



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**CULTIVO DE LECHUGA EN PROTOTIPO DE JARDINERÍA VERTICAL
CONTROLADA CON ARDUINO**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

PRESENTA

JARED JESUS ANTONIO PUON AGUILAR

DIRECTOR DE TESIS

M.C. GUILLERMO JESUITA PÉREZ MARROQUÍN

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Diciembre de 2024.



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**CULTIVO DE LECHUGA EN PROTOTIPO DE JARDINERÍA VERTICAL
CONTROLADA CON ARDUINO**

**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

**PRESENTA
JARED JESUS ANTONIO PUON AGUILAR**

**DIRECTOR DE TESIS
M.C. GUILLERMO JESUITA PÉREZ MARROQUÍN**

**ASESORES
DR. RAÚL BERDEJA ARBEU
DR. FABIAN ENRÍQUEZ GARCÍA
DR. JOSÉ VÍCTOR TAMARÍZ FLORES**

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Diciembre de 2024.

La presente tesis titulada: Cultivo de lechuga en prototipo de jardinería vertical controlada con Arduino realizada por Jared Jesus Antonio Puon Aguilar, ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el título de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias

Consejo Particular integrado por:

Firma

Director: M.C. Guillermo Jesuita Pérez Marroquín

Asesor: Dr. Raúl Berdeja Arbeu

Asesor: Dr. Fabián Enriquez García

Asesor: Dr. José Víctor Tamariz Flores

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Diciembre de 2024.

El presente trabajo forma parte del Cuerpo Académico denominado: **BUAP CA-234-Manejo de Recursos Fitogenéticos** y de la Línea de Investigación: **Manejo y Conservación de los Recursos Fitogenéticos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias**. Dicho trabajo, fue financiado con recursos propios.

DEDICATORIA

A ti *Concepción Puon Aguilar*, mamá, mi corazón y alma, te dedico este logro que, con tu amor, apoyo y cariño, me abres la puerta para empezar a forjar mi camino. Eres la mejor madre que pude haber tenido; no hay palabras ni acciones suficientes para mostrar toda mi gratitud hacia ti. Durante toda la carrera siempre tuve en mi cabeza tu superación, dejaste atrás muy lejos tu hogar, tu familia para poder estudiar una carrera, superarte y salir adelante. Pasaste adversidades y tiempos difíciles para poder ser lo que eres, y yo quiero ser como tú. Eres mi inspiración, mi motor y mi fortaleza, y estoy muy orgulloso de ti, Gracias por estar siempre ahí, por tus palabras de aliento, por tus consejos, por creer en mi cuando yo mismo dudaba. Gracias por todo mamá.

A mi amigo Arturo con quien desde la pandemia nació una amistad que valoro profundamente, pasando por risas, aprendizajes, experiencias e incluso desafíos como el servicio social. Gracias por todo el apoyo. Te estimo mucho y espero que nuestra amistad perdure.

A mi amigo Leandro, que, aunque tuvimos poco tiempo de amistad, siempre te tendré presente. Tu partida dejó un vacío, pero también recuerdos valiosos como tu carácter, tu nobleza y tu amistad dejaron un impacto duradero en mi vida.

A mis amigas Pao y Litzi, a mi amigo Laureano, gracias por su apoyo, las risas compartidas, las experiencias vividas y la convivencia que hizo más ameno esta travesía. Siempre guardare con cariño los momentos compartidos.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento al Dr. José Víctor Tamaríz Flores por brindarme su apoyo, su orientación y disposición. Gracias a su ayuda tuve las herramientas necesarias para poder realizar este trabajo de tesis.

Al Dr. Raúl Berdeja Arbeu por su apoyo constante desde mi protocolo de tesis hasta la interpretación de resultados, valoro mucho su disposición al guiarme y su compromiso en ser mi asesor.

Al M.C Guillermo Jesuita Pérez Marroquín por aceptar ser mi director de tesis, su empuje para probar cosas nuevas y también por haberme introducido al mundo de los microcontroladores.

Al Dr. Fabián Enríquez García por su apoyo al ser mi asesor de tesis.

Al Dr. Abel Cruz Montalvo y a la maestra Eréndira por la confianza y el apoyo que siempre me brindaron en el laboratorio, su disposición para resolver dudas, recomendaciones y guiarme fue invaluable durante este proceso.

Al maestro Cesar Calderón, quien en vida fue un excelente mentor en laboratorio, su paciencia, persona y enseñanza marcaron mi formación tanto académica como personal, siempre estaré agradecido.

Agradezco al Centro de Investigación de Ciencias Agrícolas por abrirme las puertas y permitirme realizar el experimento en sus instalaciones brindándome su apoyo.

A la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias por brindarme la base académica y las herramientas necesarias para mi formación.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
III. HIPÓTESIS	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1. Origen de la lechuga.....	5
4.2. Clasificación taxonómica.....	5
4.3. Variedades de lechuga.....	6
4.4. Morfología.....	7
4.5. Fenología.....	8
4.6. Hidroponía.....	8
4.6.1. Raíz flotante	8
4.6.2. Técnica de película nutritiva.....	9
4.6.3. Aeroponía.....	9
4.7. Requerimientos ambientales.....	10
4.7.1. Temperatura y humedad relativa.....	10
4.7.2. Luz.....	10
4.8. Solución nutritiva Steiner.....	10
4.9. Microcontrolador Arduino.....	11
4.10. Internet de las cosas (IoT).....	11
4.11. Sistemas hidropónicos en cultivo de lechuga.....	12

