



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

CONSTRUCCIÓN, AUTOMATIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA MINIFÁBRICA DE PLANTAS CON ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

TESIS DE GRADO

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

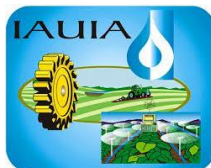
JOSHUA ESAÚ PATIÑO ESPEJEL

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. AGUSTÍN RUÍZ GARCÍA



APROBADA



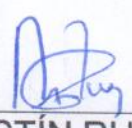
Chapingo, Estado de México, diciembre de 2022.

CONSTRUCCIÓN, AUTOMATIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA
MINIFÁBRICA DE PLANTAS CON ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

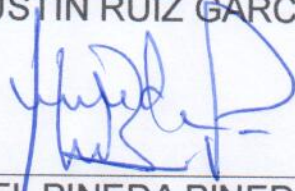
Tesis realizada por **Joshua Esaú Patiño Espejel** bajo la supervisión
del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como
requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA

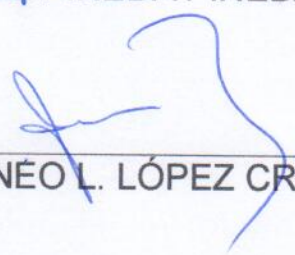
DIRECTOR:


DR. AGUSTÍN RUÍZ GARCÍA

ASESOR:


DR. JOEL PINEDA PINEDA

ASESOR:


Ph.D. IRINEO L. LÓPEZ CRUZ

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMEN GENERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT	xiv
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivo.....	4
1.2 Estructura de la tesis	4
1.3 Literatura citada	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 Agricultura vertical	7
2.1.1 Un poco de historia	7
2.1.2 Granja vertical vs. Fábrica de plantas	8
2.1.3 Componentes principales de una PFAL	9
2.1.4 Clasificación de las PFALs	10
2.1.5 Beneficios de las PFALs	11
2.2 Factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas.....	13
2.2.1 Temperatura.....	13
2.2.2 Humedad relativa	15
2.2.3 Concentración de CO ₂	16
2.2.4 Velocidad de la corriente de aire	17
2.3 La luz en las plantas	18
2.3.1 Calidad de la luz.....	19
2.3.2 Intensidad de la luz	20
2.3.3 Duración de la luz.....	22
2.3.4 Integral de luz diaria	22
2.4 Hidroponía	23
2.4.1 Sistema NFT	24

2.4.2	Nutrición	25
2.4.3	Efecto de los nutrientes en las plantas	27
2.4.4	Solución nutritiva	30
2.4.5	Conductividad eléctrica	31
2.4.6	pH.....	32
2.4.7	Oxígeno disuelto	32
2.4.8	Manejo de la solución nutritiva	33
2.5	Literatura citada	33
3.	MONITOREO Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MINIFÁBRICA DE PLANTAS CON ILUMINACIÓN ARTIFICIAL USANDO INTERNET DE LAS COSAS	39
3.1	Resumen	39
3.2	Introducción	40
3.3	Materiales y métodos.....	42
3.3.1	Variables sensadas, sensores utilizados y unidades de procesamiento	43
3.3.2	Plataformas utilizadas	44
3.3.3	Vista general del sistema	45
3.3.4	Mecanismo de comunicación del sistema	46
3.3.5	Desarrollo del sistema de monitoreo y control	47
3.3.6	Configuración de cuentas utilizadas.....	49
3.3.7	Configuración de la interfaz de usuario	51
3.3.8	Conexión a internet del ESP32	52
3.3.9	Desarrollo del software del sistema.....	52
3.3.10	Automatizaciones del sistema	52
3.3.11	Implementación en la mini-PFAL y fase de prueba del sistema....	53
3.4	Resultados y discusión	54
3.4.1	Interfaz de usuario y almacenamiento en la nube	55
3.4.2	Comportamiento de las variables sensadas.....	56
3.4.3	Análisis de crecimiento del cultivo	63

3.5	Conclusiones	68
3.6	Literatura citada	68
4.	ANEXOS	71
4.1	Código del Maestro (ESP32)	71
4.2	Código del Esclavo 1	73
4.3	Código del Esclavo 2	74
4.4	Código del módulo ESP-01.....	75
4.5	Capturas de pantalla del sitio web ThingSpeak	76
4.6	Evolución del crecimiento de las plantas de lechuga.....	76

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2-1. Tasas aproximadas de absorción de los nutrientes esenciales de las plantas (Bugbee 2004).....	26
Cuadro 2-2. Función y síntomas de deficiencia de los macronutrientes en las plantas (Uchida, 2000).....	27
Cuadro 2-3. Función y síntomas de deficiencia de los micronutrientes en las plantas (Uchida, 2000).....	29
Cuadro 2-4. Composición de macronutrientes de la solución Hoagland y Arnon (1950).....	30
Cuadro 2-5. Composición de micronutrientes de la solución Hoagland y Arnon (1950).	31
Cuadro 3-1. Sensores utilizados en el sistema de monitoreo.....	43
Cuadro 3-2. Rango de operación de variables ambientales y de la S.N. en los ciclos de cultivo de evaluación de la mini-PFAL.	55
Cuadro 3-3. Parámetros de crecimiento obtenidos en los diferentes ciclos de cultivo. Los valores son los promedios $\pm$ la desviación estándar.....	63
Cuadro 3-4. Valores de consumo de agua, consumo eléctrico y eficiencia de uso de la luz en los diferentes ciclos de cultivo.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Elementos principales de una fábrica de plantas con iluminación artificial (PFAL) (Kozai y Niu, 2016).....	9
Figura 2-2. Tasa de crecimiento a diferentes temperaturas (Kubota, 2020)..	14
Figura 2-3. Intensidad de la luz y tasa de fotosíntesis en plantas superiores.	21
Figura 2-4. Diagrama de un sistema hidropónico tipo NFT.	25
Figura 3-1. Diagrama espectral de las lámparas instaladas en la mini-PFAL.	42
Figura 3-2. Vista general del sistema mini-PFAL y el sistema de monitoreo.	45
Figura 3-3. Mecanismo de comunicación del sistema.	47
Figura 3-4. Diagrama de conexión final del sistema.	48
Figura 3-5. Conexión física del sistema.....	48
Figura 3-6. Creación del Pin Virtual para datos de temperatura.....	50
Figura 3-7. Creación del Pin Virtual para el control del sistema de iluminación.	50
Figura 3-8. Interfaz de usuario del panel de control móvil para el monitoreo y control.....	51
Figura 3-9. Automatización del sistema de iluminación.	53
Figura 3-10. Instalación del sistema desarrollado en la mini-PFAL.	54
Figura 3-11. Visualización de datos en la interfaz de usuario desde el smartphone.....	56
Figura 3-12. Valores de PPFD registrados dentro de la mini-PFAL el día 28/05/2022.....	57
Figura 3-13. Valores de la temperatura del aire dentro de la mini-PFAL del día 28/05/2022.....	58

Figura 3-14. Valores de humedad relativa del aire dentro de la mini-PFAL del día 28/05/2022.....	58
Figura 3-15. Concentración de CO ₂ dentro de la mini-PFAL del día 28/05/2022.....	59
Figura 3-16. Concentración de CO ₂ dentro de la mini-PFAL del día 28/05/2022.....	60
Figura 3-17. Niveles de oxígeno disuelto en la S.N. nutritiva el día 28/05/2022.	61
Figura 3-18. Comportamiento del pH en el sistema el día 28/05/2022. a) Inicio de absorción de nutrientes por parte de la planta, b) inicio de corrección de pH y c) fin de corrección de pH.	62
Figura 3-19. Comportamiento de la conductividad eléctrica en el sistema. a) Inicio de absorción de nutrientes por parte de la planta, b) inicio de corrección de pH y c) fin de corrección de pH.	63
Figura 3-20. Vista interior de la mini-PFAL en diferentes etapas de crecimiento durante el primer ciclo de cultivo.	64
Figura 3-21. Peso fresco de la parte aérea en el segundo y tercer ciclo de cultivo. Las barras verticales indican una desviación estándar.	65
Figura 3-22. Biomasa seca total acumulada en el segundo y tercer ciclo de cultivo. Las barras verticales indican una desviación estándar.	65
Figura 3-23. Eficiencia de uso de la luz (LUE) en diferentes etapas del crecimiento.	67
Figura 4-1. Diagrama de flujo del código del ESP32.	72
Figura 4-2. Diagrama de flujo del Esclavo 1.	74
Figura 4-3. Diagrama de flujo del Esclavo 2.	75

Figura 4-4. Capturas de pantalla del sitio web ThingSpeak de datos de temperatura del aire, CO ₂ , pH, conductividad eléctrica, temperatura de la S.N. y oxígeno disuelto.....	76
Figura 4-5. Fotografías de las plantas de lechuga <i>Lactuca sativa</i> L. var. Capitata en diferentes días después del trasplante (DDT).	77

DEDICATORIAS

A mis padres, mi ejemplo de vida.

A mis hermanos y hermanas.

A Magdalena, por todo el apoyo y amor.

A mi abuelo Juan Felipe †.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por permitirme ser parte de esta casa de estudios.

Al Dr. Agustín Ruíz García, al Dr. Joel Pineda Pineda y al Dr. Irineo L. López Cruz, por todo el apoyo, conocimiento y tiempo brindado, por la revisión cuidadosa que han realizado de este documento, por sus valiosas sugerencias y también por su amabilidad y dirección para que fuera posible la realización de esta investigación.

Al Dr. J. Ernesto Olvera González, por todo el apoyo y tiempo brindado para la realización de esta investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS



Nombre: Joshua Esaú Patiño Espejel

Fecha de nacimiento: 21 de febrero de 1996

Lugar de nacimiento: Calpulalpan, Tlaxcala.

CURP: PAEJ960221HTLTSS03

Profesión: Ingeniero en Irrigación

Preparatoria: Preparatoria Agrícola Chapingo, generación 2011-2014

Licenciatura: Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, generación 2014-2018.

RESUMEN GENERAL

CONSTRUCCIÓN, AUTOMATIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA MINIFÁBRICA DE PLANTAS CON ILUMINACIÓN ARTIFICIAL¹

En México, se proyecta una población de 150 millones de habitantes para el año 2050. Para satisfacer la creciente demanda de alimentos en zonas urbanas y periurbanas, con una disponibilidad de recursos cada vez menor y frente a condiciones ambientales impredecibles, una alternativa es la producción de cultivos en interior con fábricas de plantas con iluminación artificial (PFAL). El objetivo de este trabajo fue construir, automatizar y evaluar una mini-PFAL para producción de lechuga. El diseño de la mini-PFAL se realizó considerando su adaptabilidad a diferentes cultivos en términos de densidad, espaciamiento y altura de las plantas. Se instaló un sistema de cultivo Nutrient Film Technique (NFT) de cuatro niveles y para proporcionar luz a las plantas se instalaron nueve lámparas LED de luz blanca en cada nivel. Haciendo uso de microcontroladores Arduino y plataformas del internet de las cosas (IoT) se desarrolló un sistema de monitoreo de variables fisicoquímicas de la solución nutritiva y ambientales, y de control automático dentro de la mini-PFAL. El sistema desarrollado permite la visualización en tiempo real mediante un smartphone de las mediciones de los sensores para conocer la condición real de la mini-PFAL, así como accionar de manera remota distintos actuadores para controlar los componentes dentro de la misma. La mini-PFAL se evaluó en tres ciclos de un cultivo de lechugas (*Lactuca sativa* L.), en cada ciclo se cultivaron 96 lechugas. El peso fresco y seco que alcanzaron las lechugas es comparable a lo reportado en la literatura para PFAL. El sistema desarrollado fue capaz de mantener de manera automática la humedad relativa y el pH de la solución nutritiva en el rango establecido. La mini-PFAL construida permite producir lechuga que pueden usarse como fuente de alimentos para autoconsumo, o bien, escalarse como un modelo de producción semi-comercial.

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., iluminación LED, nutrient film technique, internet de las cosas, arduino.

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Autor: Joshua Esaú Patiño Espejel.

Director de Tesis: Dr. Agustín Ruiz García.

GENERAL ABSTRACT

CONSTRUCTION, AUTOMATION AND EVALUATION OF A MINI-PLANT FACTORY WITH ARTIFICIAL LIGHTING ²

In Mexico, the population is projected to reach 150 million by 2050. In order to meet the growing food demand in urban and peri-urban areas, with decreasing resource availability and facing unpredictable environmental conditions, an alternative is indoor crop production with plant factories with artificial lighting (PFAL). The objective of this work was to build, automate and evaluate a mini-PFAL for lettuce production. The design of the mini-PFAL was carried out considering its adaptability to different crops in terms of density, spacing and height of the plants. A four-level Nutrient Film Technique (NFT) system was installed, and nine white-light LED lamps were installed on each level to provide light to the plants. Using Arduino microcontrollers and Internet of Things (IoT) platforms, a system to monitor the physicochemical variables of the nutrient solution, the environmental parameters, and to automatically control the mini-PFAL was developed. The proposed system allows real-time visualization of sensor measurements through a smartphone to know the actual condition of the mini-PFAL and remotely activate different actuators to control the components inside of it. The mini-PFAL was evaluated in three cycles of a lettuce crop (*Lactuca sativa* L.), in each cycle, 96 lettuces were grown. The fresh and dry weights of the lettuce were comparable to those reported in the literature for PFAL. The developed system automatically maintains the relative humidity and pH of the nutrient solution in the established range. The constructed mini-PFAL allows the production of lettuce that can be used as a source of food for self-consumption or scale as a semi-commercial production model.

Key words: *Lactuca sativa* L., LED lighting, nutrient film technique, internet of things, arduino.

² Master Thesis, Postgraduate in Agricultural Engineering and Integrated Water Use, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Joshua Esaú Patiño Espejel.

Director de Tesis: Dr. Agustín Ruiz García.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La Organización de las Naciones Unidas (2019), predice que la población mundial en 2050 aumentará a 9.7 mil millones. Según el Banco Mundial (2020), para ese año la población urbana se duplicará y casi 7 de cada 10 personas vivirán en ciudades. ¿Qué implican estos números? Es evidente que, al incrementar la población, aumentará la demanda de alimentos y al mismo tiempo se generará una escasez de recursos naturales, lo que hace que la seguridad alimentaria sea una preocupación importante a nivel mundial (Bouroncle et al., 2019).

En México, de acuerdo con el Consejo Nacional de Población (2012), para el año 2050 la población alcanzará los 150.84 millones de habitantes. Por lo tanto, en el país será necesario incrementar la producción de alimentos, que además deberán ser distribuidos de manera eficiente minimizando las pérdidas a lo largo de la cadena alimentaria. Por esto, para ayudar a alimentar a la población en zonas urbanas y periurbanas, de manera ambiental y sostenible, se requiere complementar las técnicas agrícolas convencionales con una nueva forma de cultivo agrícola: la agricultura vertical de interior utilizando un sistema de Fábrica de Plantas con Iluminación Artificial, “PFAL” por sus siglas en inglés (Kozai y Niu, 2020).

El término PFAL hace referencia a un sistema de producción de cultivos en ambientes controlados, donde las plantas crecen con luz artificial y se encuentran apiladas en estantes de cultivo, pudiendo alcanzar varios pisos de altura (Birkby, 2016). El interés mundial en estos sistemas ha aumentado sustancialmente durante la última década debido a las preocupaciones sobre el crecimiento poblacional, el cambio climático y la disponibilidad tierra, agua y energía (Al-Kodmany, 2018).

Van Delden et al. (2021) indican que el uso de sistemas de PFAL podría satisfacer la demanda de los consumidores de alimentos nutritivos, con una cantidad y calidad garantizada y constante todos los días del año,

independientemente del suelo, el clima o el cambio climático. En comparación con otros sistemas agrícolas, las PFALs tienen un bajo impacto ambiental, casi ninguna emisión de pesticidas o nutrientes, un uso mínimo de agua y tierra, y permiten reducir la distancia recorrida al transportar los alimentos.

De Anda y Shear (2017) mencionan que el concepto de agricultura vertical puede revolucionar la agricultura tradicional, reduciendo las presiones existentes sobre los recursos naturales en el país y permitiendo la restauración de áreas actualmente dañadas por la agricultura tradicional. Adicionalmente, al implementar unidades de agricultura vertical en las áreas metropolitanas, como la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey, Puebla y Tijuana se puede contribuir a reducir la huella de carbono generada por la producción de alimentos destinada a las ciudades.

Dentro de un sistema PFAL, para satisfacer las necesidades nutrimentales de las plantas se hace uso de las tecnologías de agricultura en ambientes controlados, como son la hidroponía, la aeroponía y la acuaponía (Al-Kodmany, 2018). La más común de estas tres técnicas es la hidroponía, que consiste en cultivar plantas directamente en soluciones ricas en nutrientes sin hacer uso del suelo (Jensen, 1997).

Como indica Resh (2013), hay diferentes tipos de sistemas hidropónicos, como son la técnica de flujo profundo o raíz flotante, el sistema de goteo, flujo y reflujo o “Ebb & Flow” y la técnica de película de nutrientes (NFT). Cada uno presenta sus respectivas ventajas y desventajas, pero de manera general, estos sistemas están desarrollados actualmente para incorporarse, o bien, adaptarse para la producción dentro de ambientes controlados como son las PFALs (Pascual et al., 2018).

De acuerdo con Goto (2012), en sistemas de tipo PFAL, la uniformidad espacial de la luz, la temperatura del aire, la humedad, los niveles de CO₂ y la concentración de gas en las proximidades de la planta son cruciales para la

producción de plantas con una calidad constante por lo que se deben de mantener en un rango óptimo.

Para un manejo exitoso a lo largo del ciclo de cultivo, las PFALs integran aplicaciones desarrolladas para la agricultura inteligente, es decir, hacen uso de tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) en maquinaria, equipos y sensores. Mediante la transmisión de datos y la concentración de estos en sistemas de almacenamiento remoto, es posible realizar un adecuado análisis para la toma de decisiones (Pivoto, 2018). Haciendo uso de estas tecnologías es posible realizar un monitoreo continuo del ambiente y la planta para aumentar la cantidad y la calidad de la producción.

Mediante el uso de sensores y el desarrollo de un sistema de automatización en una PFAL, se puede controlar la mayoría de los procesos dentro de la misma. Los sensores capturan datos de los parámetros ambientales de interés, como la temperatura, humedad, intensidad de la luz y el pH de la solución nutritiva. Una alternativa ideal para las PFALs son los sensores inteligentes o con tecnología de Internet de las Cosas (IoT), de esta forma es posible el monitoreo en tiempo real desde un ordenador o un celular. Finalmente, un grupo de actuadores conectados directamente al sistema de automatización, permiten controlar el funcionamiento de equipos de control, que puede ser un ventilador, un enfriador de aire, un refrigerador, una bomba de presión, un humidificador y una lámpara (Saad et al., 2021).

Si bien es cierto que las PFALs tienen un gran potencial como fuente de alimentos de alta calidad, aún existen grandes desafíos en cuanto a eficiencia energética, rentabilidad económica, automatización y aceptación del consumidor, así como la necesidad de mitigar el alto costo capital inicial y los costos operativos (Van Delden et al., 2021). De igual modo, Lubna et al. (2022) mencionan que uno de los desafíos más importantes que enfrenta la industria de las PFALs actualmente es que no hay suficiente colaboración e intercambio de datos entre los agricultores verticales y los investigadores. Indican que, de manera general, esta es una industria que se muestra reacia a compartir información y experiencias

detalladas. Derivado de esto, las operaciones de PFALs tienden a "reinventar la rueda" innecesariamente y para evitarlo es necesario aumentar la colaboración e intercambio de datos para que la industria de las PFALs se siga expandiendo y consolide su lugar como un componente importante de la agricultura en general.

De acuerdo con Flores et al. (2022), en México el desarrollo e implementación de sistemas como las PFALs es prácticamente nulo. De aquí surge la necesidad de que los centros de investigación, las universidades, las instituciones gubernamentales y la misma industria, fomenten el desarrollo y transferencia de tecnologías para que la producción de cultivos dentro de PFALs se convierta, en un futuro próximo, en una realidad en el país.

1.1 Objetivo

Construir y automatizar una minifábrica de plantas con iluminación artificial (mini-PFAL) para la producción de hortalizas de hoja, que pueda ser utilizada para investigación, uso personal o familiar, o bien, que pueda ser escalable como un modelo productivo.

1.2 Estructura de la tesis

La presente tesis está dividida en tres capítulos. El primer capítulo consiste en una introducción general de la investigación, en donde se describen los antecedentes, la importancia, la justificación, el problema y el objetivo del estudio. En el capítulo dos se presenta una revisión de literatura, en la cual se abordan los principales conceptos de la agricultura en ambientes controlados, así como los elementos e interacciones involucrados para un buen crecimiento de la planta dentro de las PFALs. Y, por último, el tercer capítulo corresponde al artículo científico del tema de investigación, que tiene por nombre "Monitoreo y automatización de una minifábrica de plantas con iluminación artificial usando internet de las cosas".

1.3 Literatura citada

- Al-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>
- Banco Mundial (2020). Building Sustainable Cities and Communities. [Folleto]. Recuperado de: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/369231581107802168-0200022020/original/WUF10UrbanDevelopmentBrochure> A3.pdf [28/01/2022]
- Birkby, J. (2016). Vertical farming. *ATTRA sustainable agriculture* 2. pp 1-12.
- Bouroncle, L., Félix, J., y Heracles, L. (2019). La sobrepoblación: efectos. *Revista De Investigaciones De La Universidad Le Cordon Bleu*, 5(2), 119-132. <https://doi.org/10.36955/RIULCB.2018v5n2.010>
- Consejo Nacional de Población. (2012). Proyecciones de la Población 2010–2050.
- De Anda, J., & Shear, H. (2017). Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico. *Sustainability*, 9(1), 140. <https://doi.org/10.3390/su9010140>.
- Flores, J., Fuentes, D., y Roblero, R. (2022). La web de las cosas (WoT) para monitoreo y control de biosistemas con aplicaciones prácticas en Agricultura Urbana (AgUrban). En Neri, J., Medina, M., López, R. y González, P. (Eds.), *Tecnologías disruptivas y su impacto en la vida social y económica de México* (pp. 135–154) Editorial Plaza y Valdés.
- Goto, E. (2012). Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. *Acta Horticulturae*, (956), 37–49. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.956>.
- Jensen, M. (1997). Hydroponics. *HortScience*, 32(6), 1018-1021. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.32.6.1018>.
- Kozai, T. & Niu, G. (2020) Chapter 1 – Introduction. *Pant Factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Second edition. Academic Press. Pp 3-6.
- Lubna, F. A., Lewus, D. C., Shelford, T. J., & Both, A.-J. (2022). What You May Not Realize about Vertical Farming. *Horticulturae*, 8(4), 322. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040322>
- Organización de las Naciones Unidas (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (ST/ESA/SER.A/423). Recuperado de: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/WPP2019_Highlights.pdf [01/02/2022]
- Pascual, M., Lorenzo, G. & Gabriel, A. (2018). Vertical Farming Using Hydroponic System: Toward a Sustainable Onion Production in Nueva Ecija,

Philippines. Open Journal of Ecology, 8, 25-41.
<https://doi.org/10.4236/oje.2018.81003>.

