según los requerimientos de los sistemas productivos. En las estructuras pasivas, la gestión del microclima se limita a la ventilación natural y a las técnicas de sombreado o blanqueo de la cubierta, por lo cual es un tipo de estructura que predomina en climas no extremos y poco cambiantes. Las estructuras activas gestionan el comportamiento de la temperatura, la humedad, la radiación y los niveles de CO₂ en el interior del invernadero, empleando tecnologías para ello (Villagrán et al., 2021), por lo cual suelen utilizarse en climas templados, en donde las variaciones de sus condiciones climáticas son constantes.

En la Sabana de Bogotá, la producción de hortalizas de hoja ha venido transitando de una agricultura a cielo abierto hacia un modelo de agricultura protegida de bajo nivel tecnológico. Los horticultores se han concentrado, en gran medida, en el municipio de Tenjo, donde se utilizan cultivos bajo invernadero en un total de 362 hectáreas y donde se emplean sistemas hidropónicos, que les han permitido mejorar sus canales de comercialización.

Los horticultores de Tenjo ocupan el 45 % de los predios con invernaderos, lo cual se explica porque son un gran número de pequeñas explotaciones de economía familiar (Marín & Maury, 2018). La producción de lechuga hidropónica permite un uso más intensivo de las áreas, en una zona donde la disponibilidad del suelo es casi nula debido a su alto costo. De manera similar, el agua limpia que requiere la hidroponía es también costosa, pero una ventaja importante del sistema hidropónico es que utiliza este recurso en forma más eficiente que un cultivo en suelo. Sin embargo, la mayoría de las estructuras de ambiente protegido en Tenjo son de categoría pasiva y con niveles tecnológicos muy bajos, y en muchos casos son sencillas y solo cumplen la labor de proteger las plantas de la lluvia, por lo cual la calidad en la regulación del microclima es deficiente y no se alcanzan todas las ventajas que la agricultura

protegida de mayor nivel tecnológico permite. Por esta razón, desde AGROSAVIA se ha venido trabajando en una propuesta de modelo tecnológico en horticultura circular vertical, bajo ambiente protegido, para mejorar el nivel tecnológico de los horticultores en la Sabana de Bogotá. El objetivo de este capítulo es describir la experiencia investigativa en el desarrollo de dicho modelo productivo, que podría mejorar el nivel tecnológico de los horticultores en esta región.

Agricultura vertical como sistema de producción de alimentos

Aunque la agricultura vertical ha tenido un auge en los últimos años, como una alternativa para intensificar la producción agrícola, vale la pena mencionar que esta práctica de cultivo en realidad empezó a emplearse en algunas civilizaciones antiguas. Existe evidencia de que, en Mesopotamia, más exactamente en Babilonia, hace más de 2.500 años, se construyeron jardines colgantes (Hindle, 2012). Asimismo, el término agricultura vertical fue utilizado por primera vez en registros científicos por Gilbert Ellis Bailey, en 1915, en su libro *Vertical farming*. En este documento se describían algunos aspectos del cultivo vertical usado para la producción de especies vegetales en el interior de edificios de varios pisos (Rees, 1981).

En el siglo XXI, la agricultura vertical, en cuanto técnica, surge como una alternativa comercial interesante para la producción de alimentos cerca de las ciudades o en regiones con condiciones biofísicas marginales. Por lo tanto, las técnicas de cultivo vertical se apoyan en gran medida en las tecnologías emergentes existentes para la aplicación de agua de riego y fertirriego, y para el control de las condiciones ambientales (Kalantari et al., 2018). Por ello, en la actualidad las plantaciones verticales se usan en diferentes contextos y bajo diferentes niveles tecnológicos de infraestructura y equipamiento, sin embargo, independiente del nivel tecnológico o del contexto, una realidad probada científicamente es que la agricultura vertical permite una mayor producción de alimentos por unidad de área disponible (Zaręba et al., 2021).

Técnicas de cultivo vertical

Algo muy relevante en el establecimiento de sistemas de producción vertical es la técnica seleccionada para realizar los procesos de siembra y nutrición de las plantas de cultivo (tabla 22).

Tabla 22. Algunas técnicas de siembra para cultivo vertical

Técnica de siembra	Características
Cultivos en sustrato o cultivos sin suelo (css).	Esta práctica consiste en usar sustratos inertes (turba, piedra pómez, vermiculita, fibra de coco, cascarilla de arroz, entre otros) dispuestos en contenedores o canaletas plásticas. En el sustrato se siembra la plántula y mediante pulsos de riego se le añade una solución nutritiva con los elementos esenciales para su crecimiento y desarrollo normal (Quintero et al., 2011).
Hidroponía.	Esta técnica de siembra se caracteriza por usar el agua como sistema de soporte para la nutrición y establecimiento del cultivo. Se pueden usar estanques llenos de agua con oxigenación y ozono, donde adicionalmente se aplican los fertilizantes para la nutrición del cultivo. Esta técnica se conoce como sistema de raíz flotante. Por otro lado, también puede ser un sistema basado en canaletas o tuberías, por donde se hace fluir agua pura y agua con fertilizantes. Los pulsos de riego y fertirriego se establecen de acuerdo a la demanda hídrica y nutricional del cultivo (Harris, 1992).
Acuaponía.	Este tipo de sistema de siembra busca optimizar las relaciones simbióticas entre peces y plantas. La acuaponía surge de la implementación de un sistema parcialmente autosuficiente en el que se busca que los peces del estanque puedan producir desechos ricos en nutrientes que posteriormente son usados por las plantas (Goddek et al., 2019).
Aeroponía.	Es una técnica inventada por la NASA en la década de los noventa para cultivar plantas sin suelo. Su principio de funcionamiento está basado en la nebulización del agua mediante microaspersores con boquillas diminutas o pulverizadores de agua. El agua en forma de niebla es aplicada directamente sobre el sistema radicular de las plantas.

Fuente: Elaboración propia

Tipologías de granja vertical

Agricultura vertical a campo abierto

Este sistema de cultivo es adaptable a contextos urbanos, periurbanos y rurales, y su objetivo es garantizar el acceso a alimentos vegetales a los miembros de una familia o de una comunidad: esto dependerá del tamaño de la granja vertical. Este tipo de sistema busca maximizar la producción hortícola por unidad de área, por lo tanto, se requiere de una infraestructura básica, entre las que cabe mencionar el sistema vertical de siembra y el sistema de riego y fertilización (figura 47). Estas experiencias se desarrollan a campo abierto y,

por ende, tienen la desventaja de ser vulnerables a las condiciones climáticas locales y al ataque de plagas y enfermedades. Sin embargo, cuentan con la ventaja de ser sistemas asequibles para un mayor número de individuos con menor capacidad económica.



Figura 47. Agricultura vertical a campo abierto.

Fuente: Elaboración propia

Agricultura vertical en ambiente protegido

Este tipo de sistema se conoce también como agricultura protegida vertical (APV) y consiste en un cultivo establecido bajo condiciones de invernadero, en las que se incluyen estructuras verticales de siembra, ya sea para aeropónica o hidroponía. Respecto a los sistemas anteriormente descritos, es importante mencionar que este es menos vulnerable a las condiciones climáticas externas, y que con un adecuado manejo de áreas de ventilación puede limitar al máximo la presencia de plagas y enfermedades limitantes para el crecimiento de los cultivos (Candia Pacheco & Quiroga Sossa, 2018). Los invernaderos

usados para este tipo de producción pueden ser de baja o media tecnología. Es importante contar con sistemas de riego y fertirriego precisos y con sistemas de recirculación de soluciones nutritivas que permitan aumentar la eficiencia en el uso de fertilizantes (figura 48).