V.MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
5.1. Localización del sitio experimental.....	14
5.2. Germinación.....	14
5.3. Diseño del prototipo.....	15
5.4. Construcción e integración del prototipo.....	15
5.4.1. Equipos y materiales utilizados.....	16
5.5. Manejo del riego.....	18
5.6. Material vegetal.....	18
5.7. Monitoreo de sanidad.....	18
5.8. Solución nutritiva.....	18
5.9. Diseño experimental.....	19
5.10. Variables a evaluar.....	20
5.10.1. Número de hojas.....	20
5.10.2. Largo y ancho de hojas.....	20
5.10.3. Peso fresco y seco.....	20
5.10.4. Humedad relativa.....	20
5.10.5. Temperatura.....	20
5.10.6. Niveles de CO ₂	20
5.10.7. pH y conductividad eléctrica en la solución nutritiva.....	20
5.10.8. Contenido nutricional.....	21
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
6.1. Número de hojas.....	22
6.2. Largo y ancho de hojas.....	22
6.3. Peso fresco y seco.....	23
6.4. Contenido de agua.....	24
6.5. Humedad relativa y temperatura.....	25
6.6. Niveles de CO ₂	25
6.7. pH y conductividad eléctrica en la solución nutritiva.....	26
6.8. Contenido de nutrientes.....	27
VII. CONCLUSIÓN.....	29
VIII. LITERATURA CITADA.....	30

XI. ANEXOS.....	36
------------------------	-----------

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Página
Cuadro 1. Variedades de lechuga.....	6
Cuadro 2. Programación de ciclos de riego para el sistema hidropónico.....	18
Cuadro 3. Formulación y balance de la solución nutritiva universal Steiner.....	19
Cuadro 4. Medias de número de hojas en tres variedades de lechuga.....	22
Cuadro 5. Medias de largo y ancho de hojas en tres variedades de lechuga.....	23
Cuadro 6. Medias de peso en fresco y seco en tres variedades de lechuga.....	24
Cuadro 7. Contenido de agua en tres variedades de lechuga.....	24
Cuadro 8. Contenido de nutrientes en tres variedades de lechuga.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1. Localización del experimento, Centro de Investigación de Ciencias Agrícolas, BUAP. Puebla, Puebla.....	14
Figura 2. Diagrama de flujo de Arduino a IoT.....	17
Figura 3. Tendencias de la humedad relativa y temperatura en fluctuación diaria...	25
Figura 4. Comportamiento diaria de los niveles de CO ₂	26
Figura 5. Diferencias de los valores de pH y conductividad eléctrica en solución nutritiva.....	27
Figura 6. Contenido de nitrógeno en tres variedades de lechuga. Blanes, Ruby Sky y Cirkuz	28

RESUMEN

El futuro de la agricultura reside en la integración de tecnologías inteligentes que puedan optimizar el uso de recursos para así promover la sostenibilidad. Este trabajo presenta la implementación de un prototipo de jardinería vertical hidropónica inteligente basado en Arduino e Internet de las cosas (IoT), el cual es capaz de monitorear distintos parámetros como niveles de CO₂, humedad relativa y temperatura en tres variedades de lechuga (*Lactuca Sativa L*), siendo las variedades Blanes, Ruby Sky y Cirkuz, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con 6 plantas por cada variedad dividido en 4 bloques dando un total de 24 plantas, utilizando el análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de Tukey ($P \leq 0.05$). Se registraron niveles de CO₂ entre 107.32 ppm y 432.51 ppm, debido a estas fluctuaciones hubo afectación de fotosíntesis y crecimiento de plantas. Además, el análisis de nutrientes mostró que los niveles de calcio, fosforo, potasio y magnesio no fueron los ideales, siendo nitrógeno y hierro los únicos rescatables. La variedad Blanes tuvo mejor desarrollo foliar con un peso fresco de 31 gramos y un peso seco de 1.93 gramos, superando significativamente a las variedades Ruby Sky y Cirkuz. El prototipo tiene potencial para ser una herramienta innovadora en agricultura inteligente, integrando IoT para la gestión de parámetros. A pesar de las dificultades en el control de solución nutritiva y estabilidad de niveles de CO₂, el prototipo ofrece una base sólida para la producción sostenible en condiciones controladas y espacios urbanos.

Palabras clave: *Lactuca sativa L*, hidroponía, IoT, Arduino, contenido de nutrientes, niveles de CO₂, agricultura inteligente.

ABSTRACT

The future of agriculture lies in the integration of smart technologies that can optimize resource use and promote sustainability. This work presents the implementation of an intelligent vertical hydroponic gardening prototype based on Arduino and the Internet of Things (IoT), capable of monitoring various parameters such as CO₂ levels, relative humidity, and temperature in three lettuce (*Lactuca sativa* L.) varieties: Blanes, Ruby Sky, and Cirkuz. The study was conducted under a randomized complete block design with six plants per variety, divided into four blocks, totaling 24 plants. Data analysis included variance analysis (ANOVA) and Tukey tests ($P \leq 0.05$). CO₂ levels were recorded between 107.32 ppm and 432.51 ppm, with these fluctuations negatively affecting photosynthesis and plant growth. Additionally, the nutrient analysis showed that calcium, phosphorus, potassium, and magnesium levels were suboptimal, with nitrogen and iron being the only acceptable nutrients. The Blanes variety demonstrated superior foliar development, with a fresh weight of 31 grams and a dry weight of 1.93 grams, significantly outperforming the Ruby Sky and Cirkuz varieties. The prototype has the potential to become an innovative tool in smart agriculture, integrating IoT for parameter management. Despite challenges in controlling the nutrient solution and stabilizing CO₂ levels, the prototype provides a solid foundation for sustainable production in controlled conditions and urban spaces.