- Pivoto, D., Waquil, P. D., Talamini, E., Finocchio, C. P. S., Dalla Corte, V. F., & de Vargas Mores, G. (2018). Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. *Information processing in agriculture*, 5(1), 21-32.
- Resh, H. M. (2013). Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. CRC press. Seventh Edition.
- Saad, M., Hamdan, N. & Sarker, M. (2021). State of the Art of Urban Smart Vertical Farming Automation System: Advanced Topologies, Issues and Recommendations. *Electronics*. 10, 1422. <https://doi.org/10.3390/electronics10121422>
- Van Delden, S. H., SharathKumar, M., Butturini, M., Graamans, L. J. A., Heuvelink, E., Kacira, M., Kaiser, E., Klamer, R., Klerkx, L., Kootstra, G., Loeber, A., Schouten, R., Stanghellini, C., van Ieperen, W., Verdonk, J., Violet-Chabrand, S., Woltering, E., van de Zedde, R., Zhang, Y. & Marcelis, L. F. M. (2021). Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. *Nature Food*, 2(12), 944-956.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Agricultura vertical

2.1.1 Un poco de historia

La agricultura juega un papel crucial en el crecimiento y desarrollo de las sociedades. Como proveedor de alimentos, es una piedra angular de la existencia humana (Blandford, 2011). De acuerdo con el reporte de la FAO (2014), actualmente existen más de 570 millones de fincas en todo el mundo, de las cuales, más del 90% están a cargo de un individuo o familia, produciendo más del 80% de los alimentos a nivel mundial. Sin embargo, como la mayoría de las formas de actividad humana, las actividades agrícolas suelen tener impactos ambientales negativos, como es la degradación y erosión del suelo, la pérdida de biodiversidad y la contaminación del aire y agua (Blandford, 2011). Todo esto, aunado a la creciente demanda de alimentos y la constante reducción de recursos, hace que sea necesario desarrollar nuevas tecnologías y prácticas agrícolas para aumentar la productividad en los próximos años.

La agricultura vertical es una de estas nuevas técnicas agrícolas que ha ido tomando fuerza para brindar seguridad alimentaria en el futuro complementando las prácticas convencionales.

La agricultura vertical es una extensión de la Agricultura en Ambientes Controlados (CEA por sus siglas en inglés), que de acuerdo con Nozaki (2021) y Srivani et al. (2019), es el proceso de cultivar dentro de un ecosistema cerrado, donde las numerosas variables involucradas en el crecimiento de las plantas son reguladas, haciendo posible optimizar el crecimiento de los cultivos.

Van Gerrewey, Boon y Geelen (2021) mencionan que la agricultura vertical ha recibido diferentes definiciones dependiendo el tamaño, el diseño, el tipo de construcción, la densidad, la cantidad de control, la ubicación y el propósito de uso. En su forma más simple, la "agricultura vertical" como actividad se puede

definir como la producción de plantas en múltiples capas o niveles para aumentar el rendimiento por área de superficie.

En este contexto, el nombre de “granja vertical” hace referencia a la instalación en la cual se produce verticalmente y es importante establecer una definición de este.

2.1.2 Granja vertical vs. Fábrica de plantas

De acuerdo con SharathKumar, Heuvelink y Marcelis (2020), una granja vertical es un sistema de producción de plantas de interior con múltiples capas en el que todos los factores de crecimiento, como la luz, la temperatura, la humedad, la concentración de dióxido de carbono, el agua y los nutrientes, se controlan con precisión para producir grandes cantidades de productos frescos de alta calidad durante todo el año, independientemente de la luz solar y otras condiciones en el exterior.

Por su parte, Kozai y Niu (2020a) definen el término “fábrica de plantas con iluminación artificial” (PFAL por sus siglas en inglés) como una instalación de producción de plantas con una estructura similar a un almacén con aislamiento térmico y casi hermética, en donde se tienen estantes de cultivo apilados verticalmente en el interior y equipados con lámparas eléctricas (fluorescentes o LED), además cuenta con acondicionadores de aire, ventiladores de circulación de aire, unidades de suministro de CO₂ y de solución nutrientes, y una unidad de control ambiental.

Por lo anterior, se puede concluir que el nombre de “granja vertical” y “fábrica de plantas” hacen referencia a lo mismo y pueden ser usados de manera indistinta. La única diferencia sería, como mencionan Butturini y Marcelis (2019), que el primero se prefiere en países europeos, mientras que el segundo en países asiáticos. En este trabajo de investigación se optó por utilizar el término “fábrica de plantas”.

2.1.3 Componentes principales de una PFAL

Una PFAL consta de seis elementos estructurales principales (Figura 2-1): (1) una cubierta térmicamente aislada y casi hermética; (2) un sistema de varios niveles (generalmente de 4-16 niveles o capas y con un espaciamiento vertical de 40-60 cm entre nivel) equipados con lámparas de tecnología LED sobre las camas de cultivo; (3) acondicionadores de aire, utilizados principalmente para enfriamiento y deshumidificación, para eliminar el calor generado por las lámparas y el vapor de agua transpirado por las plantas en el cuarto de cultivo, y ventiladores para hacer circular el aire con el fin de mejorar la fotosíntesis, la transpiración y lograr una distribución espacial uniforme del aire; (4) una unidad de suministro de CO₂ para mantener la concentración de CO₂ en el cuarto alrededor de 1000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (o ppm) durante el fotoperíodo para mejorar la fotosíntesis de la planta; (5) una unidad de suministro de solución de nutrientes; y (6) una unidad de control ambiental que incluye controladores de conductividad eléctrica (EC) y pH para la solución nutritiva (Kozai y Niu, 2016).

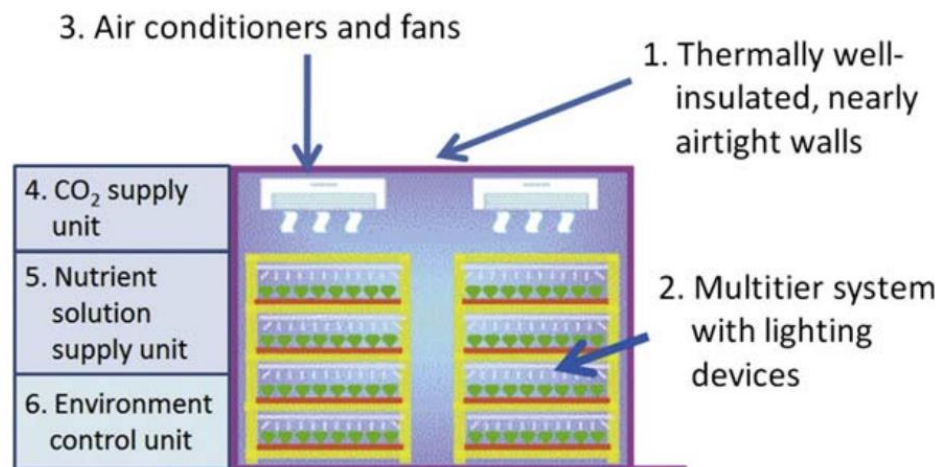


Figura 2-1. Elementos principales de una fábrica de plantas con iluminación artificial (PFAL) (Kozai y Niu, 2016).

2.1.4 Clasificación de las PFALs

En función de su tamaño, ubicación y propósito, las PFALs se pueden subdividir en (Takagaki, Hará y Kozai, 2020):

1. Micro-PFALs: Son sistemas de cultivo de interior diseñados para uso doméstico, decorativo y de oficina. Su rango de tamaño en volumen de aire varía de 0.03 a 1 m³.
2. Mini-PFALs: Son unidades agrícolas verticales generalmente ubicadas en los lugares de consumo o compra (es decir, supermercados, restaurantes, hospitales, escuelas). Su uso puede también ser educacional. Son robustas y fáciles de usar y mantener. Su rango de tamaño en volumen de aire varía de 2 a 30 m³.
3. PFALs: Estos son sistemas de producción agrícola vertical ubicados usualmente en un espacio dentro de un edificio industrial o almacén. El volumen de aire del espacio de cultivo es mayor a 30m³.

Las micro-PFAL y mini-PFAL se clasifican en tres tipos (Takagaki, Hará y Kozai, 2020):

- a. El tipo A no tiene aire acondicionado, sino que utiliza ventilación natural o forzada a través de espacios de aire cubiertos con redes de malla fina para evitar la entrada de insectos
- b. El tipo B tiene aire acondicionado mediante un sistema enfriado por aire o enfriado por agua y también utiliza algún grado de ventilación natural, pero no tiene un sistema de enriquecimiento de CO₂.
- c. Tipo C es una estructura hermética equipada con un acondicionador de aire y una unidad de enriquecimiento de CO₂.

La mayoría de las micro-PFALs y mini-PFALs son de tipo A o tipo B, mientras que la mayoría de las PFALs para la producción de plantas comerciales son de tipo C (Takagaki, Hará y Kozai, 2020).

2.1.5 Beneficios de las PFALs

De acuerdo con Despommier (2011), algunos de los beneficios que brindan las PFALs son los siguientes:

1. Producción de cultivos durante todo el año. Esto no solo es una mejor estrategia y más confiable para la producción sostenible de alimentos, sino que también le permite al agricultor aprovechar los mercados estacionales que pueden permitir que un cultivo se venda a un precio mucho más alto que el normal.
2. Sin pérdidas de cultivos debido a eventos climáticos adversos. En la agricultura de interior, la temperatura, la humedad, la cantidad de luz y la densidad de las plantas son controladas, y ningún evento meteorológico como inundaciones, sequías, tornados, granizadas, ciclones, huracanes y vientos fuertes afectan la producción.
3. Sin escurrimientos agrícolas. En la mayoría de las operaciones agrícolas avanzadas, los escurrimientos están cargados de sedimentos, fertilizantes, pesticidas y herbicidas y, por lo general, termina en algún río en su camino hacia la desembocadura, afectando la vida silvestre de los ambientes acuáticos.
4. Permite la restauración del ecosistema. Si una cantidad significativa de agricultura tuviera lugar dentro del paisaje urbano, entonces la huella ecológica mundial de la agricultura sería más pequeña.
5. Libre de uso de pesticidas y herbicidas. En este sistema se utiliza agua pura en la que se han disuelto un conjunto de nutrientes y no hay

necesidad de preocuparse por la contaminación de los alimentos con cosas como metales pesados o bacterias.

6. Utiliza entre un 70 y un 95 % menos de agua que la agricultura tradicional. Mediante técnicas hidropónicas y aeropónicas es posible emplear sistemas cerrados conservando una gran cantidad de agua siendo una respuesta para la producción sostenible de alimentos.
7. Reduce en gran medida la distancia recorrida por los alimentos. Al residir dentro de los límites de la ciudad, se crea una fuente local sostenible de productos que llega a los consumidores finales disminuyendo el consumo de combustibles fósiles y aumentando el tiempo de vida en anaquel.
8. Asegura un mayor control de la inocuidad y seguridad alimentaria. Implementando los sistemas de prevención y control adecuados se garantiza que el cuarto de cultivo sea un lugar seguro para cultivar.
9. Nuevas oportunidades de empleo. Con la llegada de la agricultura vertical se crean numerosas oportunidades en los diferentes niveles, desde la siembra y producción, hasta la venta y la gerencia.
10. Podría usar propiedades de la ciudad abandonadas. Desde pequeños almacenes hasta grandes bodegas abandonadas pueden transformarse y acondicionarse para cultivar alimentos en el corazón de la ciudad.

Por su parte, Kozai y Niu (2016), coinciden mencionando los siguientes beneficios:

1. Crecimiento rápido y uniforme de plantas de alta calidad.
2. Alta productividad por superficie en parte debido al uso de estantes múltiples.
3. Altas eficiencias de utilización de agua y CO₂.

4. Alta eficiencia de utilización de la luz de las plantas debido a la temperatura optimizada, PPF, concentración de CO₂ y contenido de agua del sustrato.

Finalmente, Goto (2012) menciona que una de las principales ventajas que presenta este tipo de sistemas es la posibilidad de manipular tanto las condiciones aéreas como las de la zona radicular, así como proporcionar a las plantas diversos estímulos artificiales y, de ser necesario, generar estrés fisiológico para maximizar la acumulación del material objetivo, como metabolitos secundarios funcionales.

2.2 Factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas

Los principales factores ambientales que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas son: la luz, la temperatura, la humedad, la concentración de CO₂ en el aire, la velocidad de la corriente de aire y los nutrientes en la zona radicular. Comprender estos factores clave es crucial para maximizar la producción de biomasa en las fábricas de plantas (Kubota, 2020).

2.2.1 Temperatura

Muchos procesos fisiológicos de las plantas se ven afectados por la temperatura de la planta, la cual está determinada por la transferencia de calor entre los tejidos de la planta y el entorno que la rodea. Por lo tanto, monitorear y controlar la temperatura del aire es fundamental para gestionar la actividad y la respuesta fisiológica de la planta. Dentro de una PFAL, la temperatura del aire a menudo se mantiene a un nivel relativamente constante, lo que da como resultado una temperatura constante de la planta y, por lo tanto, una actividad fisiológica constante (Niu et al., 2020).

En la Figura 2-2 se presenta una curva de respuesta del crecimiento de las plantas a la temperatura. Como se puede observar, la tasa de crecimiento incrementa de forma lineal con el aumento de la temperatura hasta alcanzar una tasa máxima. Este valor de temperatura se considera entonces como la temperatura óptima del cultivo. En el caso específico de la producción de lechuga,

de acuerdo con Carotti et al. (2021), la temperatura óptima es de 24°C. Por su parte, Noh y Jeong (2021), mencionan que un ajuste de temperatura de 25/18 °C día/noche son los más adecuados para el crecimiento acelerado de lechuga romana.

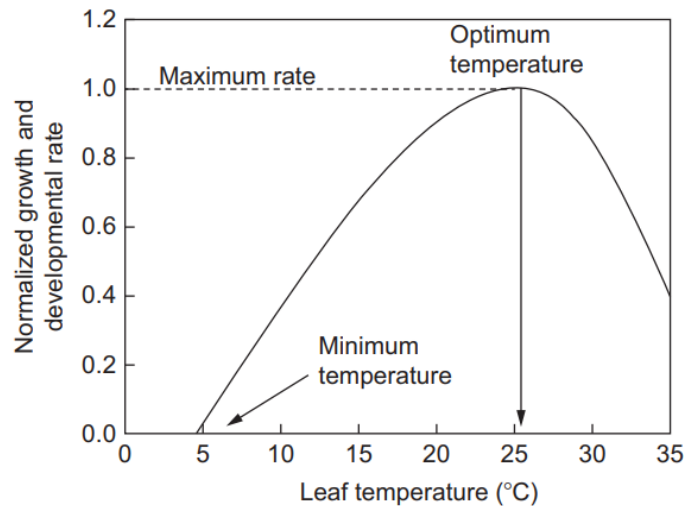


Figura 2-2. Tasa de crecimiento a diferentes temperaturas (Kubota, 2020).

Para una adecuada medición, la selección de sensores de temperatura se debe basar en el rango de temperatura de funcionamiento, la confiabilidad, la sensibilidad al cambio de temperatura y la estabilidad a largo plazo. Una opción que cumple estos criterios son los termómetros digitales integrados con un termistor que cambia su valor de resistencia en función de la temperatura. Por otra parte, es importante considerar que para lograr el mayor control sobre las temperaturas del aire y de las hojas en una PFAL, es ideal monitorear la temperatura del aire en varios lugares, tanto de forma vertical como horizontalmente a lo largo de los estantes de cultivo (Niu et al., 2020).

Para mantener los valores de temperatura en el rango óptimo dentro de las PFALs, es necesario implementar un sistema de aire acondicionado (A/C), o bien, un sistema HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) que, mediante sistemas de control simples de tipo on/off, regulan el encendido o apagado cuando el valor está por arriba de un punto de referencia (Hicklenton y Heins, 1997).

2.2.2 Humedad relativa

La humedad relativa (HR) se usa para expresar el contenido de vapor de agua del aire en función de la cantidad máxima de agua que puede contener para una temperatura y presión determinadas. En los PFAL, las plantas agregan constantemente vapor de agua al aire a través de la transpiración, que es la evaporación del agua desde la superficie de las plantas hacia la atmósfera (Niu et al., 2020).

La tasa de transpiración de la hoja se ve fuertemente afectada por la concentración de humedad del aire circundante, así como por la temperatura de la hoja, es decir, la transpiración generalmente aumenta conforme la humedad disminuye. Por lo tanto, la humedad afecta indirectamente la absorción de nutrientes, la temperatura de la hoja y, en consecuencia, el crecimiento y desarrollo de la planta (Kubota, 2020).

Con una HR del aire baja, la tasa de evaporación de las hojas aumenta, lo que conlleva a una pérdida excesiva de agua. Como resultado, la planta cierra sus estomas y no se puede absorber más CO_2 , por lo que la fotosíntesis se detiene. De forma contraria, una HR del aire alta provoca un mal funcionamiento de los estomas, generando a la planta estrés hídrico y también, como resultado, un cierre de los estomas (Ahmed et al., 2020a). Por esta razón, es importante mantener los valores dentro del rango adecuado que, de acuerdo con Brechner et al. (1996), la HR del aire óptima para el crecimiento y desarrollo de la lechuga oscila entre 50 y 70%.

Una de las opciones disponibles para la medición directa de la HR es utilizar higrómetro. Hay muchos tipos de higrómetros con diferentes grados de precisión y a varios precios. Los sensores de humedad modernos utilizan dispositivos electrónicos, que se basan en cambios en la capacitancia eléctrica o la resistencia para medir las diferencias de humedad (Niu et al., 2020).

De acuerdo con Kalantari et al. (2017), existen varias técnicas para la deshumidificación en ambientes controlados, dentro de las cuales podemos mencionar las dos siguientes: 1) la ventilación natural, junto con la ventilación forzada (usando ventiladores), pues ayuda a sustituir el aire cálido o muy húmedo de un invernadero por uno más fresco y seco; 2) la condensación, que se considera el más aplicable a la producción de cultivos de interior. Esta última además es una de las ventajas de las PFALs en comparación con la agricultura tradicional, pues es posible recuperar y reutilizar el agua transpirada por las plantas. Por su parte, Niu et al. (2020), indican que un enfoque para controlar la humedad en una PFAL es alternar el funcionamiento de las luces para generar calor y hacer que el acondicionador de aire funcione, lo que da como resultado el enfriamiento y la deshumidificación simultánea del espacio. Como alternativa, se pueden instalar deshumidificadores independientes en el PFAL que no dependan del funcionamiento de los acondicionadores de aire.

2.2.3 Concentración de CO₂

El CO₂ es la materia prima para la fotosíntesis y está involucrado en varios procesos fisiológicos relacionados directamente con el crecimiento de las plantas. La absorción de CO₂ por parte de la planta depende de la etapa de crecimiento, la velocidad del aire, la intensidad de la luz y la temperatura del aire (Ahmed et al., 2020a).

Las plantas asimilan CO₂ durante la fotosíntesis y liberan CO₂ durante la respiración. Por lo tanto, pequeños cambios en la concentración de CO₂ pueden tener un impacto significativo en la tasa de fotosíntesis de las plantas. Si la concentración de CO₂ disminuye a un nivel muy bajo durante el periodo de luz, las plantas pueden acercarse al punto de compensación de CO₂, que es el estado en el cual el CO₂ asimilado y el liberado se equilibran, dando como resultado una fotosíntesis neta igual a cero (Niu et al., 2020). Por otro lado, cuando el CO₂ está en exceso y supera el punto de saturación, la capacidad fotosintética ya no incrementa, y juega un papel en la inhibición de la fotosíntesis (Ahmed et al.,

2020a). Es por esta razón que es fundamental monitorear y controlar los niveles de CO₂ dentro de las PFALs.

Tradicionalmente, la concentración de CO₂ se expresa en partes por millón (ppm). El sensor más utilizado para su medición es el sensor de CO₂ infrarrojo no dispersivo (NDIR). Este sensor se basa en un tubo de luz por el cual se difunde el gas y posteriormente se mide la absorción de energía infrarroja por las moléculas de CO₂ (Peet y Krizek, 1997). Es importante evitar colocar sensores de CO₂ en lugares donde las personas puedan respirar directamente sobre el sensor, o cerca de ventanas y puertas, ya que pueden dar lecturas que no reflejen con precisión las condiciones del dosel de la planta (Niu et al., 2020).

Lee y Park (1999) investigaron los factores ambientales necesarios para el crecimiento óptimo de la lechuga de hoja en una PFAL. Sus resultados mostraron que la tasa máxima de crecimiento se obtuvo a una concentración de CO₂ de 1000 – 2000 ppm, con una intensidad de luz de aproximadamente 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Adicionalmente, concluyen que al enriquecer con CO₂ la PFAL, se puede reducir el consumo eléctrico dentro de la misma.

2.2.4 Velocidad de la corriente de aire

La velocidad de la corriente de aire se define como la distancia que recorre el aire durante un período de tiempo determinado y sus unidades son m s^{-1} (Niu et al., 2020). La circulación del aire dentro de un sistema de producción de plantas a menudo es considerada para lograr una mejor uniformidad espacial de la temperatura del aire (Kubota, 2020).

Dentro de una PFAL es necesario utilizar ventiladores mecánicos para generar movimiento de aire y controlar la velocidad de la corriente de este. Estos deben ubicarse estratégicamente para promover un intercambio de gases constante y un crecimiento uniforme de las plantas. Sin ventiladores mecánicos, la PFAL se basará en la convección natural y la flotabilidad del aire más caliente para producir movimiento de aire alrededor de las plantas. Sin embargo, estas

velocidades de corriente de aire son extremadamente bajas y no se pueden controlar (Niu et al., 2020).

Cuando se aplican ventiladores de circulación de aire, debemos evitar corrientes de aire de alta velocidad alrededor de las plantas que puedan generar estrés mecánico y daños. A velocidades de corrientes de aire superiores a 1 m s^{-1} , la sacudida inducida por el viento y el estrés mecánico resultante en las plantas reducen la longitud del entrenudo y el tamaño de la hoja. Por otro lado, la velocidad insuficiente de aire alrededor de las plantas suprime la difusión de gas en la capa limítrofe de la hoja, lo que posteriormente reduce las tasas de fotosíntesis y transpiración y, por lo tanto, el crecimiento de la planta (Kubota, 2020).