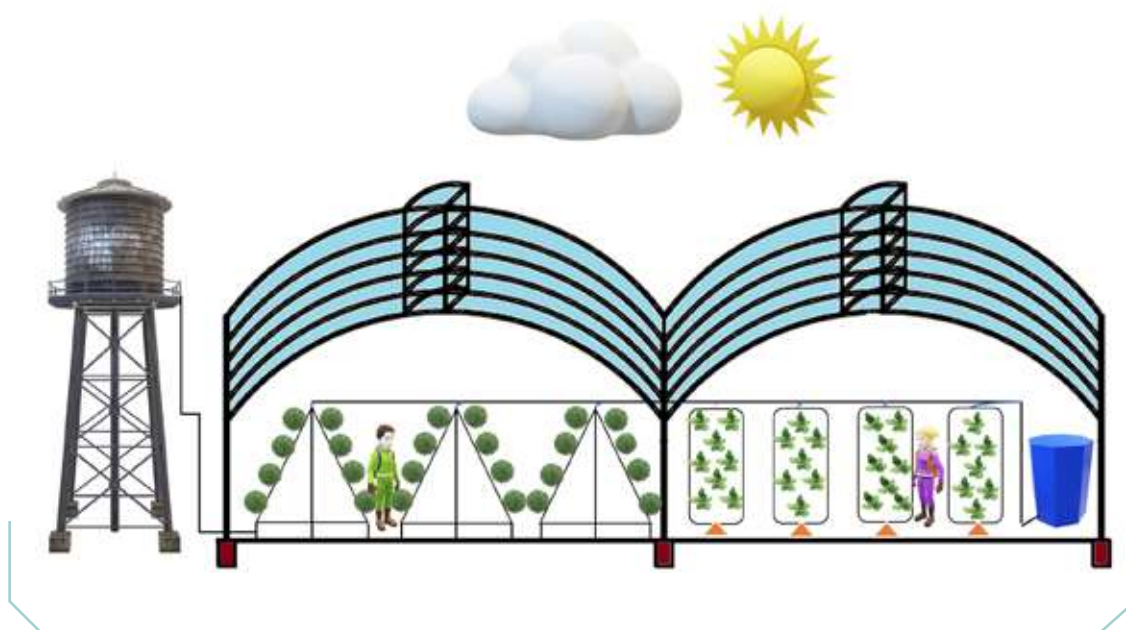


Figura 48. Agricultura vertical en ambiente protegido.

Fuente: Elaboración propia

Agricultura vertical en granjas modulares de alta tecnología (*indoor farms*)

Esta tipología de sistema se desarrolla completamente en ambientes interiores, para lo cual pueden usarse bodegas o contenedores acondicionados con sistemas verticales de siembra, y donde, además, se cuenta con un control total de las condiciones de temperatura, humedad, nivel de luminosidad y concentración de CO_2 . Por lo tanto, con este sistema se pueden producir alimentos vegetales bajo cualquier condición climática a nivel mundial. Estas granjas modulares cuentan con equipos y controladores para la gestión climática y el control preciso de riego y fertirriego. Asimismo, el registro de datos de crecimiento y desarrollo de las plantas es continuo y se usa para la toma de decisiones de manejo agronómico (Zaręba et al., 2021). Es importante mencionar que este tipo de sistema, altamente tecnológico, busca el continuo uso de energías renovables

para satisfacer parcial o totalmente el consumo energético de la granja vertical (figura 49). Por último, dentro de sus desventajas principales se debe mencionar que es demasiado costoso, por lo cual es poco asequible para un gran número de agricultores.

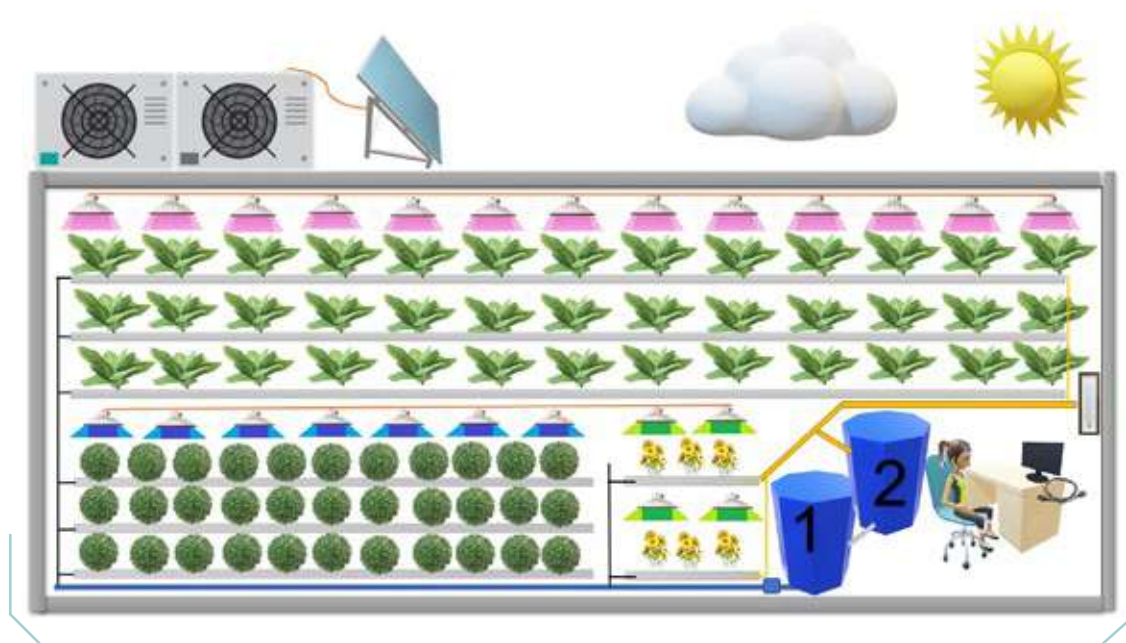


Figura 49. Agricultura vertical en granja modular de alta tecnología.

Fuente: Elaboración propia

Experiencia con un modelo de producción de lechuga en agricultura vertical

Infraestructura

La experiencia de agricultura vertical con la técnica de hidroponía se realizó en un invernadero pasivo de cubierta plástica de 110 m², cuyos costados laterales y frontales se cubrieron con una malla antiinsecto (figura 50).



Figura 50. Estructura de invernadero usado para producción vertical.

Foto: Edwin Villagrán

Para el sistema hidropónico, se utilizó una estructura de frente triangular, proyectado a profundidad en dos vertientes o laterales (2,5 m de base, 2,8 m de alto y 6 m de largo), en la cual se colocaron los tubos de 3 ¼" de diámetro distanciados cada 25 cm, y perforados con agujeros de 3,6 cm de diámetro cada 15 cm (40 agujeros/tubo) (figura 51). Se contó con once tubos ubicados a diferentes alturas (niveles) por cada lateral de la estructura. La alimentación hídrica se hizo de la parte alta hacia abajo. La solución nutritiva se subió a la punta de la estructura mediante bombeo, y bajó por gravedad desde el último hasta el primer tubo en la base, haciendo un recorrido en zig-zag, considerando que los tubos estaban interconectados por un solo lado mediante tubos de PVC de ½". Se aplicó el sistema hidropónico de producción por raíz flotante, para lo cual los tubos de PVC de la estructura se llenaron a la mitad de su capacidad con la solución nutritiva. De este modo, una parte del sistema radicular permanecía aireado, mientras otra parte se sumergía en la solución y aprovechaba sus nutrientes.