Keywords: *Lactuca sativa* L, hydroponics, IoT, Arduino, nutrient content, CO₂ levels, smart agriculture.

I. INTRODUCCIÓN

La *Lactuca sativa L*, más conocida como lechuga, es una planta herbácea ampliamente cultivada por sus hojas verdes comestibles. En México, las variedades Romana y Orejona dominan la producción, representando el 98% del total nacional, con cultivos concentrados en Guanajuato, Zacatecas, Aguascalientes y Puebla. La producción constante asegura disponibilidad durante todo el año, especialmente en los periodos de febrero a abril y de julio a agosto. México se posiciona como el noveno productor mundial de lechuga, con exportaciones significativas hacia Estados Unidos y Canadá, gracias a una tasa de crecimiento anual del 11.4% entre 2015 y 2020. La lechuga es valorada no solo por su sabor suave, sino también por sus beneficios digestivos y propiedades diuréticas. Rica en antioxidantes, vitaminas y minerales, esta planta continúa siendo un alimento esencial y saludable en la dieta moderna (SADER, 2021a).

La agricultura está bajo una presión creciente para incrementar su producción a medida que la población mundial continúa en aumento y la demanda de alimentos se eleva. Se proyecta que, para el año 2050, la población mundial llegará a los 9,800 millones de personas, con el 70% viviendo en zonas urbanas (NU, 2015).

Con el propósito de incrementar la producción de cultivos por unidad de superficie, el concepto de Agricultura Vertical está ganando popularidad. Esta técnica busca aliviar la presión sobre las tierras agrícolas tradicionales mediante la incorporación de sistemas de cultivo sin suelo, siendo especialmente atractiva para su implementación en áreas urbanas. En lugares donde los recursos de suelo y agua son limitados, la agricultura vertical podría tener un papel importante en la producción de alimentos. Las ciudades, con su escasez de tierra, necesitarán producir suficiente comida para alimentar a su población y así evitar la congestión, la contaminación y los altos costos de los alimentos (Agrilyst, 2017).

La hidroponía, un método de cultivo sin suelo, esencial para la agricultura sostenible. Reduce el uso de agua, permite la agricultura urbana y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero. Los avances tecnológicos como el IoT (Internet de las Cosas), hacen estos sistemas más eficientes, permitiendo el cultivo durante todo el año. En la próxima década, podría mejorar la seguridad alimentaria y proporcionar oportunidades económicas en países en desarrollo (Reddy *et al.*, 2023).

Arduino es una plataforma de electrónica, tanto de hardware como de software en código abierto. Está diseñada para la creación de proyectos, el hardware de Arduino es un microcontrolador que mediante la programación permite a los usuarios leer datos de sensores y convertirlos en una variedad de salidas, incluso enviar datos vía Internet. Gracias a su versatilidad, Arduino se ha convertido en una herramienta popular no solo en el ámbito educativo sino también en proyectos tecnológicos, especialmente en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) y robótica (Sivaji *et al.*, 2022).

En estudios previos como en el de (Namgyel *et al.*, 2018). Demuestra que la implementación de sistemas hidropónicos apoyados con tecnología IoT es importante para un monitoreo preciso y con acceso a datos en tiempo real siendo adecuada y beneficiosa en un entorno urbano.

El aumento de los problemas relacionados con la seguridad alimentaria, la urbanización, la falta de terrenos cultivables y el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero ha puesto de relieve la importancia de la agricultura vertical (Tang *et al.*, 2019).

Con base a lo anterior, el objetivo de la presente investigación es diseñar e implementar un prototipo de jardinería vertical inteligente basado en hidroponía para optimizar el cultivo de lechuga en sus tres variedades, así como también evaluar el crecimiento, rendimiento y análisis de nutrientes de tres variedades de lechuga en dicho sistema.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo de jardinería vertical hidropónico inteligente basado en Arduino, para optimizar el cultivo de lechuga.

2.2 Objetivos específicos

1. Diseñar y construir un prototipo de jardinería vertical inteligente utilizando Arduino para el cultivo de lechuga en sus tres variedades.
2. Integrar la tecnología Internet de las cosas (IoT) que permita al usuario monitorear el prototipo de jardinería vertical de forma remota.
3. Evaluar la eficacia y comportamiento del prototipo de jardinería vertical inteligente en términos de calidad y de producción del cultivo de lechuga en sus tres variedades, Ruby Sky, Cirkuz y Blanes.

III. HIPÓTESIS

La implementación de un prototipo de jardinería vertical inteligente permitirá un monitoreo más efectivo de los parámetros (niveles de CO₂, humedad relativa y temperatura) en el cultivo de lechuga.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Origen de la lechuga

Los primeros registros de la lechuga (*Lactuca Sativa L*), como especie cultivada tienen origen en Egipto en la cual se señala la existencia de jeroglíficos en templos y tumbas que datan aproximadamente de 2700 A.C. Los egipcios usaron la lechuga silvestre, con hojas amargas y tallos erguidos, tanto como alimento sagrado asociado con la fertilidad como para producir aceite medicinal y culinario. Posteriormente, los griegos y romanos adoptaron y perfeccionaron su cultivo, convirtiendo la lechuga en un alimento básico en sus dietas y extendiendo su cultivo a Europa y Asia. La lechuga llegó al continente americano probablemente gracias a Cristóbal Colón, quien pudo haber traído semillas en su viaje en el siglo 14. Durante los siguientes 200 años, los colonos europeos introdujeron y cultivaron diversas variedades de lechuga en América del Norte y del Sur, expandiendo así la diversidad (Fischer, 2018).