Para lograr un control preciso de la velocidad del aire, se necesitan cálculos especiales y estrategias de diseño con respecto a la ubicación, el número y la capacidad de los ventiladores cuando se construye un PFAL (Niu et al., 2020). En cuanto a los valores óptimos, Kitaya et al. (2004) mencionan que la velocidad del aire óptima para el crecimiento de las plantas varía en el rango de 0.3 a 0.7 m s^{-1} . Los resultados de Ahmed et al. (2020b) indican que mejorar el flujo de aire a una velocidad de 0.75 m s^{-1} puede mejorar el crecimiento de la lechuga cultivada en interiores, al incrementar substancialmente la tasa de transpiración y, por lo tanto, prevenir o aliviar los daños debido a la aparición de tipburn.

2.3 La luz en las plantas

La luz es la fuente primaria de energía para la vida en la tierra (De las Rivas, 2008). Juega un papel fundamental para que las plantas realicen la fotosíntesis, proceso mediante el cual capturan la energía de la luz solar y la convierten en energía bioquímica (Evans, 2013).

La actividad fotosintética, y por ende el crecimiento de las plantas, se ve fuertemente afectado por parámetros ambientales como la temperatura, la concentración de CO_2 , el flujo de fotones fotosintéticos (PPF) y el ciclo de luz (Hiroki et al., 2014). Por esta razón, si se quiere conseguir un buen desarrollo del

cultivo y un incremento de la productividad dentro de un sistema de PFAL, hay que garantizar una correcta iluminación. Para ello hay tres conceptos importantes a considerar: la calidad, la intensidad y la duración de la luz.

2.3.1 Calidad de la luz

La calidad de la luz se refiere a la distribución espectral de los fotones, es decir, el número relativo de fotones correspondientes de la fracción azul, verde, rojo, rojo lejano y otras porciones del espectro de luz emitido por una fuente de luz (Smith, 1982).

Cada una de las bandas de color del espectro de luz desencadenan una respuesta en la planta y a continuación se presentan algunos de los efectos.

- Luz roja (600-700 nm): En general, el rojo es la longitud de onda más importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La luz de estas longitudes contribuye a la fotosíntesis de la planta (Okamoto et al., 1996). También promueve el crecimiento radial de las plantas de lechuga, sin embargo, las plantas no pueden crecer de forma normal únicamente con luz roja por lo que se debe añadir una porción de color azul (Tang, Guo, Ai y Qin, 2009).
- Luz azul (400-500 nm): La luz de la porción azul del espectro es indispensable para el crecimiento morfológico saludable de la planta (Okamoto et al., 1996). La presencia de luz azul en un rango del 5 al 20 % en el cultivo de plantas de lechuga, mejora la fotosíntesis, la transpiración, la fluorescencia, así como promueve el aumento de biomasa total y contenido de pigmentos de fotosíntesis y nutrientes (Tang, Guo, Ai y Qin, 2009).
- Luz verde (500-600 nm): La luz verde se absorbe débilmente en comparación con las longitudes de onda roja y azul. Sin embargo, debido a esta menor absorción, la luz verde puede penetrar más y excitar la clorofila más profundamente en las hojas. La luz verde se refleja y se

dispersa dentro de las hojas y el dosel, aumentando el potencial de absorción total (Liu y Van Iersel, 2021).

- Rojo lejano (700-800 nm): El rojo lejano no se considera convencionalmente activo en la fotosíntesis, sin embargo, la proporción de luz rojo lejano influye en los atributos de crecimiento de los cultivos de floricultura, incluida la ramificación y el alargamiento de tallos y hojas. Además, controla la floración en plantas que son sensibles a la duración del día (Runkle, 2011).
- Espectro UV (100-400 nm): La luz ultravioleta-B (UV-B) desarrolla cambios en la morfología, fisiología y producción de metabolitos secundarios en la planta, también hace que las plantas sean generalmente más robustas y aumenta la resistencia a los estreses bióticos (Escobar, Klinkhamer y Leiss, 2017).

En las PFAL, mediante el uso de sistemas de iluminación con tecnología LED, es posible modificar la calidad de la luz. En el caso particular del cultivo de lechuga, Tang et al. (2009), indican que la mejor condición de iluminación es una combinación de 90% de luz roja y 10% de luz azul. Sin embargo, los resultados de Nguyen et al. (2021), ilustran los efectos positivos del añadir una porción de luz LED blanca específica en el crecimiento y la calidad de la lechuga, y sugieren que estas fuentes de luz podrían usarse preferentemente en las PFAL. Esto coincide con Lin et al. (2013), que encontraron que la biomasa, la textura crujiente, el dulzor y la forma de las plantas fueron más altos con la combinación de luz roja/azul/blanca en comparación con la combinación de luz roja/azul.

2.3.2 Intensidad de la luz

En horticultura, la intensidad de la luz es una medida de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) cuantificada como irradiancia de fotones en moles por unidad de área por unidad de tiempo, es decir, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en el rango de radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Wimalasekera, 2019). La radiación

PAR comprende la porción del espectro de luz utilizada por las plantas para la fotosíntesis cuyas longitudes de onda están entre los 400-700 nm (McCree, 1971).

Es importante recordar que la fotosíntesis solamente se puede llevar a cabo después de que la intensidad de la luz haya incrementado hasta cierto punto. Por otro lado, la fotosíntesis y la respiración son procesos interrelacionados y el equilibrio entre ellos es el punto de compensación de la fotosíntesis (Xu, 2019). Como se muestra en la Figura 2-3, cuando la intensidad de la luz es menor a ese punto, la respiración es mayor que la fotosíntesis. Cuando la intensidad de la luz es mayor al punto de compensación, la fotosíntesis es mayor que la respiración y se incrementa de manera casi lineal con la intensidad de la luz. Esto sucede hasta que llega a un punto máximo, conocido como punto de saturación y continúa de manera constante. Por lo tanto, la mejor intensidad de luz debe ubicarse entre los puntos de compensación y saturación (Xu, 2019).

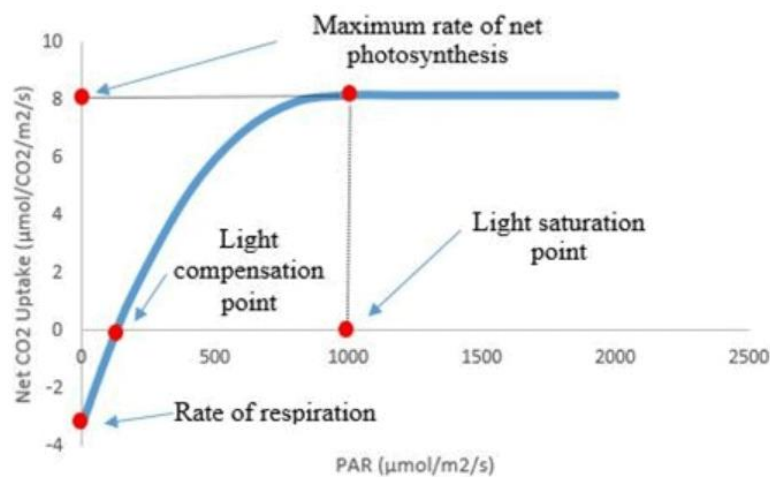


Figura 2-3. Intensidad de la luz y tasa de fotosíntesis en plantas superiores.

Sago (2016), comparó los efectos de diferentes valores de PPFD para el cultivo de lechuga mantequilla en un rango de 150 a 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y encontró que conforme aumenta el valor, la tasa de crecimiento, el peso fresco, el peso seco y el número de hojas también aumentan. Sin embargo, es importante considerar que, a tasas de crecimiento más altas, la posibilidad de desarrollar tipburn también se incrementó.

2.3.3 Duración de la luz

La duración de luz en las plantas, también definido como fotoperiodo, es la cantidad de luz y oscuridad en un ciclo diario de 24 h (Jackson, 2008). Bajo condiciones naturales estos valores varían en función de la estación del año y la latitud. Por ejemplo, en el ecuador, el fotoperiodo son 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad todo el año. Dentro de una PFAL este valor lo controla el productor directamente al controlar los tiempos de encendido y apagado del sistema de iluminación.

Hiroki et al. (2014), encontraron que un período de oscuridad más corto promueve el crecimiento de la lechuga, y el peso fresco de la lechuga cultivada bajo un ciclo de luz/oscuridad de 16/2 h fue aproximadamente un 30 % más alto que el de la lechuga cultivada bajo un ciclo de 16/8 h.

Pennisi et al. (2020) compararon los efectos en el crecimiento de lechuga de tres fotoperiodos (16, 20 y 24 h d⁻¹) con una intensidad de luz de 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Sus resultados demuestran que un fotoperiodo de 16 h d⁻¹ permitió obtener una mayor producción de biomasa fresca y área foliar que los demás tratamientos.

La definición del fotoperiodo es importante para la producción dentro de una PFAL, sin embargo, un concepto muy útil que permite la manipulación de la intensidad y duración de la luz es la integral de luz diaria, que se describe a continuación.

2.3.4 Integral de luz diaria

Existe una relación directa entre la cantidad de luz recibida diaria y la acumulación de materia seca en la planta (Hernández et al., 2020). Para cuantificar la cantidad total de luz que recibe una planta cada día se utiliza la integral de luz diaria (DLI). La DLI, es el producto de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) y el fotoperíodo, medido como $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Matysiak et al., 2022). Se puede calcular utilizando la expresión (1).

$$DLI = \frac{(PPFD)(Fotoperiodo)(3600)}{1,000,000} \quad (1)$$

Los valores de DLI varían entre especies y cultivos, por lo que se han hecho investigaciones para definir los valores adecuados. Para el cultivo de lechuga, de acuerdo con Matysiak et al. (2022), generalmente se recomiendan DLI de 12 a 17 mol m⁻² d⁻¹. Both et al. (1997) analizaron 35 tratamientos diferentes de DLI en un rango de 8 a 22 mol m⁻² d⁻¹ en el cultivo de lechuga y encontraron que el DLI óptimo para la lechuga se encuentra en 17 mol m⁻² d⁻¹, pues para valores más grandes se presentó tipburn. Paz, Fisher y Gómez (2019) indican que los valores mínimos de DLI son de 6.5 a 9.7 mol m⁻² d⁻¹.

Kelly et al. (2020), analizaron 12 tratamientos de DLI entre 6.9 a 15.6 mol m⁻² d⁻¹ en lechuga verde “Rex” y lechuga roja “Rouxai”, y encontraron que a un DLI de 15.6 mol m⁻² d⁻¹, la lechuga cultivada bajo un PPFD más bajo y un fotoperíodo más largo tuvo mayor peso fresco y seco que la lechuga cultivada bajo un PPFD más alto y un fotoperíodo más corto. Por lo anterior, conocer el DLI es una herramienta importante que permite manipular el fotoperíodo o el PPFD para cubrir los requerimientos de luz de la planta.

2.4 Hidroponía

Una de las herramientas esenciales para la producción de plantas en las PFALs es la hidroponía. La hidroponía es un método de cultivo de plantas sin suelo que consiste en usar soluciones nutritivas, es decir, agua con fertilizantes, con o sin el uso de algún sustrato (arena, grava, lana de roca, perlita o turba, por mencionar algunos) para proporcionar soporte a la planta (Jensen, 1997).

La clasificación de los sistemas hidropónicos es variada y depende principalmente de las características elegidas; una de ellas sería si se considera o no la recuperación o recirculación de la solución nutritiva. Si la solución nutritiva drenada no se reincorpora al sistema se le conoce como un sistema abierto, por

el contrario, si la solución de nutrientes que no es absorbida por las plantas regresa al tanque de nutrientes se considera un sistema cerrado (Salas, 2009).

Dentro de las diferentes opciones de sistemas hidropónicos, la técnica de película de nutrientes ('NFT' por sus siglas en inglés) y la técnica de flujo profundo ('DFT' por sus siglas en inglés) son los que mayormente se han utilizado de manera comercial dentro de las PFALs (Son et al., 2020). Ambos son sistemas cerrados que brindan un uso de los nutrientes más eficiente al disminuir los gastos en fertilizantes y las emisiones al medio ambiente (Salas, 2009).

En los sistemas de recirculación la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas se puede estimar fácilmente midiendo la pérdida de las soluciones nutritivas en el tanque (Son et al., 2020). A continuación, se aborda el sistema implementado en esta investigación, el sistema NFT.

2.4.1 Sistema NFT

Cooper (1976), introdujo por primera este sistema de cultivo hidropónico. El NFT utiliza canales colocados con un ligero ángulo de inclinación (3 a 5%) para fines de drenaje, y que conducen una corriente de solución nutritiva muy poco profunda hacia las raíces. Se puede hacer con un temporizador o con un flujo continuo (Yuvaraj y Subramanian, 2020). Como se muestra en la

Figura 2-4, la solución nutritiva entra a los diferentes canales de cultivo a través de una bomba de agua, y luego fluye constantemente alrededor de las raíces. El nivel de agua en los canales depende de la pendiente de estos y de la potencia de la bomba de agua. Las plantas logran un buen crecimiento en el sistema NFT porque las raíces están constantemente absorbiendo una solución rica en nutrientes y bien oxigenada (Helmy et al., 2016).

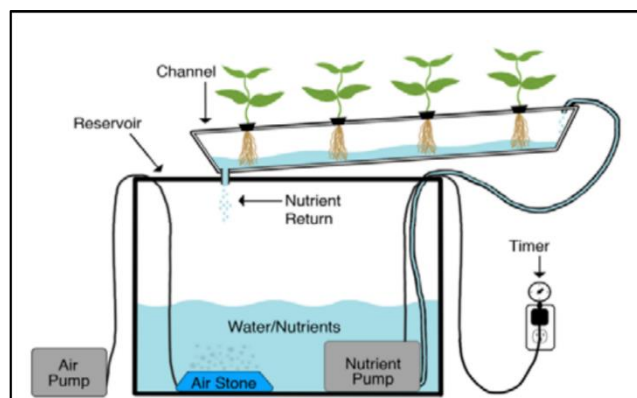


Figura 2-4. Diagrama de un sistema hidropónico tipo NFT.

El diseño del canal (ancho, alto y forma) usualmente está determinado por el cultivo que se va a producir. Las plantas se colocan en el canal con el espaciamiento recomendado para ese cultivo. Por lo general, las plantas se germinan en cubos de sustrato que dan soporte a la planta y posteriormente se colocan directamente sobre cada agujero del canal (Jones, 2016).

El flujo de agua en la técnica NFT es esencial ya que permite que las raíces de las plantas absorban los elementos necesarios de la solución nutritiva para su crecimiento. Al Tawaha et al. (2018), comparó los efectos de tres distintos caudales (10, 20 y 30 l/h) en el crecimiento y calidad del cultivo de lechuga en un sistema NFT para determinar la tasa de flujo de agua ideal que optimice la absorción de nutrientes. Encontró que para valores de 10 y 30 l/h, la altura de la planta, el número de hojas y la tasa de crecimiento es menor que para un flujo de 20 l/h, concluyendo como recomendación considerar este valor de caudal de 20 l/h al momento de diseñar un sistema de producción de lechuga tipo NFT.

2.4.2 Nutrición

Las plantas, a través de las raíces, obtienen oxígeno, agua y los nutrientes minerales necesarios para su correcto crecimiento y desarrollo. Estos nutrientes se pueden agrupar en dos tipos: macronutrientes y micronutrientes. Los primeros son aquellos que la planta requiere en cantidades relativamente elevadas (están en el orden de g/L), mientras que los segundos, por el contrario, son aquellos

elementos que son requeridos en cantidades más reducidas (en el orden de mg/L). En el grupo de macronutrientes se encuentran el Nitrógeno (N), Potasio (K), Fósforo (P), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Azufre (S); mientras que en el grupo de micronutrientes están el Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Cobre (Cu), Boro (B), Zinc (Zn), Molibdeno (Mo) y Cloro (Cl). Ambos grupos de nutrientes son esenciales e igual de importantes, es decir, su función es tan específica que no es posible reemplazarlos u omitirlos (Carbone, 2015).

Los nutrientes esenciales se pueden clasificar en tres categorías según la rapidez con que se eliminan de la solución, como se muestra en el Cuadro 2-1. Los elementos del grupo 1 son absorbidos activamente por las raíces y pueden eliminarse de la solución en unas pocas horas. Los elementos del grupo 2 tienen tasas de absorción intermedias y, por lo general, se eliminan de la solución un poco más rápido que el agua. Los elementos del grupo 3 se absorben pasivamente de la solución y, frecuentemente, se acumulan en la solución a lo largo del tiempo (Bugbee, 2004).

Cuadro 2-1. Tasas aproximadas de absorción de los nutrientes esenciales de las plantas (Bugbee 2004).

Tipo de absorción	Nutrientes
Grupo 1. Absorción activa, rápida eliminación.	NO ₃ , NH ₄ , P, K, Mn
Grupo 2. Absorción intermedia	Mg, S, Fe, Zn, Cu, Mo, Cl
Grupo 3. Absorción pasiva, eliminación lenta.	Ca, B

Cada tipo de planta es única y tiene un rango óptimo de nutrientes, así como un nivel de requerimiento mínimo. Por debajo de este nivel, las plantas empiezan a mostrar síntomas de deficiencia de nutrientes y, por otro lado, un exceso en la absorción puede causar alguna toxicidad que afecte el crecimiento. Es por estas razones que la cantidad apropiada al aplicar es fundamental para una producción exitosa (Uchida, 2000).

2.4.3 Efecto de los nutrientes en las plantas

A continuación, en el Cuadro 2-2 y Cuadro 2-3 se describen las diferentes funciones de los nutrientes esenciales en las plantas, así como los principales síntomas de sus deficiencias (Uchida, 2000).

Cuadro 2-2. Función y síntomas de deficiencia de los macronutrientes en las plantas (Uchida, 2000).

Elemento	Función en la planta	Síntomas de deficiencia
Nitrógeno (N) Disponible como iones de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+)	Crea aminoácidos, que son utilizados para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Se necesita para las reacciones enzimáticas. El N es parte importante de la clorofila, por lo tanto, necesario para la fotosíntesis.	Puede ocurrir retraso en el crecimiento. Amarillamiento en las hojas viejas (clorosis), que puede terminar en su muerte debido a la traslocación de N a los nuevos tejidos. Reducción del rendimiento y calidad del cultivo.
Fósforo (P) Disponible como iones ortofosfato (HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-)	Juega un papel importante en la transferencia de energía ATP y ADP. Es parte de las estructuras de ARN y ADN. Ayuda en el desarrollo radicular, iniciación de floración y desarrollo de semillas y frutos.	Crecimiento lento, débil y atrofiado, debido a que se necesitan grandes cantidades de P en las primeras etapas de la división celular. Al ser móvil puede causar coloración oscura a azul verdosa en las hojas más viejas de algunas plantas. Retraso en la madurez.
Potasio (K) Disponble como ion K^+	El K es un activador de enzimas que promueven el metabolismo. Regula la apertura y el cierre de los estomas de las hojas. Equilibra las cargas eléctricas en el sitio de producción de ATP.	Clorosis a lo largo de los bordes de las hojas (margen de la hoja quemado), primero en hojas viejas debido a su alta movilidad en la planta. Crecimiento lento y

	Participa en la síntesis de proteínas.	atrofiado. Reducción en tamaño de semillas y producción.
Calcio (Ca) Disponibile como ión Ca^{2+}	Tiene un papel importante en la formación de la membrana de la pared celular. Activador de varios sistemas enzimáticos en la síntesis de proteínas. Neutraliza los ácidos orgánicos en las plantas.	Las puntas de las hojas más jóvenes y de las raíces se vuelven marrones y mueren debido a que el Ca no es móvil y no se transloca en la planta. Desgarro a medida que las hojas se expanden.
Magnesio (Mg) Disponibile como ion Mg^{2+}	Es componente principal de la molécula de clorofila y participa activamente en la fotosíntesis. Es necesario para estabilizar las partículas de los ribosomas y la estructura de los ácidos nucleicos.	Clorosis intervenal: el tejido de la hoja entre las nervaduras es amarillento, mientras que las nervaduras de las hojas permanecen verdes.
Azufre (S) Disponibile como ion sulfato SO_4^{2-}	El S es esencial en la formación de proteínas vegetales. Ayuda en la producción de semillas, formación de clorofila y la estabilización de la estructura de las proteínas.	Las hojas jóvenes presentan clorosis con venas uniformes y de color claro. La tasa de crecimiento y la madurez se retrasan. Tallos de las plantas rígidos, delgados y leñosos.

Cuadro 2-3. Función y síntomas de deficiencia de los micronutrientes en las plantas (Uchida, 2000).

Elemento	Función en la planta	Síntomas de deficiencia
Boro (B) Disponible como borato (H_3BO_3)	El B es necesario para la formación del ARN y las actividades celulares. Promueve el crecimiento de las raíces.	Retraso en el crecimiento. Las hojas tienden a engrosarse y pueden enroscarse y volverse quebradizas.
Cobre (Cu) Disponible como ion Cu^{++}	El Cu es esencial en varios sistemas enzimáticos involucrados en la fotosíntesis. Forma parte de la cadena de transporte de electrones.	Crecimiento reducido. Distorsión de las hojas más jóvenes. Posible necrosis del meristemo apical.
Cloro (Cl) Disponible como ion cloruro Cl^-	Participa en la evolución del oxígeno en la fotosíntesis. Aumenta la presión osmótica en la célula y el contenido de agua de los tejidos vegetales.	Clorosis de hojas jóvenes y marchitamiento de la planta, pero la deficiencia ocurre rara vez ya que el Cl se encuentra en la atmósfera y en el agua.
Hierro (Fe) Disponble como Fe^{2+} y Fe^{3+}	Esencial en el sistema de enzimas de las plantas. Fundamental en la síntesis y mantenimiento de la clorofila en las plantas.	Clorosis intervenal en hojas jóvenes. Las hojas más jóvenes pueden ser blancas porque el Fe está involucrado en la producción de clorofila.
Manganeso (Mn) Disponble como Mn^{2+} y Mn^{3+}	Funciona como parte del sistema enzimático de la planta. Está involucrado en el proceso de oxidación-reducción de la fotosíntesis. Participa en la fotólisis en el Fotosistema II.	Clorosis en los tejidos jóvenes. En las dicotiledóneas la clorosis por Mn se manifiesta como pequeñas manchas amarillas.

Molibdeno (Mo)	Es un componente necesario de dos enzimas principales en las plantas, la nitrato reductasa y la nitrogenasa, que son necesarias para la asimilación normal de N.	Los síntomas de deficiencia son semejantes a los del N porque la función del Mo es asimilar el N en la planta.
Disponible como molibdato (MoO ₄)		
Zinc (Zn)	Necesario para la formación de ácido indolacético en las plantas.	Clorosis intervenal apareciendo como bandas en la parte basal de la hoja. En hortalizas las hojas nuevas son pequeñas, moteadas y cloróticas.
Disponible como ion Zn ⁺⁺	Necesario para varias funciones en el metabolismo de la planta.	