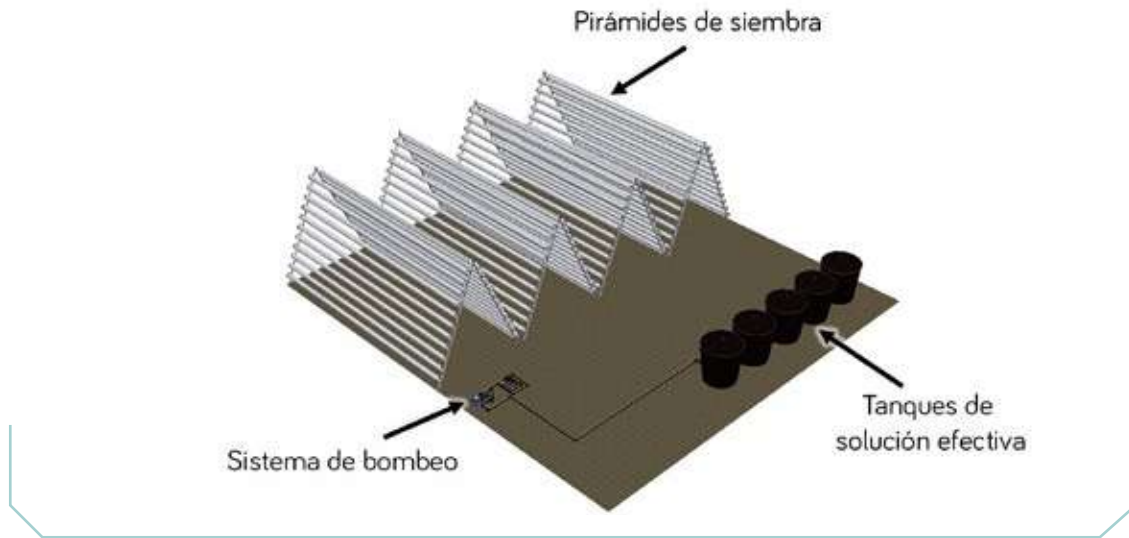


Figura 51. Estructura de dos vertientes para el soporte de los tubos hidropónicos.

Fuente: Elaboración propia

El sistema de riego se presurizó con una electrobomba y la aplicación de agua y solución nutritiva de fertilización fue automatizada mediante un controlador de riego de ocho estaciones (figura 52).

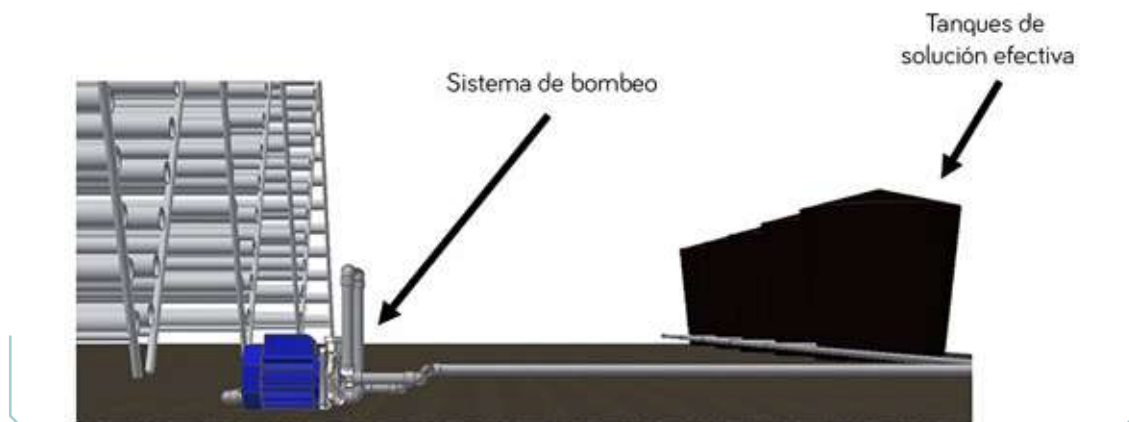


Figura 52. Sistema de aplicación de riego y fertilizantes.

Fuente: Elaboración propia

Manejo del cultivo

Selección del material de siembra

Es importante que el material de siembra esté certificado, con el fin de garantizar buena calidad y evitar al máximo futuros problemas fitosanitarios, fisiológicos y genéticos. Por lo tanto, el establecimiento donde se produce el material debe cumplir con las buenas prácticas agrícolas, lo cual debe estar respaldado por una entidad certificadora, como el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Los ensayos realizados en el C. I. Tibaitatá de AGROSAVIA (Mosquera, Cundinamarca) utilizaron los materiales de lechuga tipo batavia (Iceberg), verde crespa (Vera) y crespa morada (Carmim), a los cuales se hace referencia más adelante.

En el trasplante, las plantas pueden diferir por su tamaño y vigor, y su desarrollo posterior en el cultivo hidropónico frecuentemente mantendrá o, incluso, aumentará dichas diferencias. Por ello, es importante hacer una selección inicial del material, de modo que sea lo más uniforme posible.

Por motivo del trasplante, las plantas pueden sufrir lesiones que les impedirán desarrollarse normalmente. Por lo tanto, es conveniente contar con una reserva de plantas para sustituir aquellas que no puedan establecerse adecuadamente en el cultivo hidropónico. Por ejemplo, puede estimarse entre un 5 y un 10 % el material adicional que debe estar listo para suplir descartes por selección (vigor y sanidad) y reponer posibles daños en el trasplante.

Manejo del agua

En general, se ha observado que el consumo de agua en un sistema hidropónico es menor al que se presenta para un mismo número de plantas en sistemas de producción en suelo a campo abierto. Esto es importante, considerando que la demanda de agua en el mundo está aumentando, debido al incremento de la población humana y al calentamiento global (Ercilla-Montserrat et al., 2018), por lo que se requieren alternativas más eficientes en el uso de este recurso.

En parte, la razón por la cual se requiere menos agua en un sistema cerrado consiste en que las paredes de la estructura ayudan a reducir el impacto del viento, lo cual contribuye a reducir la evapotranspiración del cultivo. Además, en cuanto las arvenses no intervienen en estos sistemas, no habrá transpiración vegetal por parte de esas fuentes. Adicionalmente, no hay pérdidas de percolación, como ocurre en el suelo, sino que, más bien, puede darse el reciclaje de agua (Zimmermann & Fischer, 2020). El techo de la estructura ayuda

a atenuar el impacto de la radiación solar, lo cual puede reducir la transpiración excesiva de las plantas. La recirculación de agua y la mínima descarga en los sistemas hidropónicos se ha validado en múltiples cultivos, incluyendo papa y batata (Wheeler, 2017).

De acuerdo con la experiencia de AGROSAVIA, para un ciclo de cultivo de lechuga crespa verde de 45 días, se requieren aproximadamente 4,83 l de agua por planta. También es importante resaltar que 30 días después del trasplante se presenta un mayor consumo hídrico (figura 53). Por último, la eficiencia aproximada en el uso de agua fue de 25 gl^{-1} , comparable con los resultados de Michelin et al. (2020).