4.2 Clasificación taxonómica

Según (USDA, 2006) la taxonomía de la lechuga corresponde de la siguiente manera.

Reino:	Plantae
Subreino:	Tracheobionta
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Subclase:	Asterales
Orden:	Asterales
Familia:	Asteraceae
Subfamilia:	Cichorioideae
Género:	<i>Lactuca</i>
Especie:	<i>Lactuca Sativa L.</i>

4.3 Variedades de lechuga

Alrededor del mundo existen una gran variedad de lechugas comerciales; en México, las más producidas son la Romana y la Orejona, aunque también se producen las variedades Baby leaf y Escarola. El cultivo de lechuga se da en 22 estados de la República Mexicana, donde Guanajuato, Zacatecas y Puebla se colocan como los principales productores de esta verdura verde. En México, la producción de lechuga permite que esta verdura se encuentre disponible durante todo el año, pero hay mayor disponibilidad de ella en dos periodos: de febrero a abril y de julio a agosto (SADER, 2019).

Cuadro 1. Variedades de lechuga

Variedades	Descripción	Características
Lechuga Romana	Hojas alargadas y puntiagudas	Resistente al calor y sequía
Lechuga Orejona	Hojas grandes y redondas	Mayor contenido de agua y textura crujiente
Lechuga Baby leaf	Hojas jóvenes y de rápido crecimiento	Requiere menos espacio e ideal para cosecha en etapa temprana
Lechuga Escarola	Hojas anchas y dentadas	Sabor ligeramente amargo
Lechuga Hoja Roja	Hojas rojas con verde.	Ricas en antioxidantes y vitamina A
Lechuga Hoja Verde	Hojas verdes con distintos matices	Variedad de sabores y texturas
Lechuga Lollo Rosso	Hojas rizadas y color rojo intenso	Aporta color y textura
Lechuga Black Seed Simpson	Hojas rizadas	Mayor resistencia al marchitamiento

Fuente: Watson, 2024.

4.4 Morfología

La lechuga presenta una raíz principal corta y pivotante, que puede alcanzar una profundidad de hasta 30 cm, con pequeñas ramificaciones laterales. Sus numerosas raíces laterales, responsables de la absorción, se desarrollan en la capa superficial del suelo, entre 5 y 30 cm de profundidad. El tallo de la lechuga es pequeño, corto y cilíndrico. En su estado óptimo de cosecha, no tiene ramificaciones, pero al final de su etapa comercial, el tallo se alarga hasta 1,2 metros, con ramificaciones en el extremo y presencia de inflorescencias en las puntas. Las hojas de la lechuga pueden tener diversas formas, como lanceoladas, oblongas o redondeadas (Alzate y Loaiza, 2008).

El borde de las hojas de la lechuga puede variar dependiendo de la variedad, siendo liso, lobulado, ondulado, aserrado o dentado. Su color también varía, pudiendo ser verde amarillento, claro u oscuro, rojizo, púrpura o casi morado, según el tipo y el cultivar. Las hojas de la lechuga se agrupan en capítulos que forman racimos o corimbos, compuestos por 10 a 25 floretes con un receptáculo plano rodeado de brácteas imbricadas. Los floretes exteriores tienen pétalos ligulados de color amarillo o blanco, mientras que los interiores presentan una corola tubular con borde dentado (Valadez, 1998).

El gineceo de la lechuga es unicarpelar con un ovario ínfero y un estigma bífido que se poliniza al atravesar el tubo de las anteras. Al separarse los lóbulos del estigma, el polen cae sobre los papilos estigmáticos. Las flores, que son hermafroditas, presentan una corola amarilla y simpétala, con un ovario bilobulado. Los cinco estambres están separados en la base del tubo de la corola, pero sus anteras se unen formando un cilindro alrededor del estilo. El fruto de la lechuga es un aquenio típico, y la semilla es exalbuminosa, plana y puntiaguda. Botánicamente, la semilla es considerada un fruto, de forma aovada y aplanada, con tres a cinco costillas por cada lado. Su color puede ser blanco, amarillo, marrón o negro, y su tamaño varía entre 2 y 5 mm. En su base se encuentra el vilano o papus plumoso, que facilita la diseminación por el viento. Este se desprende fácilmente, dejando el aquenio de la semilla limpio (Granval y Graviola, 1991).

4.5 Fenología

Según (Saavedra *et al.*, 2017) la lechuga presenta una fenología que inicia con la germinación de su fruto seco e indehisciente, activada por la absorción de agua, lo que permite el crecimiento de la radícula y la elongación de cotiledones, los cuales realizan fotosíntesis hasta la aparición de hojas verdaderas. En sistemas hidropónicos, la raíz pivotante desarrolla raíces homorrizas especializadas en la absorción de nutrientes. La planta produce hojas en un tallo corto formando una roseta, y en la etapa de formación de cabeza, las hojas se generan secuencialmente, favorecidas por luz intensa y temperaturas uniformes. Los órganos reproductivos se desarrollan tras completar el ciclo vegetativo.

4.6 Hidroponía

La hidroponía es una técnica de cultivo que se realiza en entornos controlados, donde las plantas crecen sin suelo, utilizando una solución acuosa enriquecida con nutrientes esenciales. Civilizaciones antiguas como los incas, aztecas, egipcios y chinos ya empleaban este método de cultivo (Sandoya *et al.*, 2021).