2.4.4 Solución nutritiva

Si se busca lograr el éxito en la producción dentro de una PFAL todo comienza con una adecuada selección de la solución nutritiva y para ello hay que considerar los requerimientos nutrimentales del cultivo en cuestión. Existen diferentes soluciones nutritivas definidas para hidroponía, una de las más conocidas es la solución de Hoagland y Arnon (1950), que se presenta en el Cuadro 2-4 y Cuadro 2-5.

Cuadro 2-4. Composición de macronutrientes de la solución Hoagland y Arnon (1950).

Elemento	Concentración en milimoles/L (mM/L)	Concentración en miliequivalentes/L (meq/L)
N-Nitrato (N-NO ₃ ⁻)	14	14
N-Amoniacal (N- NH ₄ ⁺)	1	1
Fósforo (P)	1	1
Potasio (K)	6	6
Calcio (Ca)	4	8
Magnesio (Mg)	2	4
Azufre (S)	2	4

Cuadro 2-5. Composición de micronutrientes de la solución Hoagland y Arnon (1950).

Elemento	Concentración en partes por millón (ppm)
Boro (B)	0.45
Cobre (Cu)	0.02
Hierro (Fe)	7.0
Manganeso (Mn)	0.05
Molibdeno (Mo)	0.0106
Zinc (Zn)	0.48

Una comprensión sólida de la constitución, el uso y manejo de las soluciones nutritivas es fundamental para un crecimiento exitoso del cultivo (Jones, 2016).

2.4.5 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es un indicador o una medida de la concentración de sales disueltas en una solución. En el caso de la solución nutritiva, esta se relaciona con la cantidad de iones disponibles para las plantas en la zona de la raíz (Ding et al., 2018).

No hay un valor de CE óptimo, pues esta es específica del cultivo y depende de las condiciones ambientales (Ding et al., 2018). Varios estudios se han realizado sobre los efectos de la CE de la solución nutritiva en las plantas. Por ejemplo, Samarakoon, Weerasinghe y Weerakkody (2006), compararon los efectos de diferentes valores de CE (1.4, 2.0 y 3.0 dS/m) para el cultivo de lechuga y encontraron que el mejor valor fue 1.4 dS/m. También mencionan que, con el aumento de la CE de la solución nutritiva, tanto el peso fresco como el seco de las plantas disminuyeron significativamente. Esto debido a que una CE muy alta dificulta la absorción de nutrientes pues aumenta la presión osmótica de la solución nutritiva. Por otro lado, una CE muy baja puede afectar gravemente la salud y el rendimiento de las plantas.

Por su parte Quy et al. (2018), indican que la capacidad de crecimiento, el rendimiento y la calidad de las lechugas cultivadas en sistemas hidropónicos

verticales se ven afectados significativamente por la CE y que un valor de 2.5 dS/m se considera de mejor productividad bajo estos sistemas.

2.4.6 pH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de la solución nutritiva e indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en la misma. El rango de medición va de 0 a 14, siendo 7 considerado neutral. Este parámetro influye en la disponibilidad de nutrientes, por lo que debe mantenerse en el rango óptimo (Singh y Dunn, 2016).

De acuerdo Both (2002), el rango óptimo de pH para la solución nutritiva es entre 5.6 y 6.0, lo cual coincide con Bugbee (2004), que indica que el pH recomendado para el cultivo hidropónico está entre 5.5 y 5.8 porque la disponibilidad general de nutrientes es óptima a un pH ligeramente ácido. Las disponibilidades de Mn, Cu, Zn y especialmente Fe se reducen a pH más altos, y hay una pequeña disminución en la disponibilidad de P, K, Ca, Mg a pH más bajos. Esta disponibilidad reducida significa una menor absorción de nutrientes, pero no necesariamente una deficiencia de nutrientes.

2.4.7 Oxígeno disuelto

La ausencia de oxígeno disuelto (OD) en la solución nutritiva detiene el proceso de respiración y, eventualmente, daña gravemente y mata a la planta. En sistemas hidropónicos, la lechuga crece satisfactoriamente a un nivel de OD de al menos 4 ppm. Si no se agrega oxígeno al estanque, los niveles de OD caerán a casi 0 ppm. Por lo general, el nivel óptimo de OD en que se debe mantener la solución nutritiva es alrededor de 8 ppm. Para sistemas lo suficientemente pequeños, es posible agregar aire a la solución a través de una bomba de aire y una piedra de aire para acuarios (Brechtner et al., 1996).

Los sistemas NFT emplean diferentes pendientes para asegurar la recirculación de la solución nutritiva y, a su vez, evitar el agotamiento del OD en la misma. Por

esta razón, un diseño adecuado del sistema hidropónico garantiza una correcta oxigenación de la solución y un buen crecimiento de las plantas (Kubota, 2020).

2.4.8 Manejo de la solución nutritiva

Bugbee (2004), presenta una explicación detallada de los requisitos y el manejo para sistemas hidropónicos en recirculación. Para llevar un correcto manejo de la solución nutritiva a lo largo del ciclo de cultivo es necesario reponer volúmenes de agua constantemente, así como reconstituir el pH y la CE. Esto último puede llegar a ser complicado, debido a que, como se mencionó anteriormente, las plantas eliminan rápidamente su ración diaria de algunos nutrientes mientras que otros nutrientes se acumulan en la solución.

Algunas recomendaciones que menciona Jones (2016), son ajustar el pH en el rango óptimo, no tener iones presentes en cantidades tóxicas o en niveles que puedan interferir con otros iones y tener un medio de enraizamiento bien aireado.

Para controlar el pH sin agregar cantidades excesivas de otros cationes, la mejor solución es usar ácido nítrico (HNO_3). Este puede suplir el 50% de las necesidades de nitrógeno del cultivo. Si se requiere nitrógeno adicional, se puede añadir amonio, pero hay que considerar que el amonio disminuye la absorción de cationes como K, Ca, Mg y algunos micronutrientes. Por otro lado, el Ca se acumula en la solución si se agrega demasiado en la solución de reposición (Bugbee, 2004).

2.5 Literatura citada

- Agustian, I., Imam, B., Santosa, H., Daratha, N. y Faurina. (2022). NFT Hydroponic Control Using Mamdani Fuzzy Inference System. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. Volume 3, Issue 3. ISSN: 2715-5072.
- Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2020a). Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: A review. *South African Journal of Botany*, 130, 75-89.

- Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2020b). Lettuce plant growth and tipburn occurrence as affected by airflow using a multi-fan system in a plant factory with artificial light. *Journal of thermal biology*, 88, 102496.
- Al Tawaha, A., Al-Karaki, G., Al Tawaha, A., Sirajuddin, S., Makhadmeh, I., Megat, P., Youssef, R., & Alsultan, W. & Massadeh, A. (2018). Effect of water flow rate on quantity and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in nutrient film technique (NFT) under hydroponics conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 24. 793-800.
- Blandford, D. (2011) The Contribution of Agriculture to Green Growth; Report to the OECD; pp. 1–36.
- Both, A. (2002). Ten years of hydroponic lettuce research. The State University of New Jersey, New Jersey.
- Both, A. J., Albright, L. D., Langhans, R. W., Reiser, R. A., & Vinzant, B. G. (1997). HYDROPONIC LETTUCE PRODUCTION INFLUENCED BY INTEGRATED SUPPLEMENTAL LIGHT LEVELS IN A CONTROLLED ENVIRONMENT AGRICULTURE FACILITY: EXPERIMENTAL RESULTS. *Acta Horticulturae*, (418), 45–52. doi:10.17660/actahortic.1997.418.5
- Brechner, M., Both, A. J., & Staff, C. E. A. (1996). Hydroponic lettuce handbook. *Cornell Controlled Environment Agriculture*, 834, 504-509.
- Bugbee, B. (2004). Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Horticulturae*. 648. 99-112. 10.17660/ActaHortic.2004.648.12.
- Butturini, M. & Marcelis, L.F.M. (2019). Vertical farming in Europe: present status and outlook. 10.1016/B978-0-12-816691-8.00004-2.
- Carbone, A. (2015) Nutrición mineral. En Beltrano, J. y Gimenez, D. O. (Eds.), *Cultivo en hidroponía*. Editorial de la Universidad de la Plata. Buenos Aires, Argentina. pp: 62-72.
- Carotti, L., Graamans, L., Puksic F., Butturini M., Meinen, E., Heuvelink, E. and Stanghellini, C. (2021). Plant Factories Are Heating Up: Hunting for the Best Combination of Light Intensity, Air Temperature and Root-Zone Temperature in Lettuce Production. *Front. Plant Sci*. 11:592171. doi: 10.3389/fpls.2020.592171
- Cooper, A. (1976). *Nutrient Film Technique for Growing Crops*. Grower Books. London. England.
- De las Rivas, J. (2008). La luz y el aparato fotosintético. En J. Azcón & M. Talón (Eds.), *Fundamentos de fisiología vegetal*. (pp. 165-189). McGraw Hill.
- Despommier, D. (2011). Advantages of the Vertical Farm. *Springer Optimization and Its Applications*, 259–275. doi:10.1007/978-1-4419-0745-5_16
- Ding, X., Jiang, Y., Zhao, H., Guo, D., He, L., Liu, F., Zhou, Q., Nandwani, D., Hui, D. & Yu, J. (2018). Electrical conductivity of nutrient solution influenced photosynthesis, quality, and antioxidant enzyme activity of pakchoi

- (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*) in a hydroponic system. PLoS One. doi: 10.1371/journal.pone.0202090.
- Escobar, R., Klinkhamer, P. y Leiss, K. (2017). Interactive Effects of UV-B Light with Abiotic Factors on Plant Growth and Chemistry, and Their Consequences for Defense against Arthropod Herbivores. *Frontiers in Plant Science*. 8. 10.3389/fpls.2017.00278.
- Evans, J. R. (2013). Improving Photosynthesis. *PLANT PHYSIOLOGY*, 162(4), 1780–1793. doi:10.1104/pp.113.219006
- FAO. Food and Agricultural Organisation of the United Nations. (2014) "The State of Food and Agriculture 2014 IN BRIEF." Web. 6 Nov. 2015.
- Goto, E. (2012). Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. *Acta Horticulturae*, (956), 37–49. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.956>.
- Helmy, Nursyahid, A., Agung, T. y Hasan, A. (2016). Nutrient Film Technique (NFT) Hydroponic Monitoring System. *Journal of Applied Information and Communication Technologies*. Vol 1. No 1. Doi: <http://dx.doi.org/10.32497/jaict.v1i1.425>
- Hernandez, E., Timmons, M. B., & Mattson, N. S. (2020). Quality, Yield, and Biomass Efficacy of Several Hydroponic Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Cultivars in Response to High Pressure Sodium Lights or Light Emitting Diodes for Greenhouse Supplemental Lighting. *Horticulturae*, 6(1), 7. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/horticulturae6010007>
- Hicklenton, P., & Heins, D. (1997). Temperature. In R. W. Langhans & T. W. Tibbitts (Eds.), *Plant Growth Chamber Handbook*. (pp. 31-42). Ames, IA, NCR-101 Regional Committee on Controlled Environment Technology and Use.
- Hiroki, R., Shimizu, H., Ito, A., Nakashima, H., Miyasaka, J. and Ohdoi, K. (2014). IDENTIFYING THE OPTIMUM LIGHT CYCLE FOR LETTUCE GROWTH IN A PLANT FACTORY. *Acta Hortic.* 1037, 863-868. DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1037.115
- Hoagland, D. R. y Arnon, D. L. (1950) The water culture methods for growing plants without soil. Berkeley, CA, USA, The College of Agriculture, University of California, California Agriculture Experiment Station 32 p (Bulletin 347)
- Jackson, S. D. (2008). Plant responses to photoperiod. *New Phytologist*, 181(3), 517–531. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02681.x
- Jensen, M. (1997). Hydroponics. *HortScience*, 32(6), 1018-1021. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.32.6.1018>.
- Jones, J. (2016). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. CRC press.

- Kalantari, F., Mohd Tahir, O., Mahmoudi Lahijani, A., & Kalantari, S. (2017). A Review of Vertical Farming Technology: A Guide for Implementation of Building Integrated Agriculture in Cities. *Advanced Engineering Forum*, 24, 76–91. doi:10.4028/www.scientific.net/aef.24.76
- Kelly, N., Choe, D., Meng, Q., & Runkle, E. S. (2020). Promotion of lettuce growth under an increasing daily light integral depends on the combination of the photosynthetic photon flux density and photoperiod. *Scientia Horticulturae*, 272, 109565. doi:10.1016/j.scienta.2020.109565
- Kitaya, Y., Shibuya, T., Yoshida, M. & Kiyota, M. (2004). Effects of air velocity on photosynthesis of plant canopies under elevated CO₂ levels in a plant culture system. *Advances in Space Research*, 34 (7) pp. 1466-1469
- Kozai, T. and Niu, G. (2020) Chapter 1 – Introduction. *Plant Factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Second edition. Academic Press. Pp 3-6.
- Kozai, T.; Niu, G. Plant factory as a resource-efficient closed plant production system. In *Plant Factory an Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*, 1st ed.; Kozai, T., Niu, G., Takagaki, M., Eds.; Elsevier: London, UK, 2016; pp. 69–90
- Kubota, C. (2020). Growth, development, transpiration, and translocation as affected by abiotic environmental factors. In *Plant Factory* (pp. 207-220). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00013-3>.
- Lin, K., Huang, M., Huang, W., Hsu, M., Yang, Z., & Yang, C. (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Sci Hortic.*, 150, 86–91.
- Liu, J., y Van Iersel, M. (2021). Photosynthetic Physiology of Blue, Green, and Red Light: Light Intensity Effects and Underlying Mechanisms. *Frontiers in Plant Science*. 12. 619987. 10.3389/fpls.2021.619987.
- Matysiak, B., Ropelewska, E., Wrzodak, A., Kowalski, A., & Kaniszewski, S. (2022). Yield and Quality of Romaine Lettuce at Different Daily Light Integral in an Indoor Controlled Environment. *Agronomy*, 12(5), 1026. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy12051026>
- McCree KJ (1971) The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric Meteorol* 9: 191–216
- Nguyen, T., Cho, K., Lee, H., Cho, D., Lee, G., Jang, S., Lee, Y., et al. (2021). Effects of White LED Lighting with Specific Shorter Blue and/or Green Wavelength on the Growth and Quality of Two Lettuce Cultivars in a Vertical Farming System. *Agronomy*, 11(11), 2111. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy11112111>
- Niu, G., Kozai, T., & Sabeh, N. (2020). Physical environmental factors and their properties. In *Plant factory* (pp. 185-195). Academic Press.

- Noh, K., & Jeong, B. (2021). Optimizing temperature and photoperiod in a home cultivation system to program normal, delayed, and hastened growth and development modes for leafy Oak-leaf and Romaine lettuces. *Sustainability*, 13(19), 10879.
- Nozaki, S. (2021). Controlled environment agriculture capturing growing interest. The accelerating expansion of urban agriculture. Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute.
- Okamoto, K., Yanagi, T., Takita, S., Tanaka, M., Higuchi, T., Ushida, Y. y Watanabe, H. (1996). Development of plant growth apparatus using blue and red LED as artificial light source. *Acta Hort.* 440:111-6. doi: 10.17660/actahortic.1996.440.20. PMID: 11541564.
- Paz, M., Fisher, P. y Gómez, C. (2019) Minimum light requirement for indoor gardening of lettuce. *Urban Agric. Reg. Food Syst.* 4, 190001.
- Peet, M., & Krizek, D. (1997). Carbon dioxide. In R. W. Langhans & T. W. Tibbitts (Eds.), *Plant Growth Chamber Handbook*. (pp. 65-80). Ames, IA, NCR-101 Regional Committee on Controlled Environment Technology and Use.
- Pennisi, G., Orsini, F., Landolfo, M., Pistillo, A., Crepaldi, A., Nicola, S., Fernández, J., Marcelis, L. & Gianquinto, G. (2020). Optimal photoperiod for indoor cultivation of leafy vegetables and herbs. *Eur. J. Hortic. Sci.* 85, 329–338. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.4>.
- Quy, N., Sinsiri, W., Chitchamnong, S., Boontiang, K., & Kaewduangta, W. (2018). Effects of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution on growth, yield and quality of lettuce under vertical hydroponic systems. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 46(3), 613–622. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj/article/view/250126>.
- Runkle, E. (2011). The R to FR Ratio. *Greenhouse Product News*. Recuperado el 22 de Agosto de 2022 de <http://gpnmag.com/article/r-fr-ratio/>
- Sago, Y. (2016) Effects of light intensity and growth rate on tipburn development and leaf calcium concentration in butterhead lettuce. *HortScience* 2016, 51, 1087–1091.
- Salas, S. M. C. (2009). *Fertirrigación en Cultivos Sin Suelo con Recirculación de la Solución Nutritiva. Tecnología Aplicada*. Universidad de Almería, España. 5 p.
- Samarakoon, U., Weerasinghe, P. & Weerakkody, A. (2006) Effect of Electrical Conductivity [EC] of the Nutrient Solution on Nutrient Uptake, Growth and Yield of Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L.) in Stationary Culture. *Trop Agric Res* 18: 13–21.
- SharathKumar, M.; Heuvelink, E.; Marcelis, L.F.M. (2020) Vertical Farming: Moving from Genetic to Environmental Modification. *Trends Plant Sci.* 2020, 25, 724–727.

- Singh, H., & Dunn, B. (2016). Electrical conductivity and pH guide for hydroponics. Oklahoma Cooperative Extension Service.
- Smith, H. (1982). Light Quality, Photoperception, and Plant Strategy. *Annual Review of Plant Physiology*, 33(1), 481–518.
- Son, J., Kim, H. & Ahn, T. (2020). Hydroponic systems. *Plant Factory*. Academic Press, pp. 213–221. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00020-0>
- Srivani, P., Yamuna, D., y Manjula, S. (2019). A Controlled Environment Agriculture with Hydroponics: Variants, Parameters, Methodologies and Challenges for Smart Farming. 2019 Fifteenth International Conference on Information Processing (ICINPRO). doi:10.1109/icinpro47689.2019.909
- Takagaki, M.; Hara, H.; Kozai, T. (2020) Micro-and mini-PFALs for improving the quality of life in urban areas. In *Plant Factory*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; pp. 117–128.
- Tang, Y., Guo, S., Ai, W. y Qin, L. (2009). Effects of Red and Blue Light Emitting Diodes (LEDs) on the Growth and Development of Lettuce (var. Youmaicai). *SAE Technical Papers*. 23. 10.4271/2009-01-2565.
- Uchida, R. (2000). Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. *Plant nutrient management in Hawaii's soils*, 4, 31-55
- Van Gerrewey, T., Boon, N., & Geelen, D. (2021). Vertical Farming: The Only Way Is Up? *Agronomy*, 12(1), 2. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy12010002>
- Wimalasekera, R. (2019). Effect of Light Intensity on Photosynthesis. *Photosynthesis, Productivity and Environmental Stress*, 65–73. doi:10.1002/9781119501800.ch4
- Xu, Y. (2019). Nature and Source of Light for Plant Factory. *Plant Factory Using Artificial Light*, 47–69. doi:10.1016/b978-0-12-813973-8.00002-6
- Yuvaraj, M. y Subramanian, K. (2020) Different Types of Hydroponics System. *Biotica Research Today* 2(8): 835-837.

3. MONITOREO Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MINIFÁBRICA DE PLANTAS CON ILUMINACIÓN ARTIFICIAL USANDO INTERNET DE LAS COSAS

3.1 Resumen

En México, se proyecta una población de 150 millones de habitantes para el año 2050. Para ayudar a satisfacer la creciente demanda de alimentos en zonas urbanas y periurbanas, con una disponibilidad de recursos cada vez menor y frente a condiciones ambientales adversas, una alternativa es la producción de cultivos en interior con fábricas de plantas con iluminación artificial (PFAL). El objetivo de este trabajo fue construir, automatizar y evaluar una mini-PFAL para producción de hortalizas de hoja. El diseño de la mini-PFAL se realizó considerando su adaptabilidad a diferentes cultivos en términos de densidad, espaciamiento y altura de las plantas. Se instaló un sistema de cultivo Nutrient Film Technique (NFT) de cuatro niveles y para proporcionar luz a las plantas se instalaron nueve lámparas LED de luz blanca en cada nivel. Haciendo uso de microcontroladores Arduino y plataformas del internet de las cosas (IoT) se desarrolló un sistema de monitoreo de variables fisicoquímicas de la solución nutritiva y ambientales, y de control automático dentro de la mini-PFAL. El sistema desarrollado permite la visualización en tiempo real mediante un smartphone de las mediciones de los sensores para conocer la condición real de la mini-PFAL, así como accionar de manera remota distintos actuadores para controlar los componentes dentro de la misma. La mini-PFAL se evaluó en tres ciclos de un cultivo de lechugas (*Lactuca sativa* L.), en cada ciclo se cultivaron 96 lechugas. El peso fresco y seco que alcanzó la lechuga es comparable a lo reportado en la literatura para PFAL. El sistema desarrollado fue capaz de mantener de manera automática la humedad relativa y el pH de la solución nutritiva en el rango establecido. La mini-PFAL construida permite producir lechuga que pueden usarse como fuente de alimentos para autoconsumo, o bien, escalarse como un modelo de producción semi-comercial.

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., iluminación LED, nutrient film technique, ThingSpeak, Blynk, Arduino.

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Joshua Esaú Patiño Espejel

Director de Tesis: Dr. Agustín Ruíz García

3.2 Introducción

Las Fábricas de Plantas con Iluminación Artificial (PFALs) son sistemas cerrados que consisten en producir alimentos en capas apiladas verticalmente en donde todos los elementos responsables del crecimiento, como la luz, la concentración de dióxido de carbono [CO₂], la temperatura, la humedad, el agua y los nutrientes, son controlados óptimamente (Kozai y Niu, 2020a), con el fin de obtener altos rendimientos y productos de calidad, usando la mínima cantidad de recursos (Kozai y Niu, 2020b). Estas ofrecen muchas ventajas sobre la agricultura horizontal convencional en términos de mayor producción de cultivos, conservación de recursos, impacto en la salud humana, crecimiento urbano, sostenibilidad energética, entre otras. Si se diseñan correctamente, las PFALs pueden eliminar la necesidad de crear tierras de cultivo adicionales, ayudar a crear un medio ambiente limpio y resolver la crisis alimentaria en ciudades y suburbios en crecimiento (Shomefun et al., 2018).