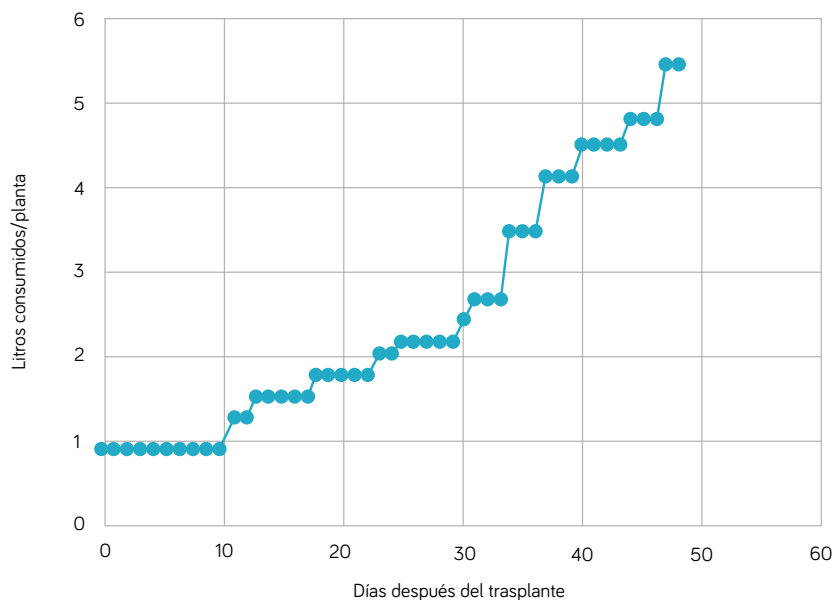


Figura 53. Curva del consumo acumulado de agua por planta de lechuga verde crespa.

Fuente: Elaboración propia

Manejo de la nutrición vegetal

Con el consumo de solución nutritiva a lo largo del ciclo de cultivo de la lechuga crespa, y considerando las variaciones en la dosificación de nutrientes, que se hizo mayor con el desarrollo vegetal, se obtuvo el consumo por nutrientes que se presenta en la figura 54. Se calculó el consumo por unidad de área, considerando la cobertura de la estructura.

Capítulo VII. Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá

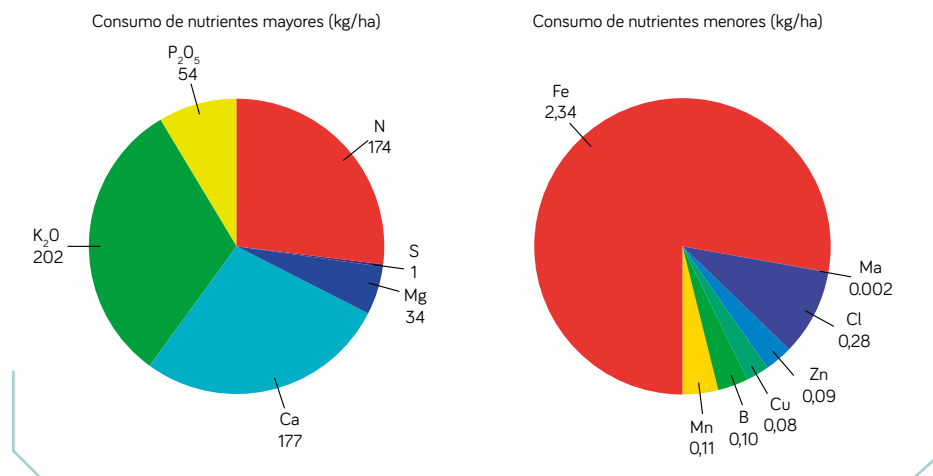


Figura 54. Consumo de nutrientes mayores y menores por el cultivo hidropónico.

Fuente: Elaboración propia

Se destaca que el potasio (K) es el elemento que más consume el cultivo. Entre los elementos menores, el hierro (Fe) sobresale por consumirse incluso en mayor cantidad que el azufre (S). Las propuestas de investigación a futuro se relacionan con el uso de sustitutos de la fertilización mineral o, también, de fuentes orgánicas, como complementos (vermicompuestos) y otras posibilidades, considerando la experiencia que se tiene en la acuicultura (Deepthi et al., 2021). Arcas-Pilz et al. (2021) probaron diferentes sustitutos de la fertilización mineral para el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris*) sin suelo, utilizando subproductos del tratamiento de aguas residuales (estruvita) y la inoculación con *Rhizobium* (bacteria fijadora del nitrógeno [N] atmosférico). De esta forma, lograron surtir las necesidades de N de la planta.

Comportamiento de la radiación fotosintéticamente activa bajo invernadero

Para las condiciones imperantes bajo cubierta plástica, la radiación solar fotosintéticamente activa presentó una distribución asimétrica (figura 55), con un promedio en $380 \mu\text{mol}$ de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y un máximo de 1.200, según las mediciones del sistema de medición de fotosíntesis portátil (LICOR-LI 6800). En estas condiciones protegidas, la radiación acumulada por día se estimó en $16,416 \text{ mol}$ de fotones $\text{m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

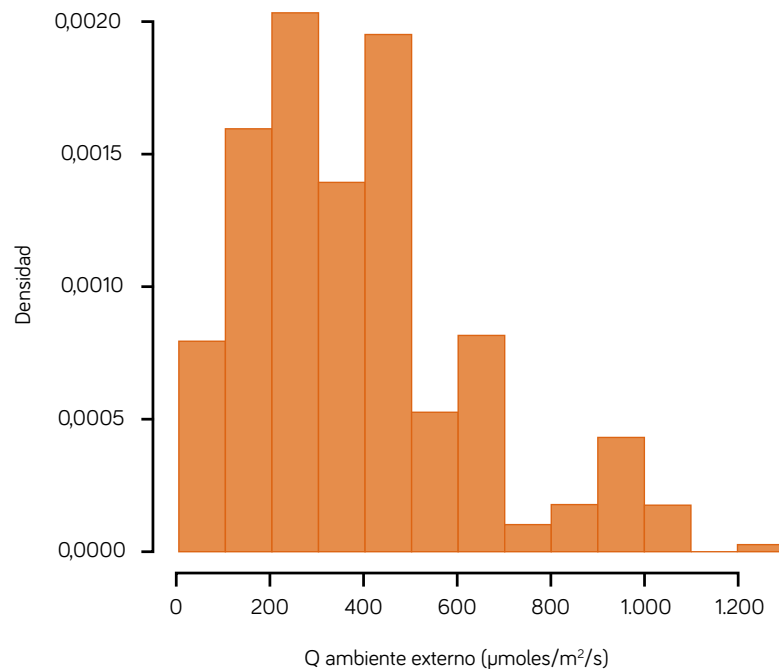


Figura 55. Distribución de la radiación fotosintéticamente activa en condiciones de cubierta plástica en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Fuente: Elaboración propia

El sistema hidropónico puede recibir diferentes niveles de luminosidad, según el número de tubos que estén alineados en una misma ala de la estructura, por lo que el rendimiento a cada nivel puede afectarse en alguna medida. Por tanto, en agricultura vertical, se utilizan *light emitting diodes* (LED) para suministrar la energía lumínica extra que las plantas requieran para su crecimiento (Wheeler, 2017). Con el manejo adecuado de la longitud de onda y de la intensidad, es posible cultivar diferentes especies, incluyendo la patilla (Moosavi-Nezhad et al., 2022). Incluso, con el manejo de diferentes longitudes de onda, se puede mejorar el desempeño de las plantas respecto al resultado con luz solar. Zou et al. (2020) encontraron una razón de efectividad del 83,6 % entre la luz LED de espectro solar y la LED combinada rojo-azul, en cuanto a la fotosíntesis neta evaluada en lechuga.