Actualmente, la hidroponía presenta ventajas como un uso eficiente del agua, la producción de cultivos de alta calidad durante todo el año y una menor exposición a enfermedades y plagas. Es especialmente eficaz para el cultivo de vegetales de hojas verdes, como la lechuga, y se ha consolidado como una opción sólida y sostenible para la agricultura moderna (Atlas Scientific, 2024).

4.6.1 Raíz flotante

El sistema de Raíz Flotante es un método hidropónico simple y económico en el que las plántulas se insertan en agujeros de una plataforma o balsa, generalmente hecha de poliestireno. las raíces de las plantas flotan sobre una solución nutritiva. Se bombea aire a la solución para proporcionar el oxígeno necesario para un desarrollo saludable de las raíces (Kaiser y Ernst, 2016).

Es adecuado para cultivos como la lechuga, proporcionar las condiciones óptimas de crecimiento, controlando factores ambientales como nutrientes, pH y luz. Al evitar el suelo, se reduce el riesgo de enfermedades y plagas, aunque no todas las plantas prosperan en este sistema. Aun así, ofrece una opción versátil y eficiente para cultivar vegetales frescos y saludables con rendimientos óptimos (Infocampo, 2017).

4.6.2 Técnica de película nutritiva

El sistema de Nutrient Film Technique (NFT), conocido como Técnica de Película Nutritiva, es una técnica hidropónica ampliamente utilizada que mantiene una circulación constante de solución nutritiva. Esta solución se bombea hacia bandejas de cultivo o tuberías que contienen las plantas, permitiendo que las raíces absorban los nutrientes necesarios. Luego, la solución regresa al depósito para ser reutilizada. Este método es especialmente adecuado para cultivos hidropónicos en espacios específicos, ya que las soluciones nutritivas circulan de manera equilibrada, satisfaciendo las necesidades de cada planta (Tabaglio *et al.*, 2020).

4.6.3 Aeroponía

La aeroponía es una innovadora técnica agrícola urbana en la que las plantas crecen sin contacto directo con el suelo, lo que evita la exposición a patógenos del suelo. En este método, las raíces se mantienen suspendidas en el aire en un ambiente oscuro y se rocían regularmente con una solución nutritiva. Aunque es una técnica muy efectiva, es fundamental mantener un ciclo constante de rocío para evitar que las raíces se sequen rápidamente. La aeroponía, una variante de la hidroponía permite un control preciso de la iluminación, la temperatura, la humedad y el pH, ajustándose a las necesidades específicas de cada cultivo. Esta técnica garantiza un rendimiento excelente y un crecimiento saludable y eficiente de las plantas (Caughill, 2018).

4.7 Requerimientos ambientales

4.7.1 Temperatura y humedad relativa

El sistema radicular de la lechuga es muy reducido en comparación con la parte aérea, debido a esto es muy sensible a la falta de humedad y no es tolerante a un periodo de sequía, aunque sea muy breve. La humedad relativa óptima para la lechuga es del 60 al 80% sin embargo de vez en cuando menos del 60% lo agradece el cultivo mientras que la temperatura ideal de germinación fluctúa entre 18 a 20 °C. Durante la fase de crecimiento del cultivo son requeridas temperaturas entre 14 a 18 °C en el día y 5 a 8 °C en la noche. La lechuga soporta temperaturas altas y bajas, como máxima soporta 30°C y mínima hasta -6°C (INFOAGRO, 2020).

4.7.2 Luz

En la producción de lechuga en ambiente controlado en interiores, encontrar la intensidad de luz óptima más baja es de importancia para lograr un rendimiento aceptable con el menor consumo energético posible. Basándose en el crecimiento, la calidad y el consumo de energía se recomienda un PPDF de 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ con un fotoperiodo de 16 h/día provisto por luces LED (Zhang *et al.*, 2018).

4.8 Solución nutritiva Steiner

La solución Steiner es una solución nutritiva, en la cual se encuentran disueltos nutrientes vitales para el crecimiento óptimo y desarrollo de las plantas. La solución universal Steiner es un fertilizante el cuál se compone de macronutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales son los elementos más en demanda para el desarrollo de los cultivos, en cuanto a micronutrientes tales como: cloro, magnesio, calcio, boro, azufre, manganeso, zinc y molibdeno, son requeridos, pero en cantidades reducidas. Los macro y micronutrientes son esenciales para las plantas, ya que participan en funciones vitales y no pueden ser reemplazados. Cada planta tiene un rango de tolerancia específico para estos nutrientes. La deficiencia de alguno puede frenar su crecimiento o causar la muerte, mientras que el exceso de nutrientes puede generar fitotoxicidad (SADER, 2021).

4.9 Microcontrolador Arduino

Un microcontrolador, en un sentido más amplio, está compuesto por dispositivos de almacenamiento y, más crucialmente, por un procesador. Los microcontroladores se utilizan en dispositivos que requieren la entrada del usuario. Están diseñados para realizar una función específica, como por ejemplo la muestra de datos (Hussain *et al.*, 2016).

Arduino es un microcontrolador y plataforma de electrónica de código abierto ampliamente utilizada para desarrollar proyectos interactivos de hardware y software. Usando esta plataforma es posible conectar sensores, luces, pantallas y otros componentes a una protoboard, controlándolos mediante código programado en su entorno de desarrollo (Kondaveeti *et al.*, 2021).