No obstante, a pesar de los avances en las PFALs, uno de los principales retos a los que se enfrenta este sistema de producción es el alto grado de tecnificación, por lo que surge la necesidad de crear e innovar modelos de utilidad para hacer su manejo lo más accesible al usuario y una herramienta que puede ayudar a alcanzar este objetivo es el llamado “Internet de las Cosas” (IoT, por sus siglas en inglés), que hace referencia a un sistema de objetos inteligentes con la capacidad de compartir información, datos o recursos, y actuar o reaccionar ante situaciones y cambios en el entorno (Madakam et al., 2015).

Los campos de aplicación del IoT son muy extensos y abarcan desde las ciudades inteligentes (Zanella et al., 2014), hogares inteligentes (Jabbar et al., 2019) y agricultura inteligente (Kassim, 2020). En este último, el objetivo del IoT es mejorar la eficiencia operativa y el rendimiento de la producción, así como mejorar la calidad de un producto (Elijah, 2018). También, el IoT reduce la intervención del agricultor en el sistema de cultivo y permite conocer el estado actual a través de Internet sin tener que visitar personalmente el lugar (Jeaunita, 2018).

Es importante establecer que a pesar de que tecnologías como sistemas de monitoreo para detectar la necesidad de agua, nutrientes y otros requisitos de una planta o sensores para advertir a los agricultores el cambio en alguna variable, no son tecnologías totalmente nuevas, su desarrollo ha estado en curso y proliferará en un futuro, hasta que, según parece, las operaciones agrícolas estén completamente automatizadas (Al-Kodmany, 2018). Sin embargo, actualmente la aplicación del IoT más frecuente para la agricultura inteligente es el monitoreo de cultivos, por lo que desarrollar una interfaz fácil de usar mejorando la situación de la agricultura física e implementar un sistema de alertas para informar al operador sobre eventos críticos, son algunas de las posibles mejoras para futuros desarrollos tecnológicos en el campo de la agricultura inteligente (Saad et al., 2021).

En lo que respecta a las PFALs, debido a los altos costos operativos, la escasez de trabajadores calificados y la necesidad de una alta eficiencia, existe una fuerte demanda de automatización (Van Delden et al., 2021). Al mismo tiempo, al ser un tema relativamente nuevo, las experiencias y los resultados a pequeña escala también podrían aplicarse en fábricas comerciales e industriales a gran escala (Takagaki et al., 2020), por lo que desarrollar un sistema haciendo uso del IoT que permita monitorear en tiempo real las distintas variables ambientales en una mini-PFAL, almacenar en la nube los valores para su posterior procesamiento y hacer uso de sistemas de alertas, control remoto y automatización, es una pieza clave para una operación exitosa de las mismas.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue establecer un sistema de monitoreo de las variables involucradas en el crecimiento del cultivo de lechuga *Lactuca sativa* L. var. Capitata, así como incluir la automatización de diferentes componentes para implementarlo en una mini-PFAL con el fin de facilitar las actividades para la producción de las hortalizas de hoja más comúnmente cultivadas actualmente bajo este método de producción.

3.3 Materiales y métodos

Se construyó una mini-PFAL para producción de hortalizas de hoja, para ello se montó una carpa de cultivo con plástico blanco/negro de dimensiones 2.0 x 1.1 x 2.4 m de largo, ancho y alto, con dos extractores conectados al exterior para ingresar y expulsar aire. Se construyó un sistema hidropónico vertical de cuatro niveles tipo Nutrient Film Technique (NFT), con dimensiones de 1.5 x 0.9 m de largo y ancho por nivel. Para cultivar las plantas, se colocaron cuatro canales de cultivo contruidos con bajantes de agua de vinilo y un espaciamiento entre agujeros de 12 cm, configurados para proporcionar una pendiente de 3% longitudinalmente para lograr la recirculación. Para llevar la solución nutritiva (S.N.) a cada nivel del sistema NFT, se utilizó una bomba sumergible marca VIVOSUN de 800 g/h y 24 W. De acuerdo con Ahmed et al. (2020) la ventilación multinivel reduce la incidencia de tip-burn en las lechugas, por lo que para remover la capa de aire circundante a las hojas de la planta se utilizó un ventilador de torre giratorio de 42 W a 127V AC de la marca IUSA.

Para satisfacer los requerimientos de luz de la planta, en cada nivel se instalaron nueve lámparas LED de luz blanca marca Monios-L de 3 pies de largo, con una potencia de 15 W y espaciadas a 17 cm. En la Figura 3-1 se muestra la distribución espectral de las lámparas obtenida con el espectrofotómetro USB650 de la marca Ocean optics. Este arreglo proporcionó en promedio $215 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ medidos a una altura de 2 cm arriba de los canales de cultivo.

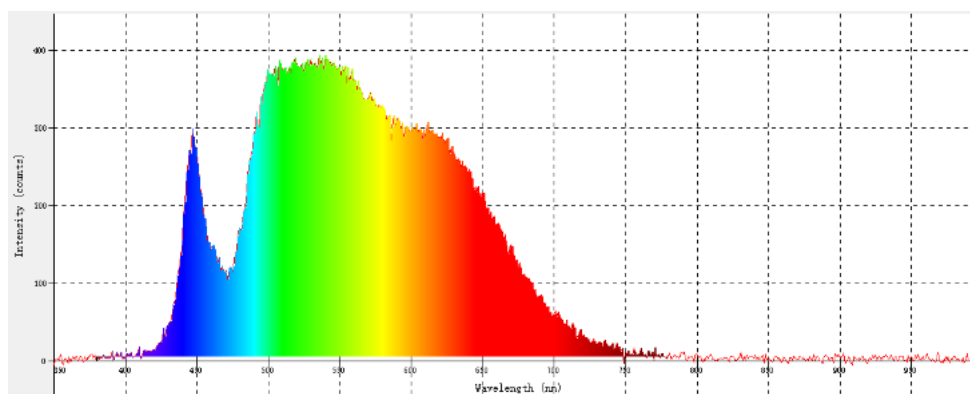


Figura 3-1. Diagrama espectral de las lámparas instaladas en la mini-PFAL.

3.3.1 Variables sensadas, sensores utilizados y unidades de procesamiento

Para realizar un manejo adecuado del cultivo, es necesario conocer en tiempo real los valores de variables tanto ambientales, como de la S.N., por ello, en cuanto a las primeras, el sistema desarrollado se encarga de monitorear la temperatura ambiental, humedad relativa, concentración de CO₂ y la densidad del flujo de fotones fotosintéticos (PPFD); y respecto a la S.N. monitorea la temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y el volumen en el tanque de almacenamiento.

Los componentes del sistema propuesto fueron seleccionados con el objetivo de poder incorporarlos en una unidad multi-tarea compatible con la programación de Arduino. En el cuadro Cuadro 3-1 se presentan los sensores utilizados para el desarrollo del sistema con su rango de medición y precisión.

Cuadro 3-1. Sensores utilizados en el sistema de monitoreo.

Sensor	Rango de medición	Precisión	Referencia
DHT22	-40°C a 80°C (T°) y 0 a 100% (H.R.)	± 0.5 °C ± 2%	Aosong Electronics (2017)
EZO-CO ₂ TM	0 a 10,000 ppm	± 5%	AtlasScientific (s.f. a)
DS18B20	-55°C a 125°C	± 0.5°C	Maxim Integrated Products (2019)
HC-SR04	2 a 450 cm	± 0.3 cm	ElecFreaks (s.f.)
EZO-pH TM	0 a 14 unidades pH	± 0.002	AtlasScientific (s.f. b)
EZO- Conductivity K 1.0 TM	5 a 200,000 µS cm ⁻¹	± 5%	AtlasScientific (s.f. c)
EZO- Dissolved Oxygen TM	0.01 a 100 mg L ⁻¹	± 0.05 mg L ⁻¹	AtlasScientific (s.f. d)
Apogee SQ-515-SS	0 a 4000 µmol m ⁻² s ⁻¹	± 0.5%	Apogee Instruments (2022)

Para lograr el correcto funcionamiento del sistema se hizo uso de tres diferentes microcontroladores: el ESP32 DevKitV1, la placa ArduinoUNO (R3) y el módulo ESP-01. El corazón del sistema desarrollado es el microcontrolador de bajo costo ESP32 (Espressif Systems), que cuenta con conectividad Wi-Fi y Bluetooth

integrada, además cuenta con 30 pines GPIO, comunicación UART, I²C, SPI, y cuenta con dos pines convertidor analógico a digital y viceversa (Espressif Systems, 2022). Se usaron dos placas ArduinoUNO, la primera para el monitoreo de variables y el segundo para el control de los actuadores. El ArduinoUNO cuenta con 14 pines digitales de GPIO, 6 entradas analógicas y conexión USB (Arduino, 2018). Finalmente, para enviar los valores promedio de los sensores a la nube de ThingSpeak se utilizó el módulo ESP-01. Este módulo es un transceptor basado en el chip ESP8266 que permite añadir Wi-Fi a los proyectos electrónicos. Este se incorporó con el propósito de que no existiera algún conflicto entre plataformas al establecer la comunicación.

3.3.2 Plataformas utilizadas

Blynk

Actualmente, los teléfonos móviles se han convertido en una extensión del cuerpo humano, por esta razón se decidió que lo más práctico es tener el monitoreo y control directamente desde el móvil. Para esto, se utilizó la aplicación Blynk (<http://blynk.io>). Esta plataforma del Internet de las Cosas es usada para administrar remotamente dispositivos electrónicos conectados a la red Wi-Fi, puede ser desde una computadora o un smartphone. Tiene un modo gratuito y otro de pago, en esta investigación se utilizó el modo de pago para acceder al total de funciones además de un almacenamiento de datos en la nube de tres meses.

ThingSpeak

Para el almacenamiento de datos en la nube, se utilizó la plataforma ThingSpeak (<http://thingspeak.com>). Este sitio permite el envío y almacenamiento de información desde dispositivos IoT, una visualización en tiempo real y además tiene la capacidad de ejecutar MATLAB[®] haciendo posible el análisis de datos y su procesamiento en tiempo real. En el sistema propuesto, se utilizó la licencia gratuita de ThingSpeak solamente para el almacenamiento de datos.

3.3.3 Vista general del sistema

Como se muestra en la Figura 3-2, un sistema de riego vertical está conectado a la bomba sumergible ubicada dentro del tanque de almacenamiento de la S.N. Este sistema de riego conecta a cada uno de los canales de cultivo de los diferentes niveles de la mini-PFAL. La S.N. recorre cada canal por gravedad proporcionando el agua y nutrientes necesarios a todas las plantas para su adecuado crecimiento. Al final de cada canal de cultivo se cuenta con un sistema de colección que redirige la S.N. de vuelta al tanque de almacenamiento.

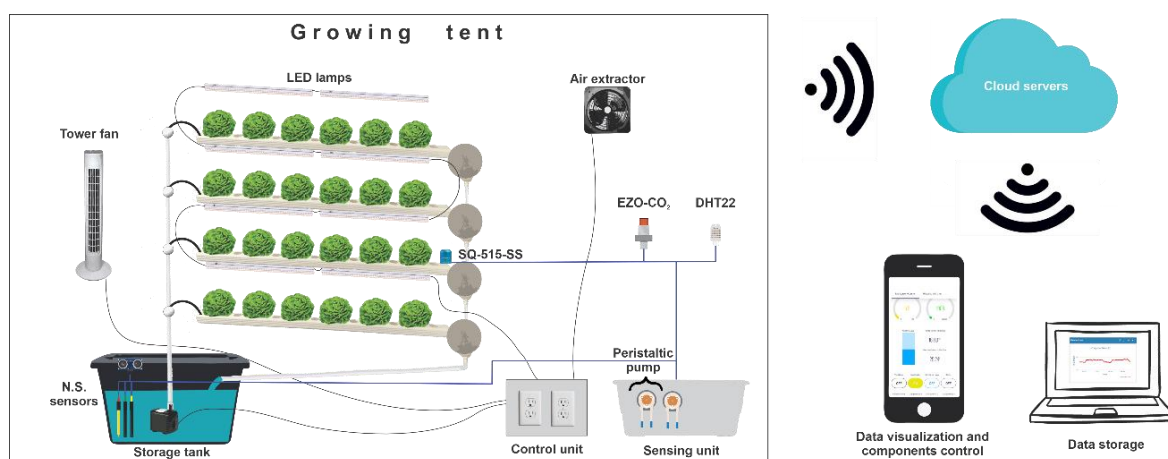


Figura 3-2. Vista general del sistema mini-PFAL y el sistema de monitoreo.

Ubicadas en la parte superior de cada estante de cultivo se encuentran las lámparas LED encargadas de proporcionar la energía necesaria para que las plantas realicen sus procesos fotosintéticos. Como material vegetal se seleccionó lechuga variedad mantequilla (*Lactuca sativa* L. var. Capitata) por ser de los cultivos más comunes dentro de estos sistemas.

Los sensores DHT22 y EZO-CO₂, fueron ubicados estratégicamente cerca del cultivo para proporcionar la información lo más precisa a lo que la planta percibe. El sensor de PPFD (SQ-515-SS) fue ubicado debajo de las lámparas LED a la altura del dosel de la planta y los sensores de la S.N. (EZO-pH, EZO Dissolved Oxygen, EZO-Conductivity, DS18B20 y HC-SR04) se colocaron dentro del tanque de almacenamiento.

Una vez adquiridos los datos de los sensores, el sistema propuesto se encarga de enviar vía Wi-Fi los últimos datos leídos a la nube de la plataforma Blynk y los valores promedio por minuto a la de ThingSpeak. De esta forma, el usuario puede conocer el estado actual de las diferentes variables sensadas vía remota desde cualquier lugar con un smartphone, siempre y cuando esté conectado a la red Wi-Fi.

Para controlar el encendido y apagado de los componentes dentro de la mini-PFAL (luces led, bomba para riego, ventilador de torre, extractor, bomba peristáltica), la app Blynk envía la señal del smartphone a la nube vía Wi-Fi y el sistema propuesto recibe la orden y controla el relé 5V correspondiente de cada componente. De esta forma si alguna variable ambiental o de la N.S. está fuera de rango, el usuario puede tomar acción sin necesidad de estar físicamente dentro del cuarto de cultivo.

3.3.4 Sistema de comunicación

El mecanismo de comunicación se presenta en la Figura 3-3. El sistema usa comunicación I²C, en este caso el ESP32 funciona como unidad central de manejo y tiene el papel de maestro, mientras que los dos Arduinos y los sensores Atlas Scientific tienen el papel de esclavos. El primer ArduinoUNO (Esclavo 1) está trabajando de manera independiente midiendo cada 10 segundos los valores de temperatura y humedad del aire, PPFD, el nivel de agua del tanque de almacenamiento de la S.N. y la temperatura de esta. Una vez leídos los valores, los almacena temporalmente hasta que el ESP32 los solicita y entonces vuelve a realizar las lecturas.

En lo que respecta al ESP32 (Maestro), primero solicita los valores de los sensores correspondientes al Esclavo 1 y, posteriormente, solicita y lee secuencialmente cada uno de los sensores Atlas Scientific (Esclavos 3 a 6). Cuando los datos de todos los sensores son adquiridos, los envía al servidor de Blynk para su visualización en tiempo real desde el smartphone y adicionalmente, los almacena de manera temporal. Este proceso lo realiza cada 10 segundos

hasta acumular seis lecturas y entonces calcula el promedio de cada variable por minuto y es ese dato el que, mediante comunicación UART, le transmite al Módulo ESP-01 para que este lo envíe a la nube de ThingSpeak para su almacenamiento. Finalmente, cuando el usuario decide encender o apagar algún componente, basta con presionar el botón en la interfaz de aplicación del smartphone y entonces la comunicación va en sentido contrario para llegar al ESP32, el cual, en función del componente deseado, manda una nueva señal al segundo Arduino UNO (Esclavo 2) encargado de activar los actuadores correspondientes del componente seleccionado de la mini-PFAL.

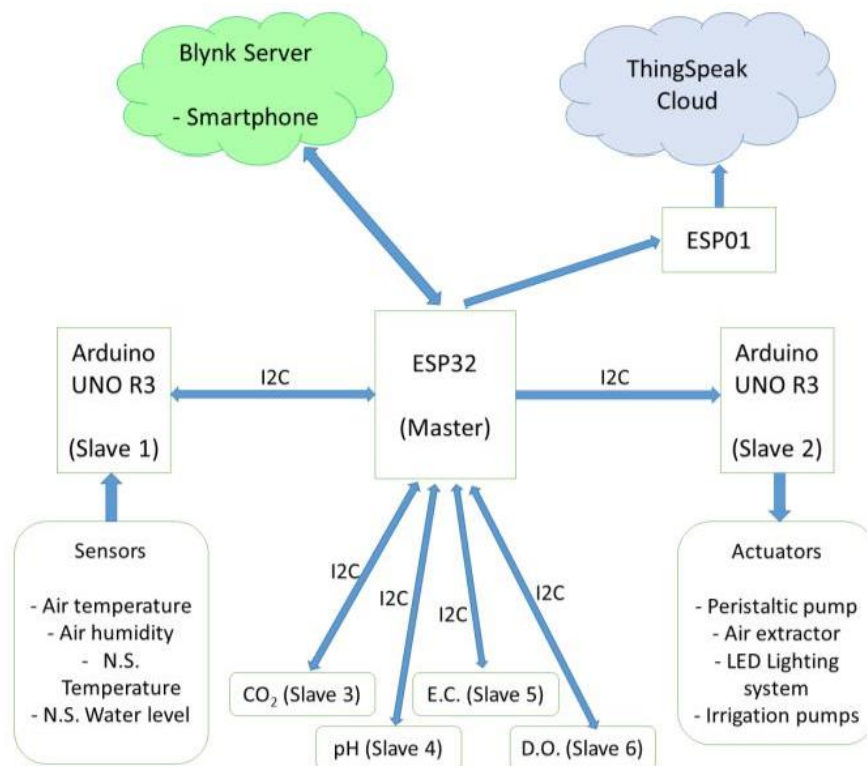


Figura 3-3. Sistema de comunicación.

3.3.5 Desarrollo del sistema de monitoreo y control

El diagrama de conexión final del sistema de monitoreo y control se muestra en la Figura 3-4 realizada con el software Fritzing que se puede descargar del sitio web oficial <https://fritzing.org/>. En la Figura 3-5 se presenta la conexión física del sistema.

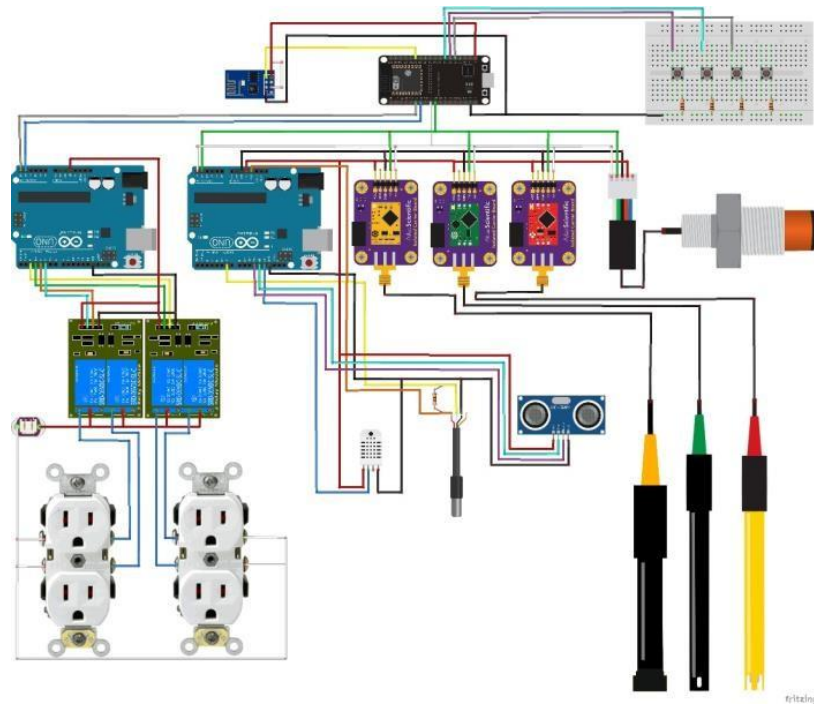


Figura 3-4. Diagrama de conexión final del sistema.

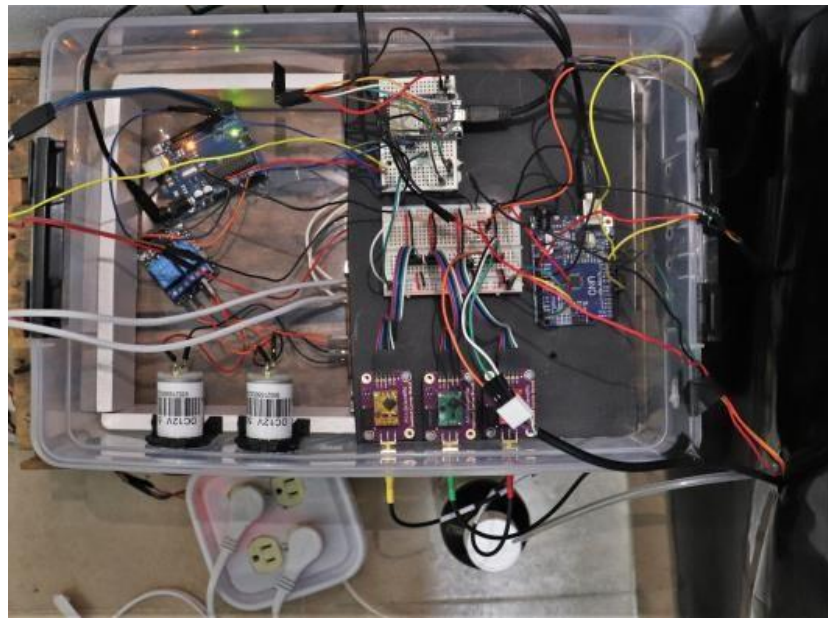


Figura 3-5. Conexión física del sistema.

Los sensores DHT22, SQ-515-SS, DS18B20 y HC-SR04 están conectados al Esclavo 1 mientras que el resto de los sensores (EZO Dissolved Oxygen, EZO-Conductivity, EZO-pH y EZO-CO₂) están conectados directamente al Maestro.

Con el fin de obtener lecturas precisas y confiables, se realizó la calibración de los sensores DO, EC y pH siguiendo el procedimiento descrito en la documentación oficial del sitio web Atlas Scientific, antes de la implementación en la mini-PFAL.

3.3.6 Configuración de cuentas utilizadas

Previo al desarrollo del software fue importante configurar las plataformas utilizadas. Esto es necesario porque para poder establecer la comunicación entre los servidores y el hardware se requiere de las credenciales proporcionadas directamente desde cada plataforma. Por lo tanto, a continuación, se presenta la configuración de ambas cuentas, ThingSpeak y Blynk.