Obviamente, si se depende de la radiación solar disponible en la zona, es importante conocer sus aportes y comportamiento a lo largo del año. La radiación que puede incidir en el invernadero depende de las condiciones externas, que corresponden, en este caso, a la Sabana de Bogotá, específicamente, en Mosquera, Cundinamarca. La radiación global incidente en las condiciones del

Capítulo VII. Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá

Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, según mediciones de la estación climática del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) en el sitio, es de un promedio de 12,87 MJ/día (figura 56), para el mes de febrero, uno de los meses más soleados del año. Este resultado es similar a las observaciones del Ideam para Bogotá, que promedian al año una radiación de 14 MJ/día, según la estación de El Dorado (figura 57), y que aumenta ligeramente a finales y comienzos de año.

Tratándose de radiación global, es importante estimar la radiación fotosintéticamente activa (RFA). Dicha radiación se define comprendida entre los 400 y 700 nm de longitud de onda y constituye un 46 % de la radiación global filtrada por la atmósfera (figura 58). Por lo tanto, para una radiación media de 14 MJ/día, se estima que la RFA es de 6,3 MJ/día.

Para el ciclo de cultivo de 67 días de una lechuga batavia, se calculó que la radiación fotosintética total fue de 422 MJ. Se estima que el cultivo logra interceptar un 59 % de la radiación recibida durante el ciclo. Sin embargo, el cálculo de la biomasa exige que se consideren las variaciones de la eficiencia en el uso de la luz, como se verá más adelante.



Figura 56. Radiación global diaria en condiciones del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la estación del Ideam en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA

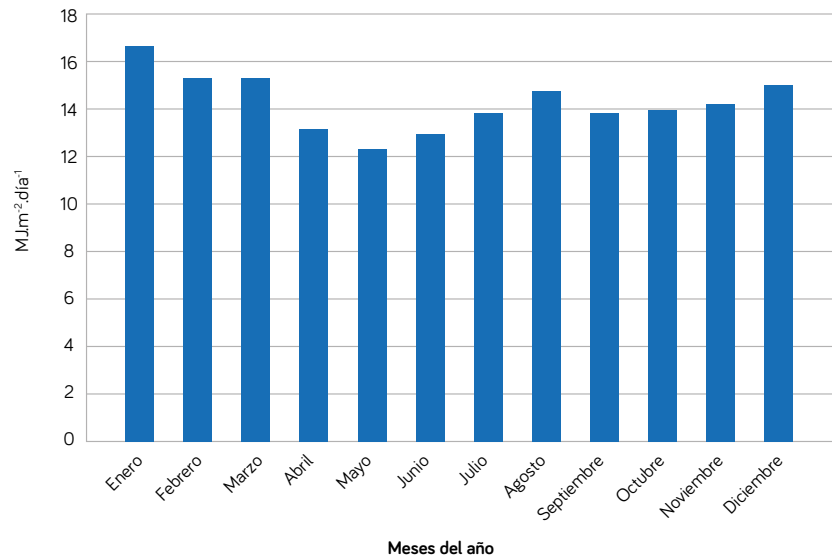


Figura 57. Distribución anual de la radiación global en Bogotá.

Fuente: Elaboración propia

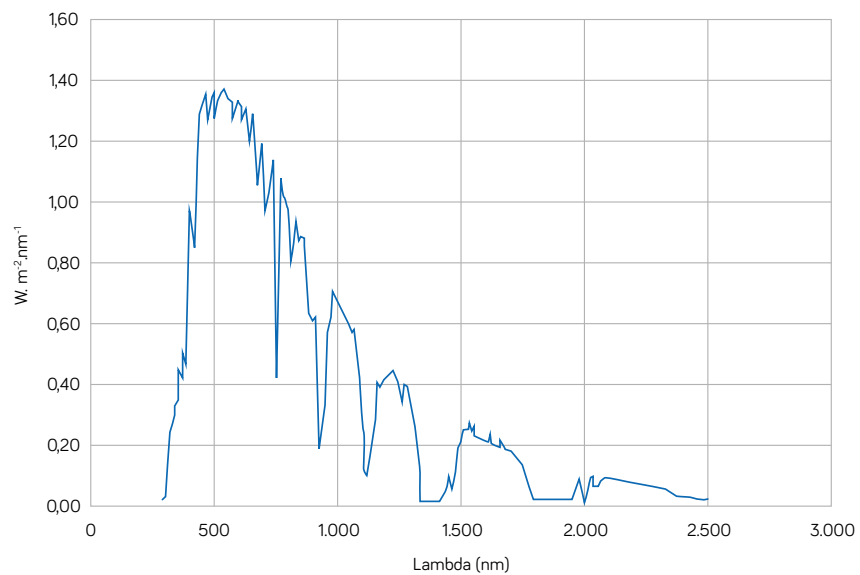


Figura 58. Espectro de la radiación solar filtrada por la atmósfera terrestre.

Fuente: Nick84 - File:Solar_spectrum_ita.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24648395>

Control de las condiciones de pH y CE

La automatización de estos sistemas de producción se puede llevar a cabo con el uso de sensores y actuadores. Con los sensores, se puede monitorear el crecimiento del cultivo, el nivel de pH y la conductividad eléctrica, con frecuencia diaria. Con ayuda de actuadores, se puede suplir el agua según la necesidad de la planta, ajustar los nutrientes según el consumo, y corregir la concentración de oxígeno en la solución nutritiva (Sangeetha & Ezhumalai, 2020). En condiciones del experimento, el pH de la solución nutritiva estuvo alrededor de 6 y la conductividad, en 1440 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Respuesta del cultivo y modelación del crecimiento

Crecimiento del cultivo

El ciclo de vida del cultivo de lechuga se limita al desarrollo vegetativo, con la formación de nuevas hojas, hasta llegar al peso y tamaño deseado del producto para la cosecha (alrededor de los 150 g para lechuga verde crespada). En un experimento en el C. I. Tibaitatá, se contaron, en promedio, alrededor de 19,4 hojas formadas durante este periodo para dicho tipo de lechuga.

Sin embargo, hay un cambio importante en el desarrollo de la planta cuando el número de hojas es tan grande que se produce autosombreamiento, a lo cual la planta responde mejorando su eficiencia fotosintética. El máximo de asimilación observado fue de 17 μmol de CO_2 $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con 1.500 μmol de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, en las fases iniciales del cultivo, mientras que en la fase final se lograron los mismos 17 μmol de CO_2 con solo 500 μmol de fotones.

Este fenómeno sugiere la conveniencia de realizar un seguimiento adecuado al cultivo para identificar el modo de variación de la eficiencia fotosintética según el desarrollo vegetal. También indica que la planta de mayor edad ha tenido un proceso de aclimatación para adaptarse a una mayor condición de sombrío, que surge de la alta densidad de hojas. Como resultado de la aclimatación, la planta puede aprovechar mejor las condiciones de baja luminosidad, para lograr metas de asimilación. Finalmente, también se deduce que la eficiencia en el uso de la luz puede ser variable, en la medida que la respuesta a la RFA no sea lineal.

Intercepción de luz por el cultivo

Para evaluar cuánto de la RFA puede aprovechar un cultivo, es necesario calcular la curva de intercepción de luz. Una forma indirecta de calcularla parte del análisis de cobertura, que se realizó en el sistema hidropónico con ayuda de imágenes fotográficas y de su posterior procesamiento en el computador para estimar el área cubierta por planta (figura 59).



Figura 59. Reconocimiento de bordes (línea amarilla) para calcular el área de cobertura por planta de lechuga verde crespa en un tubo hidropónico.