4.10 Internet de las cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT) está emergiendo rápidamente como una de las industrias más dinámicas, ofreciendo ventajas sociales y económicas significativas para las economías en desarrollo. IoT se refiere a una red de dispositivos conectados que incluye computadoras, dispositivos físicos, componentes electrónicos, sensores y actuadores, todos con identificadores únicos. Estos dispositivos pueden transmitir datos a través de una red sin necesidad de intervención humana o de computadoras, permitiendo una comunicación y automatización eficientes entre diferentes sistemas (Chavan *et al.*, 2018).

Se compone de dos elementos clave: "Internet" y "cosas". La comunicación permite que estos dispositivos coordinen sus acciones y tomen decisiones en conjunto, dándoles la capacidad de escuchar, ver, pensar, calcular y actuar. La tecnología dota a estos dispositivos de la capacidad para tomar decisiones autorizadas que benefician diversas aplicaciones mediante el uso de inteligencia y consenso. Desde la perspectiva de simples observadores pasivos, los objetos o sensores se transforman en miembros activos de un sistema informático, comunicándose, colaborando y tomando decisiones críticas. Esto presenta desafíos que requieren estándares de comunicación especializados (Zhao *et al.*, 2015).

4.11 Sistemas hidropónicos en el cultivo de lechuga

Un equipo de Sierra Space patrocinado por NASA está desarrollando XROOTS, un sistema que evaluará las técnicas de entrega y recuperación de nutrientes sin suelo a lo largo del crecimiento de la planta entorno a la microgravedad de la estación espacial, recopilando datos utilizando sensores. Las técnicas hidropónicas y aeropónicas podrían proporcionar una alternativa fundamental para contribuir a la exploración espacial futura (NASA, 2022).

La agricultura inteligente también es la aplicación del Internet de las Cosas IoT, aprovechando la tecnología para tener un control más detallado, así como una recolección de datos más precisa sobre el entorno del cultivo, con el potencial de optimizar mano de obra e insumos (Changmai *et al.*, 2018).

En su trabajo de investigación (Leiva *et al.*, 2018) presenta a la hidroponía como una importante alternativa a la producción tradicional en suelo. En su trabajo de investigación evaluó el comportamiento de lechuga en 11 variedades en el sistema Nutrient Film Technique (NFT) obteniendo resultados positivos, con diferencias significativas en todas las variedades siendo la variedad Curly Green la de mejor productividad.

En los cultivos hidropónicos de lechuga es de esencial implementar la eficiencia de los recursos para aumentar el crecimiento del cultivo. Los cambios en los patrones de consumo en las comunidades urbanas, orientados hacia el consumo de cultivos limpios y libres de pesticidas, impulsan el desarrollo de la hidroponía en áreas urbanas (Frasetya *et al.*, 2021).

El cultivo hidropónico con sistemas IoT es una innovación agrícola que automatiza el monitoreo de variables clave como temperatura, humedad, pH y nutrientes, mejorando la productividad de cultivos como la lechuga. Estos sistemas ahorran hasta un 90% de agua y se adaptan a espacios pequeños, aunque enfrentan desafíos como costos elevados y requerimientos técnicos, demostrando su viabilidad en estudios piloto a pequeña escala (Sagar y Gupta, 2024).

El sistema de monitoreo de IoT desarrollado por (Montaño-Blacio *et al.*, 2023) proporciona una solución innovadora para el cultivo hidropónico con aplicaciones específicas para cultivos como la lechuga. Este sistema combina tecnologías avanzadas como redes neuronales para predecir y controlar variables importantes como la temperatura y la humedad con una precisión de hasta el 89,37%. Además, su despliegue en entornos hidropónicos ha demostrado su capacidad para optimización de recursos y adaptación.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Localización del sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas de la BUAP, ubicado en la prolongación de la 14 Sur, Ciudad Universitaria, Puebla, a una altitud de 2125 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas 19°0' Latitud Norte, 98°12' Longitud Oeste (Google Earth, s.f.).

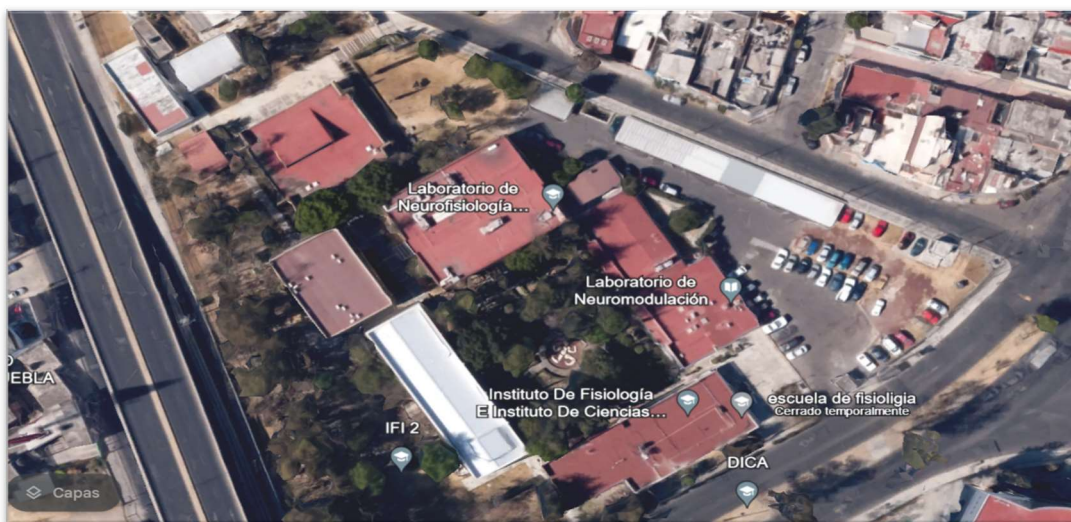


Figura 1. Ubicación del sitio experimental. Centro de Investigación de Ciencias Agrícolas, BUAP. Puebla, Puebla, (Google Earth, s.f.).