Cuenta ThingSpeak

Primero que nada, se creó una cuenta de ThingSpeak y un canal. Estos canales son la forma en que la plataforma permite al usuario enviar y recibir datos. Cada canal se puede configurar según la variable medida y el tipo de datos, así como definir la ubicación del proyecto y su privacidad. Lo más importante a reconocer es que cada usuario, o cuenta existente, tiene su propia clave API, la cual es fundamental para la conexión, y su Channel ID para leer o escribir datos. Estas dos credenciales son únicas para cada proyecto por lo que sin ellas no es posible realizar el envío de información a ThingSpeak.

Cuenta Blynk

Se creó una cuenta de Blynk y desde el ordenador en el sitio oficial web se creó un “New Template” seleccionando como dispositivo el “ESP32”. Al igual que en ThingSpeak, para lograr la comunicación entre la nube de Blynk con el sistema, es necesario extraer dos credenciales llamadas Template ID y Device Name de la cuenta creada. Posteriormente, siguiendo la documentación del sitio oficial Blynk, se crearon los diferentes “Datastreams”, que se pueden definir como los canales para transferir datos entre el dispositivo y la nube de Blynk, así que, para procesarlo correctamente, la plataforma necesita saber qué tipo de datos se

están transfiriendo y configurar cada uno. A manera de ilustración, en la Figura 3-6 se muestra la creación del Pin Virtual para los datos de temperatura, así como en la Figura 3-7 la creación del Pin Virtual para el control del sistema de iluminación. Como se puede observar, el primero crea una variable de tipo “double” que permite almacenar un dato con valor decimal cuya unidad es grados Celsius y el segundo crea una variable de tipo “integer” cuyo valor es binario, es decir, encendido y apagado. Este proceso se realizó para cada una de las variables sensadas y los componentes controlados por el sistema dentro de la mini-PFAL.

Virtual Pin Datastream

NAME		ALIAS	
Temperature		Temperature	
PIN		DATA TYPE	
V11		Double	
UNITS			
Celsius			
MIN	MAX	DECIMALS	DEFAULT VALUE
0	50	###	0

Figura 3-6. Creación del Pin Virtual para datos de temperatura.

Virtual Pin Datastream

NAME		ALIAS	
Component 1		Light System Level 1 and 2	
PIN		DATA TYPE	
V1		Integer	
UNITS			
None			
MIN	MAX	DEFAULT VALUE	
0	1	Default Value	

Figura 3-7. Creación del Pin Virtual para el control del sistema de iluminación.

3.3.7 Configuración de la interfaz de usuario

Se descargó la aplicación oficial Blynk en el smartphone y se accedió con la cuenta creada. Para tener acceso a todas las funciones y crear y configurar la interfaz de usuario del tablero móvil se activó el modo desarrollador. Posteriormente se creó un nuevo proyecto seleccionando como dispositivo el ESP32.

Blynk provee una variedad amplia de visualizadores para desplegar los datos de los sensores, en este caso se optó por utilizar widgets y, para el nivel de agua de la S.N., un indicador de nivel vertical. En lo que respecta al control de los dispositivos de la mini-PFAL, se añadieron botones de tipo interruptor. En la Figura 3-8 se muestra la interfaz de usuario del panel de control móvil creada para recibir y mostrar los datos de los sensores de temperatura, humedad, CO₂ y PPFD, así como para controlar los componentes previamente mencionados en la mini-PFAL.



Figura 3-8. Interfaz de usuario del panel de control móvil para el monitoreo y control.

3.3.8 Conexión a internet del ESP32

La conexión a la red Wi-Fi del ESP32 se realizó directamente desde el smartphone. Para ello se instaló en el Arduino IDE la librería más reciente del software Blynk descargada del repositorio de GitHub en el sitio web <http://github.com/blynkkk/blynk-library>. Después se cargó al ESP32 el sketch de ejemplo “Blynk.Edgent”, cambiando las credenciales Template ID y Device Name. Posteriormente, en el smartphone, se configuró el acceso a internet acercando el ESP32 al punto de acceso y una vez identificada la red Wi-Fi de interés se añadió la contraseña para finalizar la conexión.

3.3.9 Desarrollo del software del sistema

El software fue programado en el Arduino IDE. Es importante mencionar que, en Arduino, y generalmente en muchos microcontroladores incluyendo el ESP32, no es posible ejecutar simultáneamente múltiples tareas. Sin embargo, el sistema propuesto utiliza una forma sencilla de lograr que el ESP32 realice multitareas mediante la división de todo el programa en pequeñas acciones y la realización una tras otra de la forma más rápida posible. Para esto, se hizo uso de la función `millis()`, que al ser llamada regresa el número actual de milisegundos desde que la tarjeta fue encendida. Adicionalmente, es fundamental evitar el uso de la función `delay()` pues al ser llamada bloquea temporalmente la ejecución de otras partes del código. En este caso, como se cuenta con cuatro microcontroladores, se desarrolló y cargó un código para cada uno. En los Anexos 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se describe cada uno de los códigos desarrollados y los diagramas de flujo correspondientes.

3.3.10 Automatizaciones del sistema

Con el propósito de que el usuario no tenga la necesidad de controlar de manera manual el encendido y apagado de ciertos componentes dentro de la mini-PFAL, se crearon dos automatizaciones directamente en la interfaz de usuario de la plataforma Blynk que facilitan el manejo durante el ciclo del cultivo.

Para cumplir los requerimientos de luz de la planta es necesario que el sistema de iluminación esté encendido como mínimo 14 horas al día. Para lograr esto sin la necesidad de controlar de manera manual el horario de encendido y apagado, se creó una automatización directamente en la aplicación de Blynk. Como se muestra en la Figura 3-9, esta automatización enciende el sistema de iluminación a las 05:00 am y lo apaga a las 09:00 pm, proporcionando 16 horas de fotoperiodo.

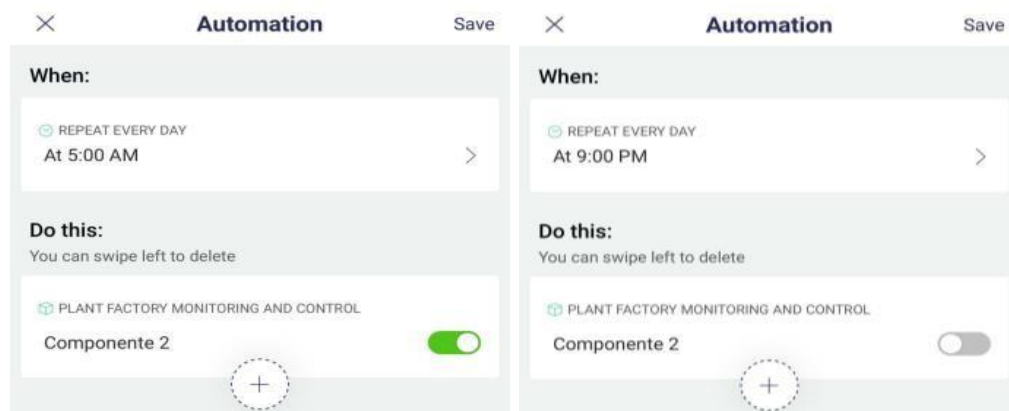


Figura 3-9. Automatización del sistema de iluminación.

De manera similar al sistema de iluminación, se creó una automatización para controlar el encendido y apagado de la bomba de riego de manera cíclica por periodos cortos permitiendo el ahorro de energía eléctrica sin que la planta presente estrés hídrico.

3.3.11 Implementación en la mini-PFAL y fase de prueba del sistema

Una vez armado el sistema e incorporado a una carcasa de protección, se instaló en la mini-PFAL, colocando cada sensor en los lugares requeridos (Figura 3-2). En el caso del sensor de distancia HC-SR04, para poder colocarlo en el tanque de almacenamiento de la S.N. se diseñó una pieza haciendo uso del software SolidWorks y se imprimió en una impresora 3D con el objetivo de que quedara fijo y las mediciones fueran precisas. La Figura 3-10 muestra el sistema funcionando y colocado justo al lado del cuarto de cultivo.

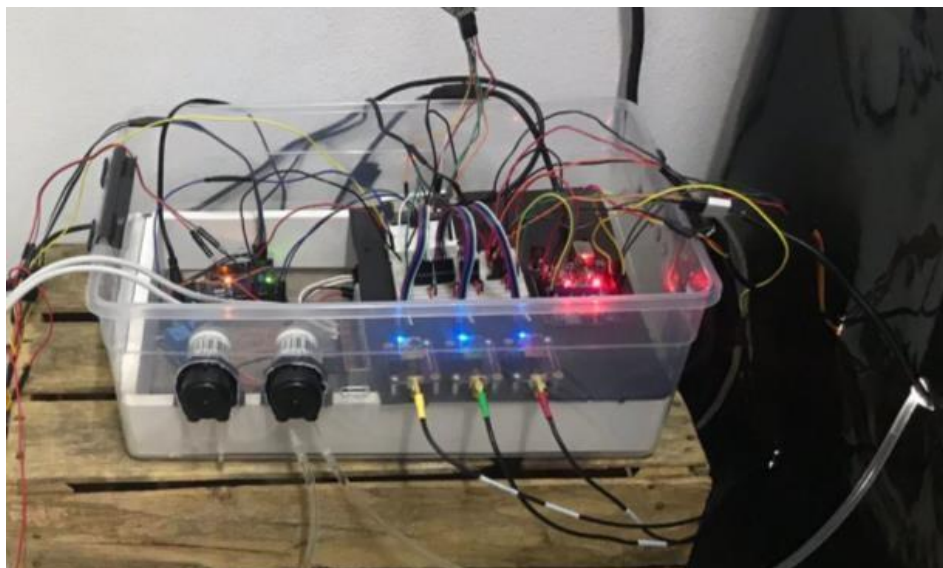


Figura 3-10. Instalación del sistema desarrollado en la mini-PFAL.

Una vez implementado en la mini PFAL, el sistema desarrollado fue evaluado en total durante tres experimentos o ciclos de cultivo de *Lactuca sativa* L. var. Capitata. A lo largo del ciclo de cultivo se verificó el correcto funcionamiento del sistema en lo que respecta a estabilidad de comunicación, visualización de datos en tiempo real, y el correcto accionamiento de los componentes. Las variables evaluadas del cultivo fueron el peso fresco de la parte aérea, el peso seco total y el rendimiento estimado. Adicionalmente, se evaluó el consumo eléctrico, el consumo de agua y la eficiencia de uso de luz (LUE).

3.4 Resultados y discusión

En esta sección se presenta el funcionamiento del sistema mediante la visualización de datos desde la interfaz de usuario en la aplicación Blynk, así como el almacenamiento de información en la nube de ThingSpeak. Adicionalmente se presenta el análisis de las variables ambientales, el crecimiento de las plantas, los valores de consumo de energía y de agua, y la eficiencia de uso de la luz (LUE).

En el Cuadro 3-2 se presentan las características principales del manejo de cada uno de los ciclos.

Cuadro 3-2. Rango de operación de variables ambientales y de la S.N. en los ciclos de cultivo de evaluación de la mini-PFAL.

Característica	Unidades	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
Duración	d	26	21	20
PPFD	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	215 ± 30.26	215 ± 30.26	215 ± 30.26
Fotoperiodo	h d^{-1}	14	16	16
DLI	$\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$	10.8	12.4	12.4
Rango de C.E.	dS/m	1.5 — 2.3	1.5 — 2.2	1.5 — 2.4
Rango de pH	—	5.5 — 7.3	5.5 — 7.0	5.5 — 7.0

3.4.1 Interfaz de usuario y almacenamiento en la nube

El sistema propuesto utiliza el microcontrolador ESP32 como cerebro que recopila los datos de los sensores de acuerdo con los tiempos previamente descritos y los envía a las plataformas del IoT. La interfaz de usuario generada en la aplicación Blynk se puede visualizar en cualquier momento desde un teléfono inteligente con acceso a internet.

En la Figura 3-11 se muestra la visualización de los diferentes valores de los sensores. Estos datos se actualizan cada 10 segundos permitiendo conocer en tiempo real las condiciones tanto ambientales como de la solución nutritiva para una mejor toma de decisiones.

El ESP-01 envía los valores promedio por minuto de cada variable a la nube de ThingSpeak. Esta plataforma es capaz de almacenar, procesar y brindar una vista previa de los datos en el sitio web. En el Anexo 4.5 se presentan capturas de pantalla del día 01/junio/2022 de algunos de los canales creados para el almacenamiento y visualización de los datos en el sitio web ThingSpeak.



Figura 3-11. Visualización de datos en la interfaz de usuario desde el smartphone.

3.4.2 Comportamiento de las variables sensadas

A continuación, se presenta el comportamiento de las diferentes variables sensadas por el sistema propuesto dentro de la mini-PFAL para el día 28/05/2022.

Variables ambientales

La Figura 3-12 es un gráfico de los datos de PPFD. El horario de encendido y apagado de las luces LED fue a las 5:00 y 21:00 h, respectivamente. Es por esta razón que la gráfica presenta un comportamiento de señal escalón, es decir, al estar apagado el sistema de iluminación registra un valor de 0 PPFD y durante todo el tiempo de encendido registra un valor constante.

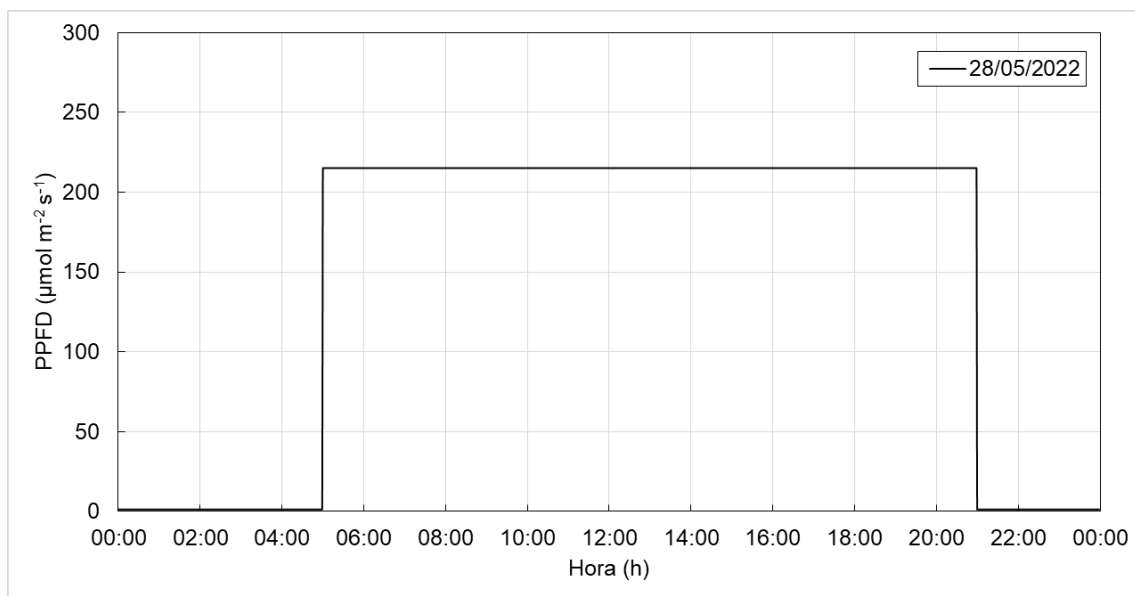


Figura 3-12. Valores de PPFD registrados dentro de la mini-PFAL el día 28/05/2022.

En la Figura 3-13 se presenta un gráfico de los datos obtenidos por el sensor DTH22 del comportamiento de la temperatura dentro de la mini-PFAL. Como se puede observar, la temperatura dentro de la mini-PFAL tiene un comportamiento similar en los diferentes días del ciclo de cultivo. Antes de las 5:00 h presenta las temperaturas mínimas y justo después incrementan rápidamente los valores. Posteriormente a las 21:00 h la temperatura disminuye rápidamente debido al apagado de las luces LED. Este efecto se debe a la radiación emitida por las lámparas durante los periodos de luz (Hicklenton y Heins, 1997). Como se puede apreciar, las temperaturas durante el día estuvieron en el rango recomendado para el cultivo de lechuga.

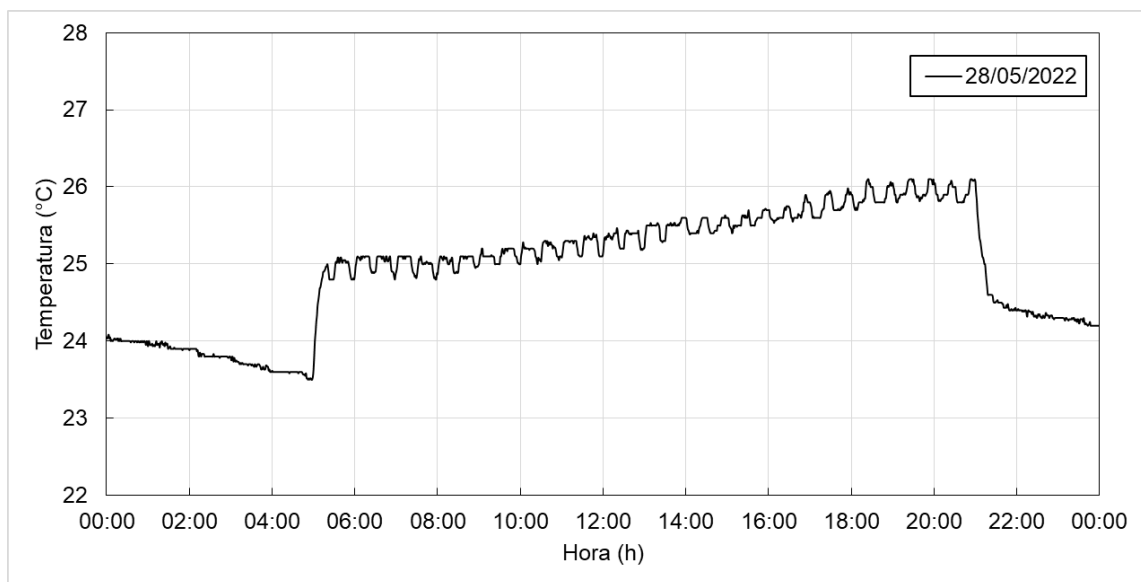


Figura 3-13. Valores de la temperatura del aire dentro de la mini-PFAL del día 28/05/2022.

En lo que respecta a la humedad relativa, en la Figura 3-14 se presenta un gráfico de los datos obtenidos por el sensor DTH22. Las fluctuaciones de la humedad dentro de la mini-PFAL fueron generadas tanto por la transpiración del cultivo, como por las renovaciones de aire por los extractores (Niu et al., 2020).

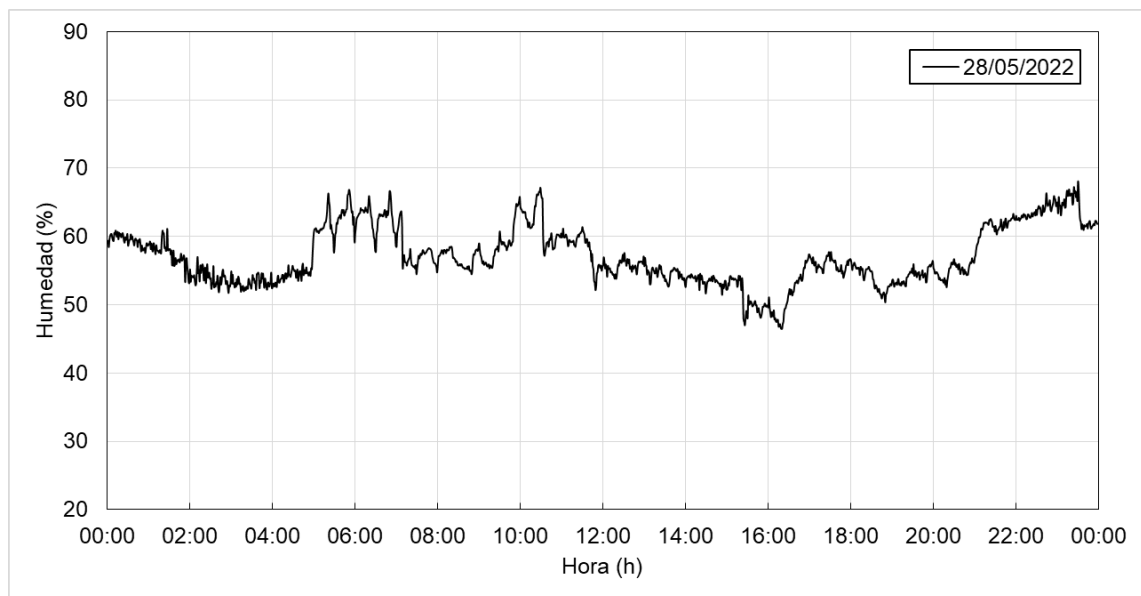


Figura 3-14. Valores de humedad relativa del aire dentro de la mini-PFAL del día 28/05/2022.

En cuanto a los niveles de CO₂ dentro de la mini-PFAL, en la Figura 3-15 se muestran los datos registrados por el sensor EZO-CO₂. Debido que no se contó con un suministro de CO₂, y solamente se utilizó la ventilación mecánica conectada al exterior, los valores registrados se encuentran de igual forma en el orden de las concentraciones naturales (Ahmed et al., 2020). Como indica Niu et al. (2020), en un PFAL semicerrada, la concentración de CO₂ varía no solo con la actividad de la planta (fotosíntesis y respiración), sino también con las actividades humanas. Esto puede explicar la existencia de las variaciones a lo largo del día, ya que el aire exhalado por las personas puede elevar los niveles de CO₂ bruscamente.

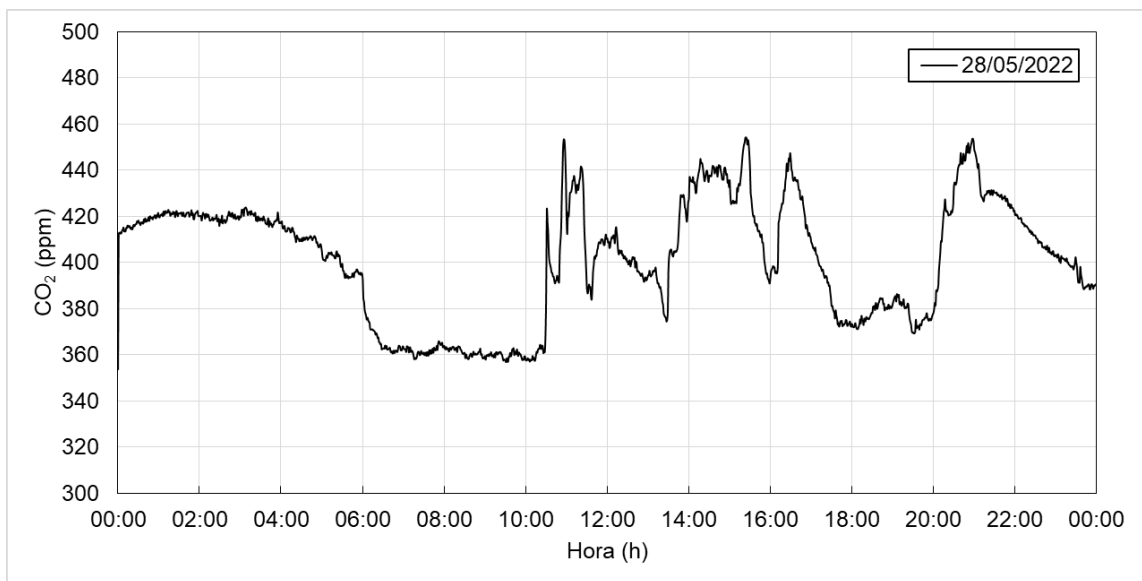


Figura 3-15. Concentración de CO₂ dentro de la mini-PFAL del día 28/05/2022.