Foto: Julio Galindo (algoritmo en NetLogo)

Los resultados indican una curva de crecimiento exponencial (figura 60). Aunque para muchos cultivos la curva de cobertura a través del ciclo sigue una forma sigmoidea, para el caso de la lechuga, que no desarrolla fruto, el área foliar llega a su máximo sin que al momento de la cosecha se presente declinación o estabilización (Tei et al., 1996). De manera similar, la relación entre el índice de área foliar (IAF) y la cobertura sigue la forma lineal para el periodo del cultivo desde el trasplante hasta el inicio del máximo desarrollo foliar (Ramírez-García et al., 2012). En el caso del experimento con lechuga batavia, se alcanzó un IAF de 4,21 al final del ciclo de cultivo, y con el modelo de crecimiento en cobertura se pudo estimar la curva del IAF , partiendo de las ecuaciones 1 y 2.

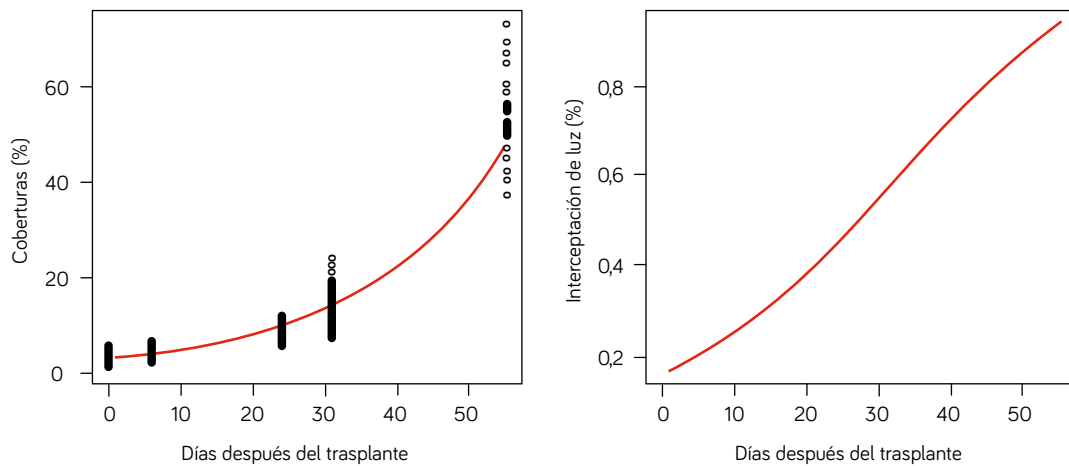


Figura 60. Dinámica de la extinción de luz por cobertura del cultivo. a. Curva de la cobertura del cultivo según los días después del trasplante; b. Curva de interceptación de luz estimada para el ciclo de cultivo de lechuga.

Fuente: Elaboración propia

$$IAF = \alpha \cdot COBER \Rightarrow \alpha = \frac{IAF}{COBER}$$

Ecuación 1

$$\alpha = \frac{4,2131}{47,5218} = 0,0887$$

Ecuación 2

La radiación interceptada (RI) se calculó con base en la ecuación 3, establecida por Monsi y Saeki (1953), aún vigente como aproximación (Campillo et al., 2010).

$$RI = 1 - e^{K \cdot IAF}$$

Ecuación 3

donde K se refiere al coeficiente de extinción de luz por la cobertura del cultivo, para lo cual se tomó el valor de $K = 0,66$, establecido por Tei et al. (1996). La curva correspondiente se presenta en la figura 60. Con esta información, una aproximación al rendimiento final del cultivo dependerá de la eficiencia en la conversión de la energía lumínica interceptada en biomasa.

Estimación del rendimiento potencial del cultivo

Tei et al. (1996) establecieron que, en el ciclo, la eficiencia en el uso de luz para el cultivo de lechuga variaba de 1,44 g/MJ de RFA, para los primeros días hasta el cierre del cultivo por el dosel (40 días después del trasplante), a 2,43 g/MJ de RFA, para los siguientes días hasta la cosecha. En este caso, la fuente de luz es el sol, por lo cual hay que considerar el espectro de radiación correspondiente bajo condiciones locales. La variabilidad observada en la eficiencia fotosintética normalmente está asociada a cambios fenológicos. Para el caso de la lechuga iceberg, el cambio fenológico importante corresponde al inicio de la formación de cabeza, que ocurre aproximadamente a los 40 días.

Finalmente, hay que considerar la partición de la biomasa entre los distintos órganos. Para el caso de la lechuga, dado que se cosecha la parte aérea en su totalidad, se distingue únicamente entre la parte aérea y la parte radicular. La razón de peso entre estos dos componentes es de aproximadamente 0,85 (Cambui et al., 2011). Para el total del ciclo, se deduce una curva de crecimiento en área foliar, y, considerando el nivel de interceptación de luz, se estima el crecimiento en biomasa (figura 61), que al final puede alcanzar hasta 681,01 g m² ciclo⁻¹. Con la partición de biomasa, la parte aérea corresponde a 578,9 g, que en peso fresco corresponden a 13.156 g m² ciclo⁻¹, considerando el contenido de agua en la lechuga, del 95,55 % (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar [ICBF], 2015; MyFoodData, 2021). En condiciones de campo, este resultado debe corregirse para incluir el espaciamiento entre camas de siembra, de modo que el rendimiento final será aproximadamente del 80 % del potencial (105,2 ton ha⁻¹). Este resultado es comparable con el encontrado por Tei et al. (1996) para lechuga mantequilla (Butterhead).

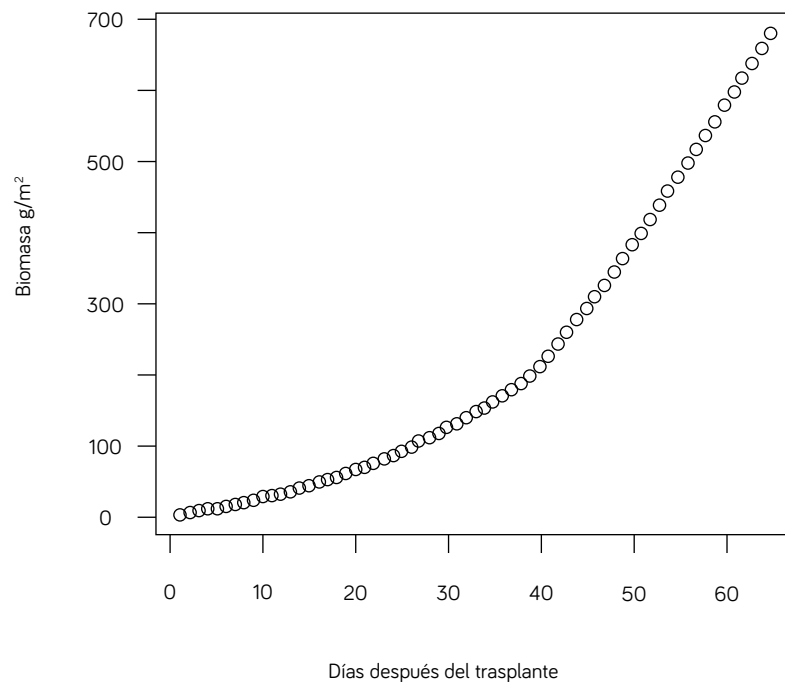


Figura 61. Simulación del desarrollo de biomasa para el cultivo de lechuga en condiciones de la Sabana de Bogotá.