5.2 Germinación

Se utilizó lana de roca como sustrato, con cubos de 3 cm x 3 cm para cada planta. Se prepararon 24 cubos en total, distribuidos en 8 cubos por cada una de las tres variedades de lechuga. Los cubos se remojaron durante 15 minutos para reducir el riesgo de enfermedades y luego se dejaron secar.

Posteriormente, se colocaron 2 semillas en cada cubo, organizadas por variedad para mantener el orden y facilitar la identificación. Los cubos fueron colocados en una charola mediana transparente y se les añadió agua con un pH de 6.5, cubriendo a un tercio de la altura de los cubos de lana de roca para asegurar una correcta hidratación, se cerró la charola para la generación de humedad.

Durante el proceso de germinación, se utilizó un foco LED de $250 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ espectro completo de 36 watts, con un ciclo de 15 horas diarias de iluminación. La germinación se realizó en un ambiente controlado a temperatura ambiente, lo que favoreció un crecimiento uniforme. Después de 15 días, todas las semillas germinaron correctamente, alcanzando un tamaño similar.

Finalmente, las plántulas fueron transferidas al prototipo hidropónico vertical para continuar su desarrollo (Anexo 1).

5.3 Diseño del prototipo

El prototipo se diseñó de manera modular y desmontable, lo que permitió una mayor flexibilidad y portabilidad, aspectos cruciales para facilitar su transporte y adaptación en diversos espacios de agricultura urbana. Este enfoque es especialmente importante en entornos con limitaciones de espacio, como azoteas, departamentos y escuelas, donde la integración de cultivos puede ser más desafiante.

La modularidad no solo facilitó el mantenimiento, sino que también permitió escalar el prototipo según las necesidades del usuario, apoyando la implementación de soluciones agrícolas en áreas urbanas densas.

5.4 Construcción e integración del prototipo

La base del prototipo fue construida con ángulos de acero, midiendo 65 cm de largo, 45 cm de ancho y 55 cm de alto. Tres de las caras fueron cerradas con lámina galvanizada para proporcionar estabilidad estructural, dejando una cara abierta para facilitar el acceso al depósito de agua. Se instalaron ruedas en las esquinas inferiores de la base, permitiendo un fácil desplazamiento.

Cuatro soportes de acero de 175 cm de altura y media pulgada de ancho se conectaron a las esquinas de la base, proporcionando soporte estructural vertical. Una cruceta diagonal unió estos soportes en la parte superior, permitiendo la instalación de un socket para un foco LED en el centro. El techo del prototipo, también fabricado con ángulos y lámina galvanizada mide 65 cm de largo, 45 cm de ancho y 10 cm de alto, con orificios diseñados para ventiladores de 12 cm, lo que asegura una correcta circulación del aire (Anexo 2).

5.4.1 Equipos y Materiales Utilizados

Revestimiento de papel Mylar: Se utilizó en las caras laterales y trasera del prototipo para maximizar la reflexión de la luz y mejorar la iluminación de las plantas, optimizando el crecimiento de las lechugas.

Acrílico Transparente: Instalado en la parte frontal, con dimensiones de 65 cm de largo y 150 cm de alto, este material transparente permite una observación directa del crecimiento de las plantas y aporta una estética visual al diseño, además de facilitar el monitoreo sin necesidad de abrir el prototipo.

Tubos PVC: Se instalaron cuatro tubos de PVC de 4 pulgadas de diámetro y 110 cm de altura, cada uno con capacidad para seis plantas. Estos tubos fueron fijados a la estructura vertical para garantizar estabilidad y soporte a las plantas.

Sistema de riego. El sistema de riego se construyó con tuberías de CPVC de media pulgada, conectadas a través de codos y tees, para distribuir la solución nutritiva de manera eficiente. Una bomba sumergible de 1300 L/h asegura el suministro continuo de nutrientes a través de aspersores de cuatro boquillas, que distribuyen el agua de manera uniforme en los cuatro tubos de PVC.

Flujo de aire. Se utilizaron dos ventiladores de 12 x 12 cm, uno usado para la entrada de aire y el otro para la salida de aire, colocados en el techo del sistema, cada ventilador corre a una velocidad de 1200 rpm.

Depósito de agua. El prototipo incluye un depósito de agua de 60 litros, fabricado con una caja de plástico de uso rudo. Este depósito, ubicado en la base del prototipo, aloja la solución nutritiva necesaria para el riego y asegura un suministro constante a lo largo del ciclo de cultivo.

Luz Led. Fue instalado en el centro de la cruceta superior un socket para un foco led de espectro completo de 36 w, equivalente a 400 w de incandescencia, dando 4000 k de luz diurna. Proporcionando de acuerdo con sus requerimientos 15 horas luz (Anexo 3).

Arduino y sensores. El prototipo está equipado con una placa Arduino R4 Wi-Fi, que fue programada para monitorear las variables de humedad relativa, temperatura y niveles de dióxido de carbono (CO_2). Los sensores utilizados incluyen el DHT11 para la medición de temperatura y humedad, y el MQ-135 para los niveles de CO_2 (Anexo 4).