Variables de la solución nutritiva

Para satisfacer las necesidades nutrimentales de las plantas y a la vez reducir el consumo eléctrico asociado al sistema de irrigación, se automatizó el encendido y apagado de la bomba periodos de 20 y 10 min, respectivamente.

En la Figura 3-16 se muestra el gráfico de los datos de volumen registrados. Como se puede observar, las variaciones de volumen son generadas por los ciclos de encendido y apagado de la bomba, sin embargo, es claro que hay una

disminución del volumen total conforme transcurre el tiempo. A lo largo del día se registró un consumo por las plantas de 12 L, aproximadamente.

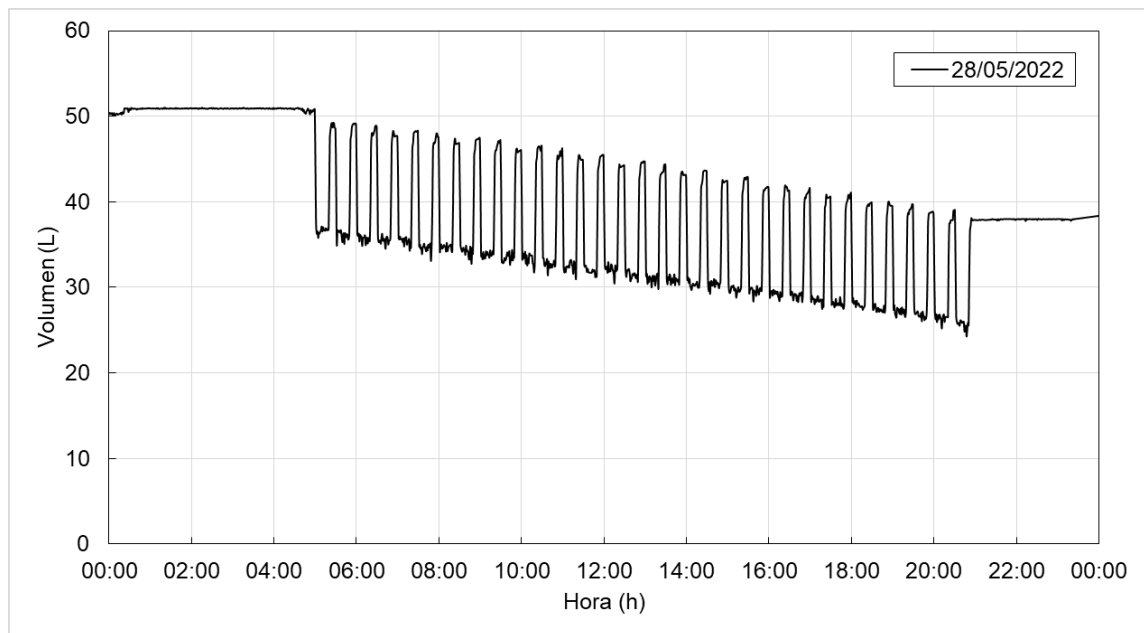


Figura 3-16. Volumen del tanque de almacenamiento del día 28/05/2022.

De manera similar, los niveles de oxígeno disuelto se ven afectados por el encendido y apagado de la bomba, ya que al regar se oxigena la S.N. debido a la agitación del agua durante su recorrido de regreso al tanque de almacenamiento. Como se muestra en la Figura 3-17, entre las 05:00 y 21:00 horas los valores fluctúan entre 6.0 y 8.0 mg L⁻¹. De acuerdo con Brechner et al. (1996), este sería un rango óptimo para el crecimiento adecuado del cultivo.

Como menciona Kubota (2020), un buen diseño del sistema hidropónico garantiza una correcta oxigenación de la solución. Por lo anterior, podemos decir que para este sistema mini-PFAL, una pendiente del 3% fue suficiente para que los niveles de oxígeno disuelto se encuentren en el rango óptimo.

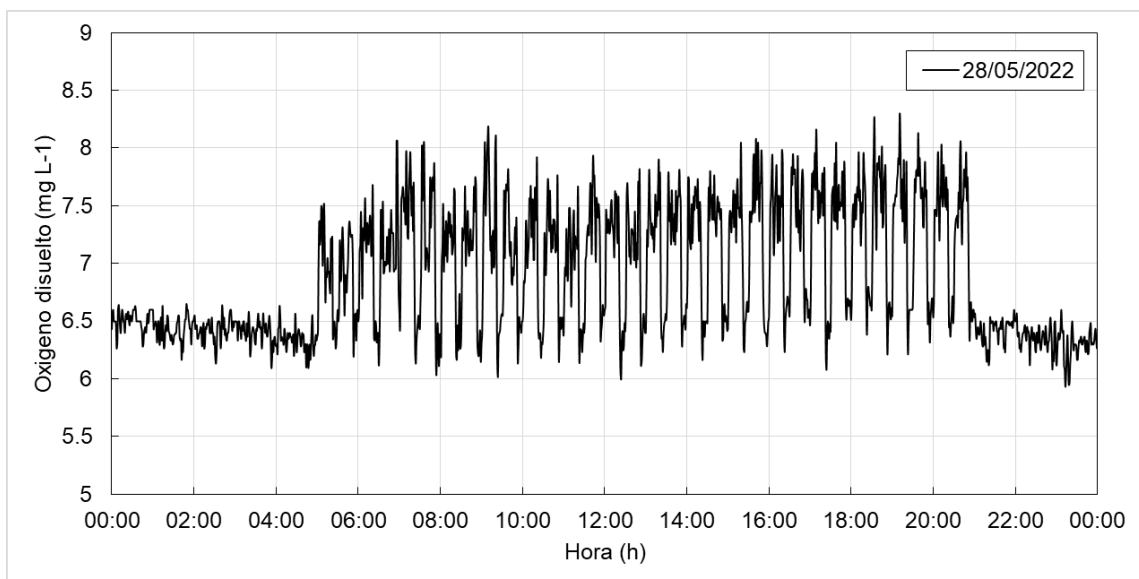


Figura 3-17. Niveles de oxígeno disuelto en la S.N. nutritiva el día 28/05/2022.

En la Figura 3-18 se presenta un gráfico de los datos de pH. Como se puede observar en (a), al encender el sistema de riego los valores de pH incrementan en aproximadamente 0.4 unidades, a partir de ahí, continúan aumentando de manera gradual a lo largo del periodo de luz. Esto se debe a la toma de nutrientes por parte de la planta. Como mencionan Lea et al. (1999), cuando el nitrógeno (N) se suministra en mayor proporción como nitrato (NO_3^-), la absorción de aniones de la planta generalmente excede la absorción de cationes, y, para mantener la solución eléctricamente neutra, las plantas liberan aniones de hidróxido (OH^-) a la solución aumentando el pH.

El pH incrementó hasta alcanzar un valor de 7.0 en (b). En este punto el sistema detectó que el valor fue mayor o igual que el límite superior permitido, por lo tanto, se activó la corrección automática de pH y se accionó la bomba peristáltica conectada al ácido. Finalmente, cuando el sistema leyó un valor de $\text{pH} \leq 5.5$ en el punto (c), se detuvo la corrección.

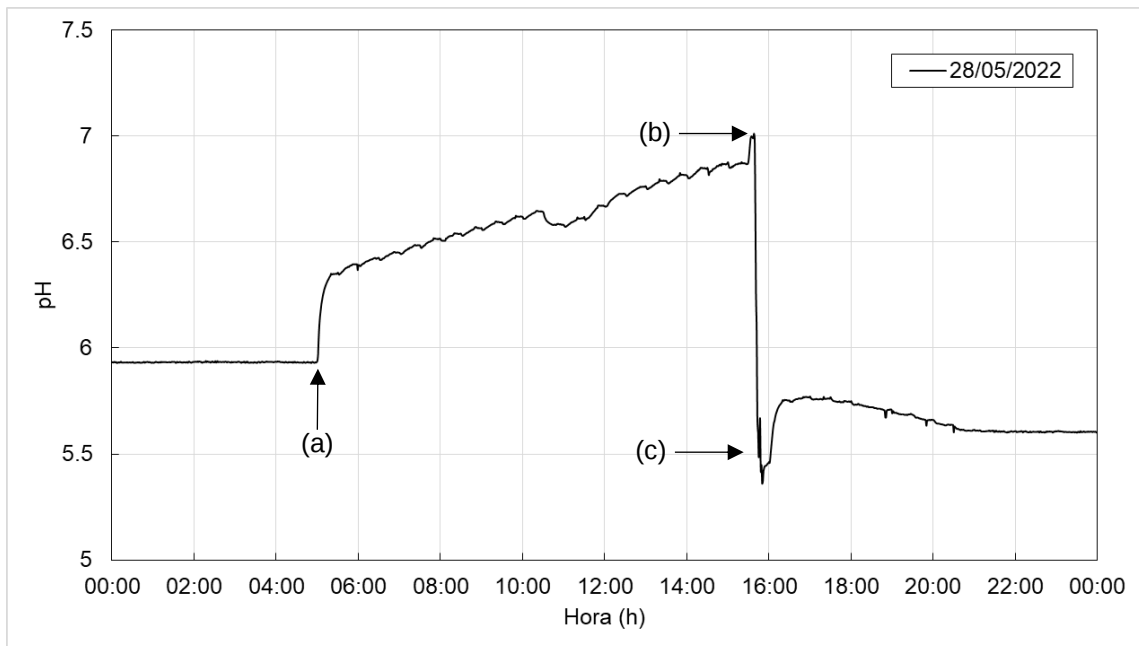


Figura 3-18. Comportamiento del pH en el sistema el día 28/05/2022. a) Inicio de absorción de nutrientes por parte de la planta, b) inicio de corrección de pH y c) fin de corrección de pH.

Asimismo, los valores de conductividad eléctrica presentaron cambios originados tanto por el consumo de nutrientes por parte de las plantas, como por la corrección de pH. En la Figura 3-19 se presenta la gráfica del comportamiento de la CE. Como se puede notar, en el punto (a) comenzó a disminuir la CE debido a que la planta comenzó a absorber nutrientes. A lo largo del fotoperiodo continuó reduciendo hasta llegar al punto (b). El incremento de CE en el intervalo entre (b) y (c) se debió a la incorporación del ácido para la corrección de pH.

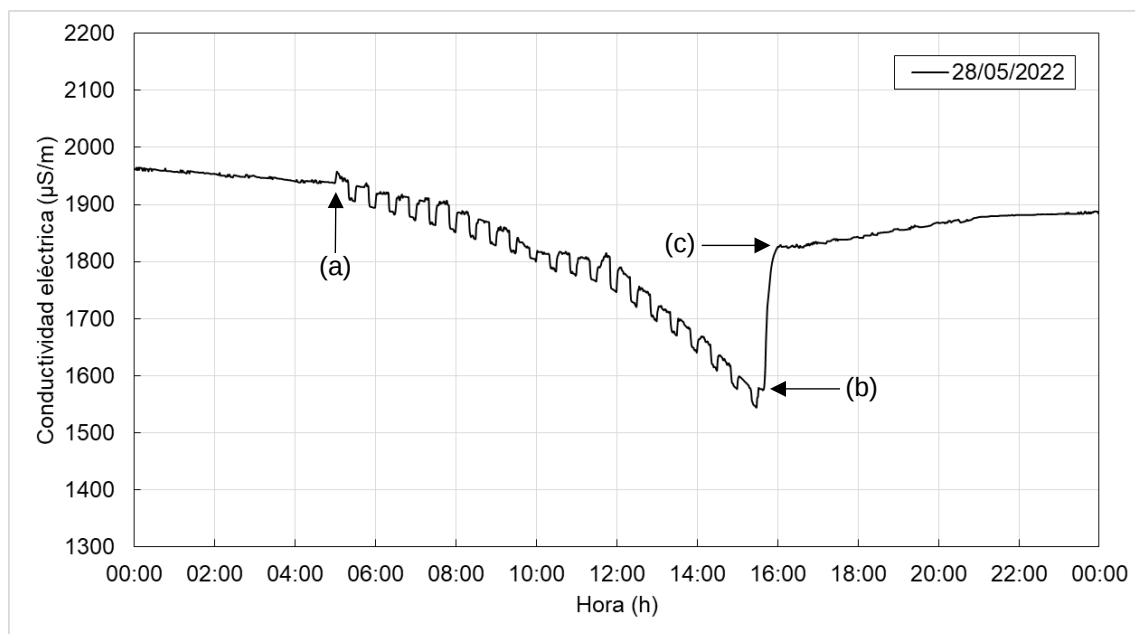


Figura 3-19. Comportamiento de la conductividad eléctrica en el sistema. a) Inicio de absorción de nutrientes por parte de la planta, b) inicio de corrección de pH y c) fin de corrección de pH.

3.4.3 Análisis de crecimiento del cultivo

En lo que respecta al crecimiento de las plantas durante los diferentes ciclos de cultivo, en el Cuadro 3-3 se presentan los parámetros de peso fresco de la parte aérea, biomasa seca total y el rendimiento medido por nivel dentro de la mini-PFAL al momento de cosechar.

Cuadro 3-3. Parámetros de crecimiento obtenidos en los diferentes ciclos de cultivo. Los valores son los promedios $\pm$ la desviación estándar.

Parámetro	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
Peso fresco de la parte aérea (g)	120.27 $\pm$ 17.97	153.91 $\pm$ 19.64	114.78 $\pm$ 16.90
Biomasa seca total (g)	6.88 $\pm$ 1.07	7.55 $\pm$ 1.15	6.14 $\pm$ 0.46
Rendimiento estimado (kg m ⁻²)	2.14	2.73	2.04

La Figura 3-20 presenta dos imágenes de la vista interior de la mini-PFAL en diferentes etapas de crecimiento durante el primer ciclo de cultivo. La evolución en el crecimiento de las plantas durante el tercer ciclo se presenta en el Anexo 4.6.



Figura 3-20. Vista interior de la mini-PFAL en diferentes etapas de crecimiento durante el primer ciclo de cultivo.

Las Figura 3-21 y Figura 3-22 muestran las gráficas de la evolución de los valores de peso fresco de la parte aérea y la biomasa seca total acumulada. Las mediciones para el segundo ciclo se hicieron los días 0, 4, 9, 14 y 21 ddt, mientras que, para el tercer ciclo, las mediciones se realizaron los días 0, 6, 11, 15 y 20 ddt.

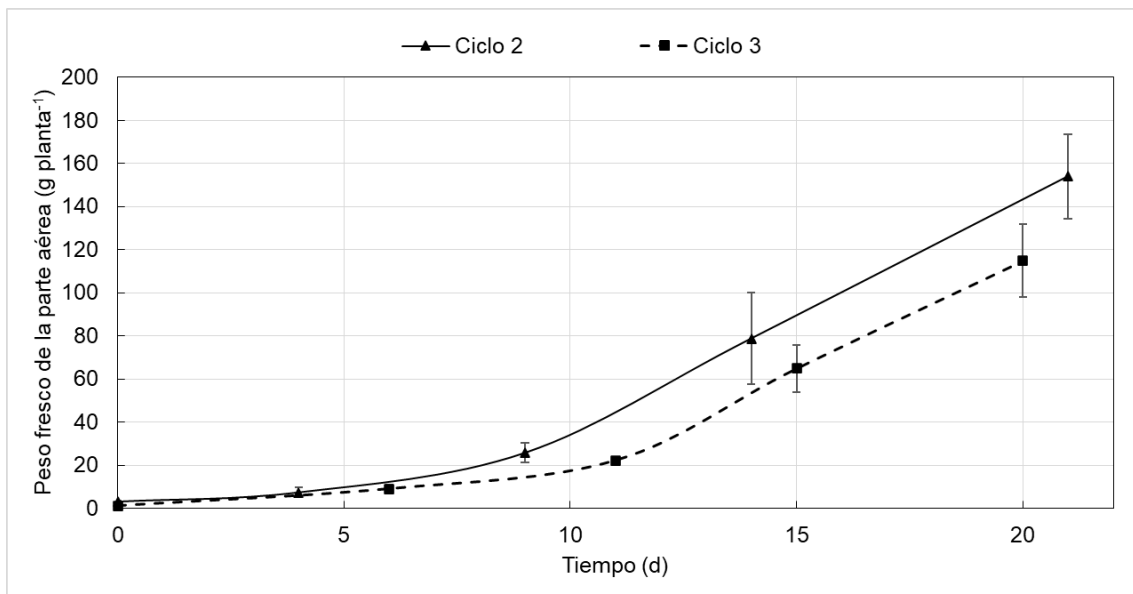


Figura 3-21. Peso fresco de la parte aérea en el segundo y tercer ciclo de cultivo. Las barras verticales indican una desviación estándar.

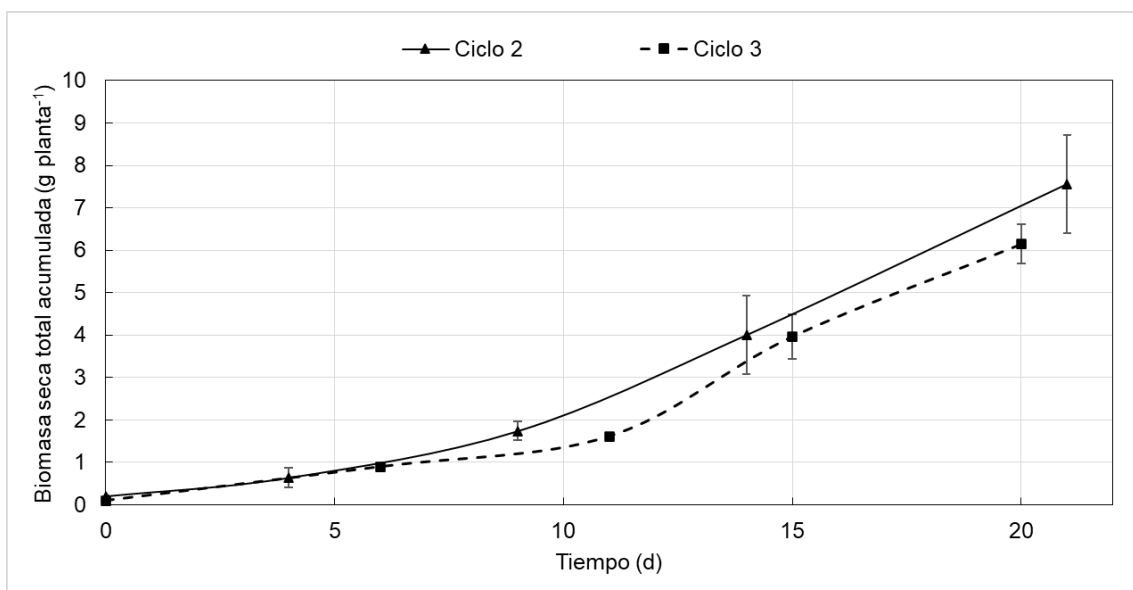


Figura 3-22. Biomasa seca total acumulada en el segundo y tercer ciclo de cultivo. Las barras verticales indican una desviación estándar.

En en Cuadro 3-4 se presenta el consumo de agua por kg de producto ($L\ kg^{-1}$), el consumo eléctrico durante cada ciclo (kWh), el consumo eléctrico por kg de producto y la eficiencia en el uso de la luz (LUE) para cada ciclo de cultivo.

Cuadro 3-4. Valores de consumo de agua, consumo eléctrico y eficiencia de uso de la luz en los diferentes ciclos de cultivo.

Parámetro	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
Consumo de agua (L kg ⁻¹)	14.02	12.07	19.10
Consumo eléctrico total (kWh)	219.85	210.07	200.07
Consumo eléctrico (kWh kg ⁻¹)	19.04	14.22	18.15
LUE (g mol ⁻¹)	0.37	0.48	0.38

Barbosa et al. (2015) estimaron que el uso promedio de agua para la producción de lechuga en campo abierto es de 250 L kg⁻¹. Usando el valor del consumo promedio de agua en la mini-PFAL (15.06 ± 3.62 L kg⁻¹) y comparándolo con lo reportado para campo abierto de acuerdo con Barbosa et al. (2015), hay un ahorro de casi 94% al producir dentro de la mini-PFAL, por lo que se confirma que la producción en este tipo de sistemas permite el ahorro de más del 90% comparado con la agricultura tradicional.

De acuerdo con los informes del Global CEA Census Report (2021), la cantidad de energía promedio usada en las PFALs es de 38.8 kWh por kg de producto. A lo largo de los tres ciclos de cultivo se obtuvieron valores de 19.04, 14.22 y 18.15 kWh kg⁻¹, dando un promedio de 17.14 ± 2.56 kWh kg⁻¹. Este valor promedio se encuentra un 56% debajo de lo reportado. Esto puede deberse principalmente al nivel de tecnificación de la mini-PFAL, ya que no cuenta con sistemas de aire acondicionado u otros elementos que pueden generar un consumo eléctrico mayor.

En la Figura 3-23 se presenta la variación de LUE como función de la edad de la planta. Como se puede observar, cuanto más vieja o más grande sea la planta en el momento de la cosecha, mayor será la LUE (Jin et al., 2022).

De acuerdo con los datos estimados por Jin et al. (2022), en el cultivo de lechuga var. Expertise RZ cultivado dentro de una PFAL a $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (rojo/azul) con $45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (rojo lejano) y una densidad de $51 \text{ plantas m}^{-2}$, para el día 21 se estimó una LUE de aproximadamente 0.37 g mol^{-1} . Este valor está por debajo del obtenido en el segundo ciclo de cultivo a los mismos 21 días (0.48 g mol^{-1}) y muy similar al alcanzado a los 20 días para el tercer ciclo (0.38 g mol^{-1}).