Fuente: Elaboración propia

Rendimiento observado

La distribución del peso por planta se presenta en la figura 62, comparando la lechuga verde crespa con la crespa morada. El promedio de peso de la crespa morada fue de $106,92 \pm 33,52$ g, y para la crespa verde, de $145,85 \pm 58,50$ g. Por lo tanto, el rendimiento calculado fue de 15,30 t/ha para la crespa morada y de 20,87 t/ha para la crespa verde. Para el caso de la lechuga batavia, el promedio de peso por planta fue de $636,85 \pm 205,61$ g, para un rendimiento calculado de 91,11 t/ha, lo cual indica que está muy cercano a su potencial (105,2 t/ha).

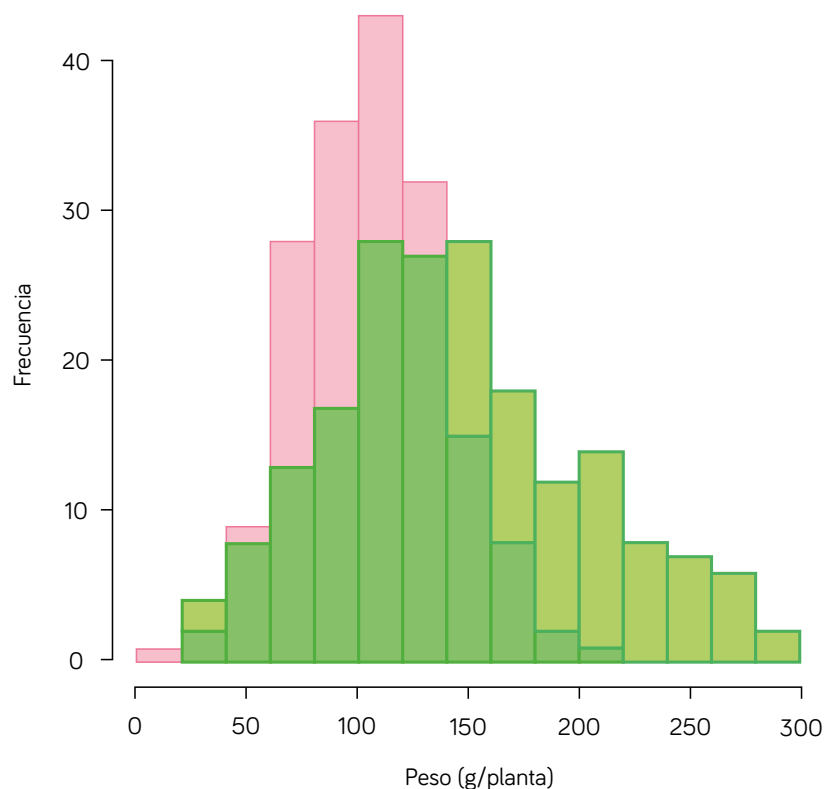


Figura 62. Distribución del peso por planta (g) en la cosecha en diferentes materiales. El color rosado corresponde a la distribución según peso de lechugas tipo crepsa morada. El color verde corresponde a la distribución según peso de lechugas tipo crepsa verde.

Fuente: Elaboración propia

Balance del sistema

Para establecer los cultivos hidropónicos se requiere, en primer lugar, un área de terreno y buena disponibilidad de agua. Dado que no se utiliza suelo, no aplicará si la zona correspondiente es apta o no para la agricultura a campo abierto, más allá de las condiciones de temperatura y luminosidad. Finalmente, dado que la hidroponía no depende de la calidad del suelo, puede establecerse en puntos cercanos a los centros de consumo, lo cual reducirá los costos de transporte y favorecerá una mejor conservación del producto poscosecha. Además, si los suelos de la zona tienen problemas de contaminación física, biológica o química, es posible utilizar buenas prácticas para evitar que el cultivo se afecte (Ercilla-Montserrat et al., 2018). Los sistemas de agricultura circular y vertical representan una solución que puede integrarse con otros sectores económicos para crear un sistema eficiente de abastecimiento de alimentos (Al-Saidi et al., 2021).

Una mayor automatización del sistema ayudará a reducir costos de operación y facilitará un rendimiento y calidad más estables (Ahamed et al., 2023). Según Naranjani et al. (2022), el aumento de la demanda por los productos agrícolas y la escasez de recursos (como el suelo fértil, el agua para irrigación y el clima apropiado) han conducido al incremento de los sistemas de granjas verticales de interior. Según Gentry (2019), las granjas hidropónicas verticales ofrecen muchas ventajas sobre las granjas convencionales, incluyendo un uso más eficiente del agua y la tierra, y, si se desarrollan en el área urbana, una reducción considerable de los costos de transporte. Además, como consecuencia, se facilita el manejo poscosecha y se puede garantizar mayor vida útil de los productos.

Para evitar o disminuir pérdidas en rendimiento por motivo del autosombreamiento de la estructura, se ha evaluado el uso de luz LED, pero también es posible utilizar especies o variedades adaptadas a la baja radiación (Widyastuti et al., 2020). En comparación con las estructuras abiertas (sin paredes), el invernadero propuesto reduce la velocidad de los vientos incidentes y, con ello, puede disminuir considerablemente el consumo de agua por transpiración de las plantas cultivadas (Weidner et al., 2021). Estos sistemas de hidroponía vertical han sido evaluados con modelos adaptables a grandes urbes, como Ciudad de México, para que sean de bajo costo, fáciles de operar y capaces de integrarse en una pared de una casa pequeña, con el fin de producir ciertas especies hortícolas durante todo el año (Velázquez et al., 2020).

Reflexiones y perspectivas

Bajo el contexto de cambio climático y la creciente necesidad de garantizar la seguridad alimentaria de las naciones, es claro que las granjas verticales en contextos urbanos, periurbanos y rurales irán aumentando año tras año. Esta técnica de cultivo tiene distintos niveles tecnológicos, lo cual facilitará su adopción en diferentes comunidades, con disímiles niveles de capacidad de inversión. Por otro lado, el desarrollo tecnológico continuo que presenta este tipo de sistemas de cultivo y las investigaciones que se vienen realizando en diversos cultivos vegetales ayudará a aumentar la eficiencia en el uso de agua y fertilizantes.

La economía circular (ec) se considera cada vez más un paradigma promotor para la transición de los sistemas agroalimentarios hacia modelos de producción y consumo más sostenibles, que permiten metabolismos biológicos virtuosos y regenerativos basados en estrategias de ecoeficiencia.

Estos nuevos sistemas de producción agrícola deben ayudar a resolver problemas de urbanización, contaminación de suelos y reducción de recursos

para la agricultura. Además, deben motivar un mejor manejo de los recursos naturales para conservar la riqueza de la biodiversidad y los ambientes saludables, y para reducir el impacto de la variabilidad y el cambio climático, aspectos que pueden ser decisivos para la calidad de vida de las futuras generaciones.

Referencias

- Ahamed, M. S., Sultan, M., Shamshiri, R. R., Rahman, M. M., Aleem, M., & Balasundram, S. K. (2023). Present status and challenges of fodder production in controlled environments: a review. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100080>
- Al-Saidi, M., Das, P., & Saadaoui, I. (2021). Circular economy in basic supply: framing the approach for the water and food sectors of the gulf cooperation council countries. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1273-1285.
- Alvarado, E. G. (2021). Una reflexión en relación con la Conservación y la Restauración de Ecosistemas, en la declaratoria de las Naciones Unidas y del programa para el medio ambiente (PNUMA) periodo 2021-2030. *Revista Académica Arjé*, 4(2), 4-8.
- Arcas-Pilz, V., Parada, F., Villalba, G., Rufí-Salis, M., Rosell-Melé, A., & Gabarrell Durany, X. (2021). Improving the fertigation of soilless urban vertical agriculture through the combination of struvite and rhizobia inoculation in *Phaseolus vulgaris*. *Frontiers in Plant Science*, 12, 649304. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.649304>
- Batra, K., & Gandhi, P. (2019). Recent trends of predictive modeling in protected cultivation. En A. Weigelt (Ed.), *International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (Com-IT-Con)* (pp. 580-583). University of Leipzig. <https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862227>
- Béné, C. (2019). When food systems meet sustainability - Current narratives and implications for actions. *World development*, 113, 116-130. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.011>
- Cambui, C. A., Svennerstam, H., Gruffman, L., Nordin, A., Ganeteg, U., & Näsholm, T. (2011). Patterns of plant biomass partitioning depend on nitrogen source. *Plos One*, 6(4), e19211. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019211>
- Campillo, C., García, M. I., Daza, D. C., & Prieto, M. (2010). Study of a non-destructive method for estimating the leaf area index in vegetable crops using digital images. *Horticultural Science*, 45, 1459-1463. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.10.1459>
- Candia Pacheco, L. R., & Quiroga Sossa, M. (2018). Production of acelga (*Beta vulgaris*) in vertical system at different distances in a protected environment. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 5(2), 101-116.
- Committee on World Food Security (2017). *Nutrition and food systems. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security*. FAO
- Deepthi, M. P., Nivethitha, S., Saminathan, K., Narendhirakannan, R. T., Karmegam, N., & Kathireswari, P. Effect of vermiwash prepared from livestock biowaste as vermiponics medium on the growth

Capítulo VII. Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá

- and biochemical indices of *Amaranthus viridis* L. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101300. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101300>
- Degli, M., Morselli, D., Fava, F., Bertin, L., Cavani, F., Viaggi, D., & Fabbri, P. (2021). The role of biotechnology in the transition from plastics to bioplastics: an opportunity to reconnect global growth with sustainability. *Febsopenbio*, 28, 40131. <https://doi.org/10.1002/2211-5463.13119>
- Ercilla-Montserrat, M., Muñoz, P., Montero, J. I., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2018). A study on air quality and heavy metals content of urban food produced in a Mediterranean city (Barcelona). *Journal of Cleaner Production*, 195, 385-395.
- Gentry, M. (2019). Local heat, local food: integrating vertical hydroponic farming with district heating in Sweden. *Energy*, 174, 191-197.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (2019). *Aquaponics food production systems. Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Harris, D. (1992). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. New Holland Publishing.
- Hindle, R. L. (2012). A vertical garden: origins of the Vegetation-bearing architectonic structure and system. *Studies in the History of Gardens & Designed Landscapes*, 32(2), 99-110.
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF) (2015). Tabla de composición de alimentos colombianos. https://www.icbf.gov.co/system/files/tcac_2015_final_para_imprimir.pdf
- Jacquet, F., Jeuffroy, M. H., & Jouan, J. (2022). Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. *Agronomical Sustainable Development*, 42, 8. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00742-8>
- Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2018). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: a review. *Journal of Landscape Ecology*, 11(1), 35-60.
- Mechaqrane, A., & Ouazzani Chahidi, L. (2021). Energetic and economic analysis for improving greenhouse energy efficiency. *Journal of Energy Systems*, 5(4), 296-305. <https://doi.org/10.30521/jes.950754>
- Michelon, N., Pennisi, G., Myint, N. O., Orsini, F., & Gianquinto, G. (202). Strategies for improved water use efficiency (wUE) of field-grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under a semi-arid climate. *Agronomy*, 10(5), 668. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050668>
- Moosavi-Nezhad, M., Salehi, R., Aliniaiefard, S., Winans, K. S., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2022). An analysis of energy use and economic and environmental impacts in conventional tunnel and LED-equipped vertical systems in healing and acclimatization of grafted watermelon seedling. *Journal of Cleaner Production*, 361, 132069. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132069>
- MyFoodData (2021). *Iceberg lettuce*. MyFoodData. <https://tools.myfooddata.com/nutrition-facts/169248/wt1/1>
- Naranjani, B., Najafianashrafi, Z., Pascual, C., Agulto, I., & Chuang, P. A. (2022). Computational analysis of the environment in an indoor vertical farming system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 186, 122460.
- Quintero, M. F., González, C. A., & Guzmán, J. M. (2011). Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. En R. Flórez R. (Ed.), *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (pp. 79-108). Universidad Nacional de Colombia.

- Ramírez-García, J., Almendros, P., & Quemada, M. (2012). Ground cover and leaf area index relationship in a grass, legume and crucifer crop. *Plant Soil and Environment*, *58*, 385-390.
- Rees, G. (1981). An unpublished manuscript by Francis Bacon: *Sylva Sylvarum* drafts and other working notes. *Annals of Science*, *38*(4), 377-412.
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, *232*, 8-27.
- Sangeetha, T., & Ezhumalai, P. (2020). Enhanced and cost-effective techniques used for plant growth in vertical agriculture. *Materials Today: Proceeding*.
- Serrano-Carreón, L., Aranda-Ocampo, S., Balderas-Ruiz, K., Juárez, A., Leyva, E., Trujillo-Roldán, M., Valdez-Cruz, N., & Galindo, E. (2022). A case study of profitable mid-tech greenhouse for the sustainable production of tomato, using a biofertilizer and a biofungicide. *Electronic Journal of Biotechnology*, *59*, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2022.06.003>
- Tei, F., Scaife, A., & Aikman, D. (1996). Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. *Annals of Botany*, *78*, 633-643.
- United Nations International Children's Emergency Fund [Unicef], World Health Organization [WHO], World Bank. (2021). *Levels and trends in child malnutrition: key findings of the 2019 edition of the Joint Child Malnutrition Estimates*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240025257>
- Velázquez, J. F., Rodríguez, E., Almanza, P. G., Fuentes D., & Flores H. (2020). *Hydroponics vertical farm as a viable utility model to implantation in Mexico City*. Asabe 2020 Annual International Meeting. <https://doi.org/10.13031/aim.202000346>
- Weidner, T., Yang, A., & Hamm, M. W. (2021). Energy optimization of plant factories and greenhouses for different climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, *243*, 114336. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421005124>
- Wheeler, R. M. (2017). Agriculture for space: people and places paving the way. *Open Agriculture*, *2*, 14-32.
- Widyastuti, P. Y., Suwarno, W. B., & Aswidinnoor, H. (2020). Genotype by environment analysis on multi-canopy cropping system towards vertical harvest space in rice. *Agronomy Journal*, *112*(6), 4568-4577.
- Zaręba, A., Krzemińska, A., & Kozik, R. (2021). Urban vertical farming as an example of nature-based solutions supporting a healthy society living in the urban environment. *Resources*, *10*(11), 109. <https://doi.org/10.3390/resources10110109>
- Zimmermann, M., & Fischer, M. (2020). Impact assessment of water and nutrient reuse in hydroponic systems using Bayesian Belief Networks. *Journal of Water Reuse and Desalination*, *10*(4), 431-442. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.026>
- Zou, J., Zhou, C., Xu, H., Cheng, R. Q., & Li, T. (2020). The effect of artificial solar spectrum on growth of cucumber and lettuce under controlled environment. *Journal of Integrative Agriculture*, *19*, 2027-2034.