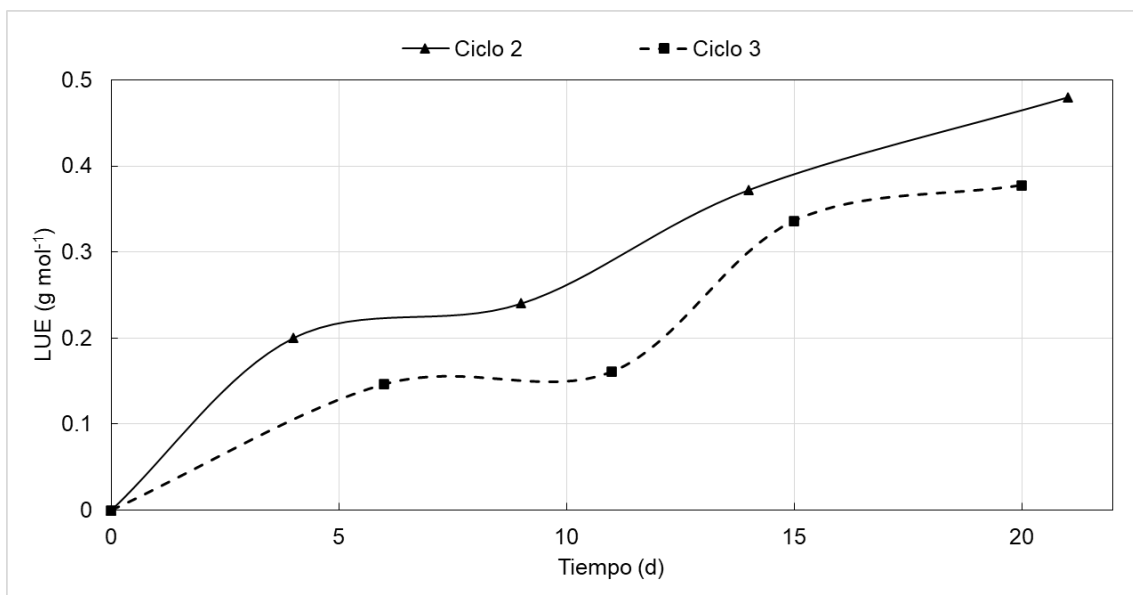


Figura 3-23. Eficiencia de uso de la luz (LUE) en diferentes etapas del crecimiento.

Conforme indican Jin et al. (2022), los valores promedio de LUE reportados en la literatura al tiempo de cosecha para lechuga producida en una PFAL, en invernadero y en campo abierto son 0.55 , 0.39 y 0.23 g mol^{-1} , respectivamente. El valor obtenido de LUE en el ciclo 2 (0.48 g mol^{-1}) es un 13% menor que el promedio en una PFAL, y es mayor a los reportados en invernadero y campo abierto.

El valor teórico máximo de LUE varía de 1.26 a 1.81 g mol^{-1} (Jin et al., 2022). Es evidente que el sistema mini-PFAL propuesto está alejado de estos valores, por lo tanto, para incrementar la LUE en la mini-PFAL se debe aumentar la interceptación de la luz por parte del cultivo. Para ello, una forma es incrementar la densidad de plantas m^{-2} . O bien, se puede comenzar con una densidad muy alta

cuando las plantas son pequeñas y disminuir gradualmente durante el cultivo a medida que las plantas crecen (Jin et al., 2022).

3.5 Conclusiones

Se desarrolló e implementó un sistema de monitoreo y almacenamiento de datos usando dispositivos del IoT, de las variables ambientales y fisicoquímicas de la solución nutritiva involucradas en el crecimiento de cultivos en una mini-PFAL. Asimismo, se automatizaron algunos componentes para asegurar el desarrollo adecuado del cultivo de lechuga facilitando el manejo al usuario.

En los tres ciclos de cultivos de la evaluación el sistema funcionó de forma adecuada permitiendo el monitoreo, almacenamiento y visualización en tiempo real de las variables sensadas. El uso de dispositivos IoT permite al usuario conocer la situación real de los parámetros de la mini-PFAL de forma remota.

La mini-PFAL desarrollada en esta investigación permite la producción lechugas con un peso promedio de aproximado de 153.91 ± 19.64 g a los 21 días ddt. Con un consumo promedio de agua de 15.06 ± 3.62 L kg⁻¹, un consumo eléctrico de 17.14 ± 2.56 kWh kg⁻¹ y un LUE entre 0.38 y 0.48 g mol⁻¹.

3.6 Literatura citada

Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2020). Lettuce plant growth and tipburn occurrence as affected by airflow using a multi-fan system in a plant factory with artificial light. *Journal of thermal biology*, 88, 102496.

Agritecture & WayBeyond. (2021). Global CEA Census Report. <https://www.agritecture.com/census>.

Al-Kodmany, K. (2018). The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. *Buildings*, 8(2), 24. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>

Aosong Electronics. (2017). DHT22 Datasheet. 1st ed. [ebook]. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>.

Apogee Instruments. (2022). Quantum sensor SQ-515 Datasheet. <https://www.apogeeinstruments.com/content/SQ-512-515-manual.pdf>

Arduino. (2018). What is Arduino?. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.

- AtlasScientific. (s.f., a) EZO- CO₂ Datasheet. <https://atlas-scientific.com/co2/> [Acceso: 12 Marzo 2022]
- AtlasScientific. (s.f., b) EZO- pH Datasheet. <https://atlas-scientific.com/ph> [Acceso: 12 Marzo 2022]
- AtlasScientific. (s.f., c) EZO-Conductivity Datasheet. <https://atlas-scientific.com/kits/mini-conductivity-k-1-0-kit/> [Acceso: 12 Marzo 2022]
- AtlasScientific. (s.f., d) EZO-Dissolved Oxygen Datasheet. <https://atlas-scientific.com/kits/dissolved-oxygen-kit/> [Acceso: 12 Marzo 2022]
- Barbosa, G., Gadelha, F., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G., & Halden, R. (2015). Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879–6891. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
- Brechner, M., Both, A. J., & Staff, C. E. A. (1996). Hydroponic lettuce handbook. *Cornell Controlled Environment Agriculture*, 834, 504-509.
- ElecFreaks. (s.f.). HC-SR04 Datasheet. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>
- Elijah, O., Rahman, T., Orikumhi, I., Leow, C. e Hindia, N. (2018). An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics. *Agriculture: Benefits and Challenges*. *Internet of Things Journal IEEE*, vol. 5, no. 5, pp. 3758- 3773
- Espressif Systems. (2022). ESP32 Technical Reference Manual. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
- Hicklenton, P., & Heins, D. (1997). Temperature. In R. W. Langhans & T. W. Tibbitts (Eds.), *Plant Growth Chamber Handbook*. (pp. 31-42). Ames, IA, NCR-101 Regional Committee on Controlled Environment Technology and Use.
- Jabbar, W., Kian, T., Ramli, R., Zubir, S., Zamrizaman, N., Balfaqih, M., Shepelev, V. & Alharbi, S. (2019). Design and Fabrication of Smart Home With Internet of Things Enabled Automation System. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2942846.
- Jeaunita, T., Sarasvathi, V., Harsha, M., Bhavani, B. and Kavyashree, T. (2018). An automated greenhouse system using agricultural Internet of Things for better crop yield. *Proc. Smart Cities Symp.*, 2018, pp. 129–134.
- Jin, W., Urbina, J. L., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2021). Adding far-red to red-blue light-emitting diode light promotes yield of lettuce at different planting densities. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609977>.
- Jin, W., Formiga Lopez, D., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. (2022). Light use efficiency of lettuce cultivation in vertical farms compared with greenhouse and field. *Food and Energy Security*, e391.

- Kassim, M. (2020). IoT Applications in Smart Agriculture: Issues and Challenges. IEEE Conference on Open Systems (ICOS), 2020, pp. 19-24, doi: 10.1109/ICOS50156.2020.9293672
- Kozai, T. and Niu, G. (2020a) Chapter 1 – Introduction. *Plant Factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Second edition. Academic Press. Pp 3-6.
- Kozai, T. and Niu, G. (2020b) Chapter 2 – Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. Second edition. Academic Press. Pp 7-34.
- Kubota, C. (2020). Growth, development, transpiration, and translocation as affected by abiotic environmental factors. In *Plant Factory* (pp. 207-220). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00013-3>.
- Lea, J. D., Stutte, G. W., Berry, W. L., & Wheeler, R. M. (1999). nutrient dynamics and pH / charge-balance relationships in hydroponic solutions. *Acta Horticulturae*, (481), 241–250. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1999.481.25>
- Madakam, S., Ramaswamy, R. and Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*, 3, 164-173. doi: 10.4236/jcc.2015.35021.
- Maxim Integrated Products. (2019). DS18B20 Datasheet. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- Niu, G., Kozai, T., & Sabeh, N. (2020). Physical environmental factors and their properties. In *Plant factory* (pp. 185-195). Academic Press.
- Saad, M., Hamdan, N. & Sarker, M. (2021). State of the Art of Urban Smart Vertical Farming Automation System: Advanced Topologies, Issues and Recommendations. *Electronics*. 10, 1422. <https://doi.org/10.3390/electronics10121422>
- Shomefun, T, Awosope, C. & Ebenezer, O. (2018). Microcontroller-based Vertical Farming Automation System. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 8, No. 4, August 2018, pp. 2046 – 2053.
- Van Delden, S. H., SharathKumar, M., Butturini, M., Graamans, L. J. A., Heuvelink, E., Kacira, M., Kaiser, E., Klamer, R., Klerkx, L., Kootstra, G., Loeber, A., Schouten, R., Stanghellini, C., van Ieperen, W., Verdonk, J., Violet-Chabrand, S., Woltering, E., van de Zedde, R., Zhang, Y. & Marcelis, L. F. M. (2021). Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. *Nature Food*, 2(12), 944-956.
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. y Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22-32, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.

4. ANEXOS

4.1 Código del Maestro (ESP32)

El ESP32 es el corazón del sistema. Se encarga de definir el orden en que se ejecuta cada una de las tareas, así como solicitar datos o enviar órdenes a los diferentes esclavos. El diagrama de flujo del código desarrollado para el ESP32 se muestra en la Figura 4-1. El código se basa principalmente en comparar el tiempo transcurrido desde que la tarjeta ESP32 fue encendida, con intervalos de tiempo definidos.

Primero establece la configuración, incluyendo la definición de las variables utilizadas, el intervalo de muestreo, que en este caso fue de 10000 milisegundos, los contadores necesarios y se conecta a la red Wi-Fi. Posteriormente se ejecuta la función `loop()`. Durante los primeros 20 segundos no se realiza ninguna tarea, a no ser que algún botón de la interfaz de usuario haya sido presionado, en este caso envía el comando apropiado al Esclavo 2 para encender o apagar el dispositivo correspondiente. Conforme el tiempo avanza y el reloj llega a los 21 segundos, la primera condición se cumple, es entonces que el ESP32 solicita los datos al Esclavo 1 y el contador correspondiente incrementa en una unidad. Al hacer esto, no será hasta que el contador haya incrementado el valor del intervalo de muestreo (10 segundos), que volverá a solicitar los datos nuevamente.

Mientras que se vuelve a cumplir la condición, el ESP32 continúa ejecutando el código en espera de que la siguiente condición se cumpla, por lo que cuando el reloj llega a los 22 segundos, lee el sensor de CO₂ y nuevamente el contador correspondiente incrementa una unidad.

Este proceso lo repite para cada una de las condiciones, ejecutando una por una todas las tareas y leyendo cada sensor. Al adquirir todos los valores de los sensores de la mini-PFAL, en el segundo 29 envía los datos a la nube de Blynk. Es en este momento cuando en la interfaz móvil se actualizan los valores y el usuario puede conocer en tiempo real los datos.

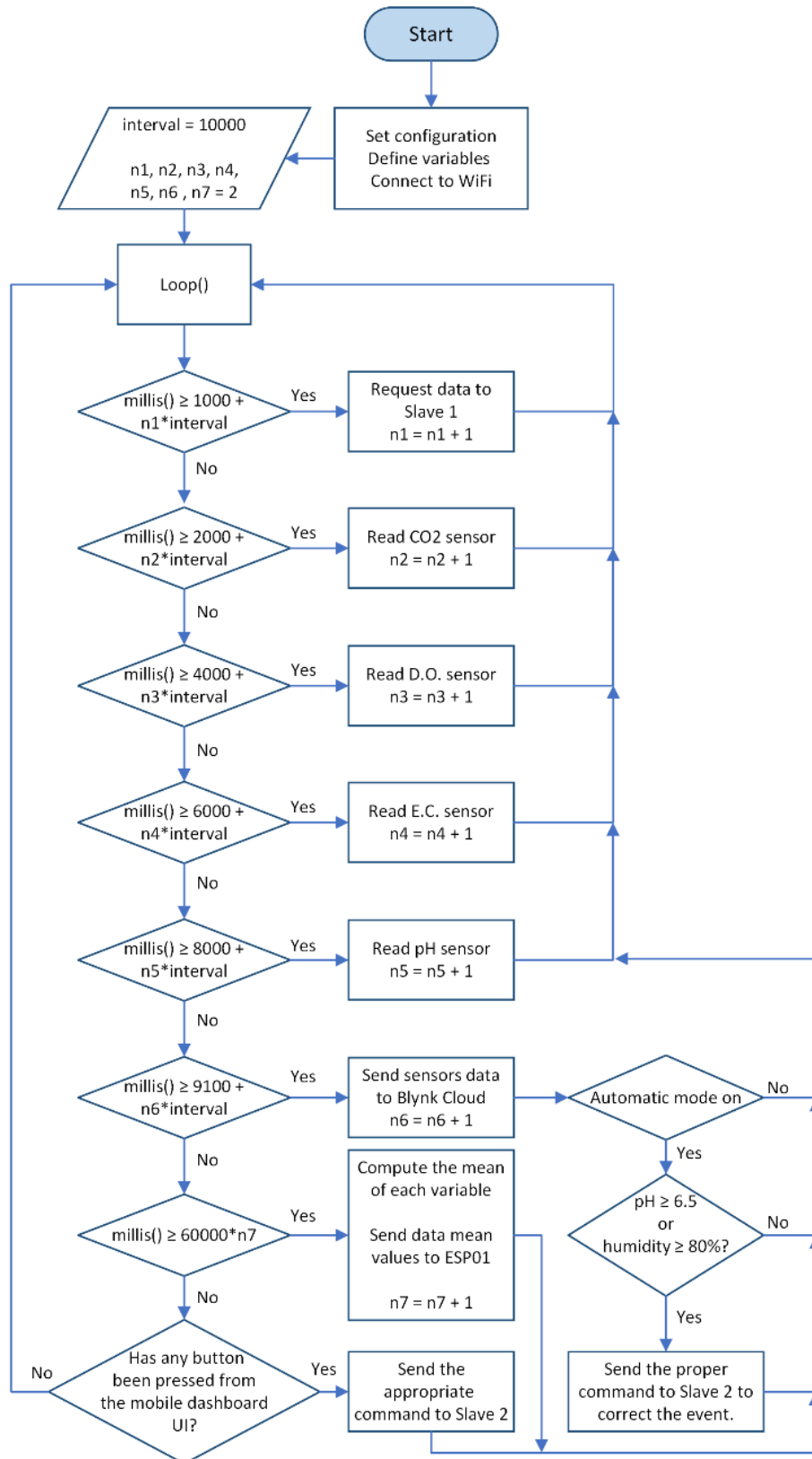


Figura 4-1. Diagrama de flujo del código del ESP32.

Si el modo automático está activado, el ESP32 compara los valores de pH y humedad relativa con los valores umbrales y de cumplirse alguna de las condiciones, envía el comando adecuado al Esclavo 2 para realizar la corrección.

Por último, cada minuto es calculada la media de los datos de cada una de las variables y los valores promedio son enviados al ESP-01.

4.2 Código del Esclavo 1

El diagrama de flujo del código del Esclavo 1 se muestra en la Figura 4-2. Después de encender el ArduinoUNO, se establece la configuración, definiendo las variables necesarias, el intervalo de muestreo y un contador. Posteriormente se ejecuta la función loop(), la cual compara dos condiciones, la primera es una condición temporal y la segunda se cumple cuando el Maestro solicita los datos. Como se puede observar, haciendo uso de la función millis() previamente descrita, cuando el reloj de la tarjeta ArduinoUNO llega a los seis segundos se cumple la primer condición, por lo tanto comienza la lectura de los sensores uno a uno. En lo que respecta al volumen de la solución nutritiva, el sensor mide la distancia al espejo de agua y calcula el volumen usando una curva de calibración previamente obtenida. Al finalizar la lectura de datos incrementa el contador en una unidad, de esta forma no vuelve a leer los valores hasta que el reloj incrementa 10 segundos. La segunda condición se cumple en el momento que el maestro solicita los datos, por lo que el Esclavo 1 envía los datos de los sensores.

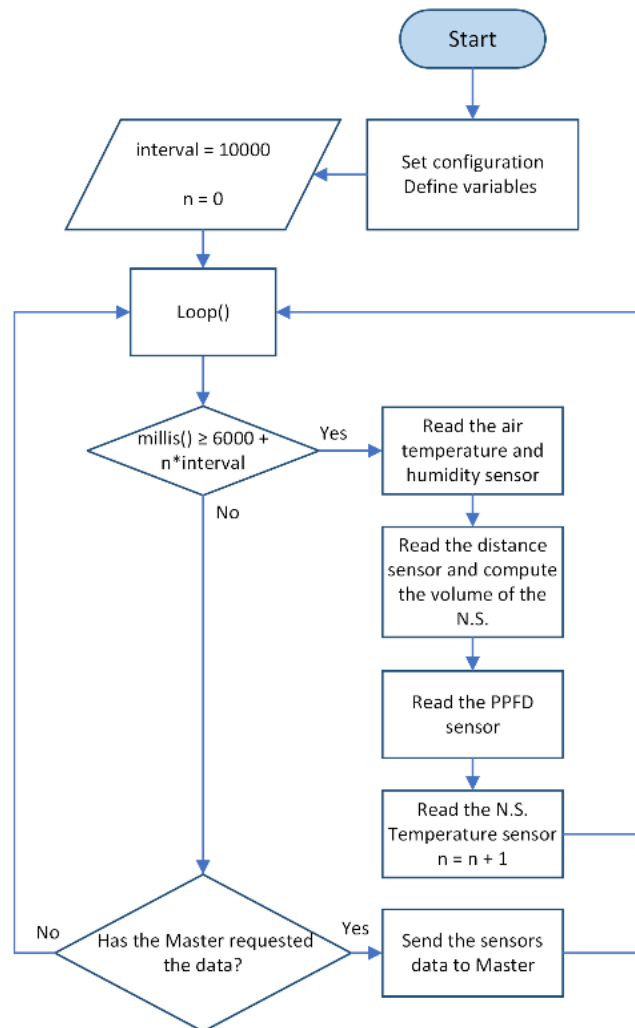


Figura 4-2. Diagrama de flujo del Esclavo 1.

4.3 Código del Esclavo 2

La Figura 4-3 es el diagrama de flujo del código del Esclavo 2. Después de encender la placa ArduinoUNO, establece la configuración, declara las variables necesarias y ejecuta la función loop(). Esta función está revisando una única condición que es si el Maestro ha enviado algún comando. En el caso de que se cumpla esta condición, revisa el comando y dependiendo de lo recibido, enciende o apaga el componente correspondiente, o bien, corrige el pH encendiendo el relé de la bomba peristáltica conectada al ácido durante 400 ms o enciende el extractor de aire si necesita disminuir el exceso de humedad en el aire.

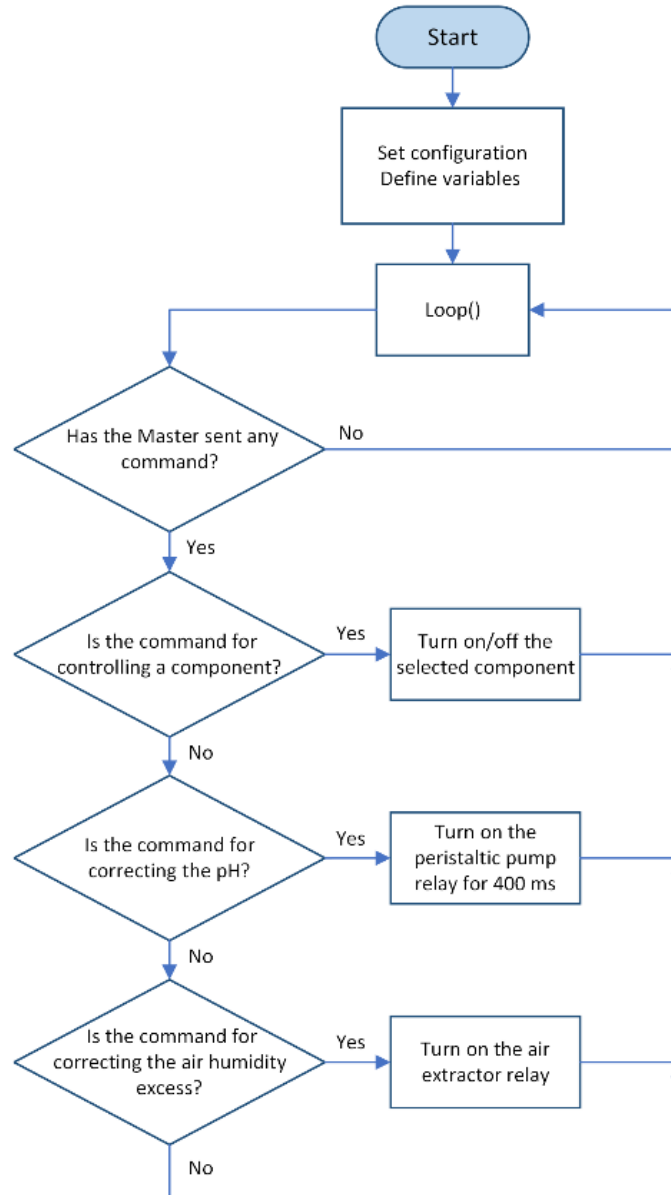


Figura 4-3. Diagrama de flujo del Esclavo 2.

4.4 Código del módulo ESP-01

El código del módulo ESP-01 es muy simple, consiste en revisar una única condición, la cual es si el Maestro ha enviado algún mensaje. En caso de que esto sea cierto, el ESP-01 recibe el mensaje, separa la cadena de caracteres que el Maestro ha enviado, reagrupa uno a uno los datos de los sensores y por último los envía a la nube de ThingSpeak al respectivo canal.

4.5 Capturas de pantalla del sitio web ThingSpeak



Figura 4-4. Capturas de pantalla del sitio web ThingSpeak de datos de temperatura del aire, CO₂, pH, conductividad eléctrica, temperatura de la S.N. y oxígeno disuelto.

4.6 Evolución del crecimiento de las plantas de lechuga

En la Figura 4-5 se presenta una serie de imágenes de la lechuga *Lactuca sativa* L. var. Capitata del tercer ciclo en diferentes días después del trasplante (ddt).



Figura 4-5. Fotografías de las plantas de lechuga *Lactuca sativa* L. var. Capitata en diferentes días después del trasplante (DDT).