El software fue programado en el entorno Arduino IDE, incluyendo rutinas para la inicialización de sensores, la configuración WiFi y la captura y procesamiento de datos. El sistema procesa los valores de los sensores en unidades útiles ($^{\circ}\text{C}$, %, ppm) antes de mostrarlos en la pantalla LCD y enviarlos al Arduino Cloud. En la plataforma IoT, se configuraron dashboards para monitorear las variables en tiempo real y almacenar los datos en una base de datos central para su análisis posterior (Anexo 5).

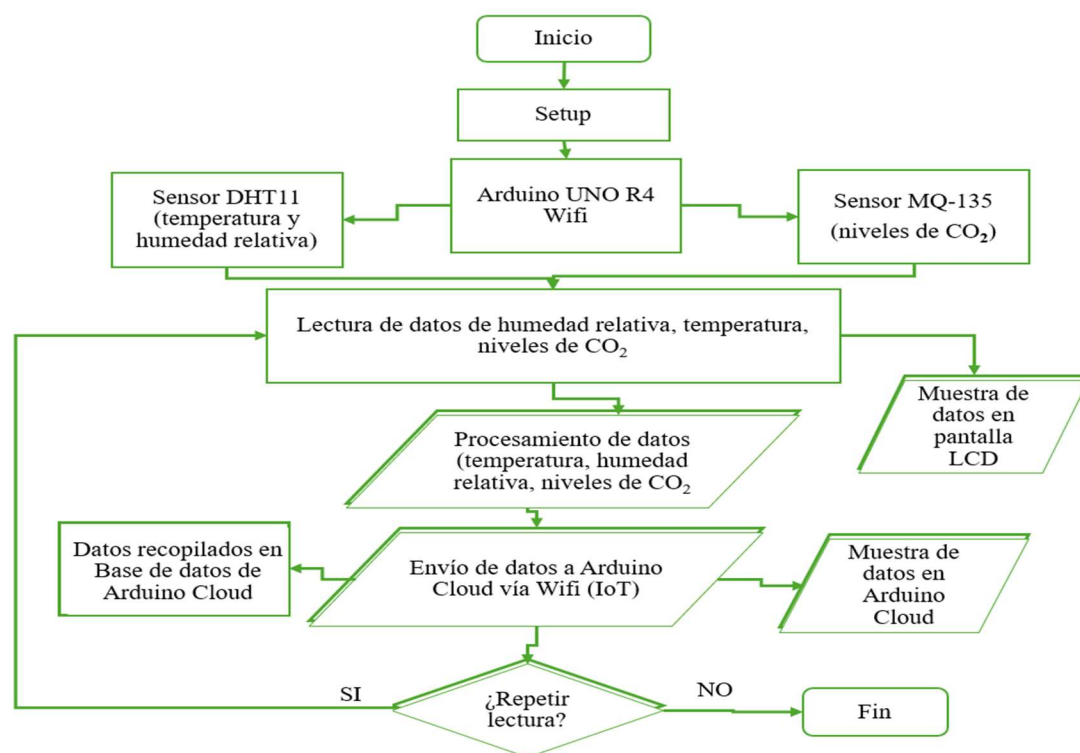


Figura 2. Diagrama de flujo de Arduino a IoT (Elaboración propia).

5.5 Manejo del riego

Un temporizador programado permitió realizar el riego en ocho ciclos a lo largo de 24 horas, dando un suministro constante de nutrientes a las plantas.

Cuadro 2. Programación de ciclos de riego para el sistema hidropónico.

Tiempos de riego al día		
Hora encendido	Hora apagado	Minutos
06:00	06:30	30
09:00	09:25	25
11:30	12:00	30
14:15	14:45	30
17:00	17:30	30
19:30	19:45	15
21:30	21:45	15
23:25	23:50	25

Fuente: Elaboración propia.

5.6 Material Vegetal

El material vegetal que se utilizó fueron 3 variedades de *Lactuca sativa* L. **Blanes**, **Ruby Sky** y **Cirkuz**.

5.7 Monitoreo de sanidad

Durante el experimento se inspecciono diario la sanidad de cada planta de los cuatro bloques, así mismo también cada semana se hizo mantenimiento al prototipo, lavando tanto el interior como el exterior del prototipo, al igual que el depósito de agua.

5.8 Solución nutritiva

Se utilizó la solución nutritiva universal Steiner, compuesta por dos mezclas A y B, proporcionada por la marca Inverfarms. Esta solución fue preparada utilizando agua destilada trifásica con una conductividad eléctrica inferior a 0.5 dS/m, siguiendo las instrucciones del fabricante para asegurar una correcta disolución y balance de nutrientes.

Para la preparación de la solución nutritiva final, las soluciones madre A y B se mezclaron en partes iguales en un depósito previamente lleno con agua destilada. Se controlaron parámetros clave como la conductividad eléctrica (CE) y el pH para que la solución estuviera dentro de los rangos óptimos recomendados. (Anexo 6)

Cuadro 3. Formulación y balance solución nutritiva universal Steiner.

Universal Steiner		
Formulación y balance		
Nutrimiento esencial	ppm, mg/L	mmol/L
A		
Nitrógeno NO ₃	220	15.7
Nitrógeno NH ₄	18	1.3
Fósforo (P)	39	1.3
Potasio (K)	164	6.8
Calcio (Ca)	190	4.7
Magnesio (Mg)	73	3
Azufre (S)	105.3	3.3
B	ppm, mg/L	umol/L
Boro (B)	0.15	13.9
Hierro (Fe-EDTA)	1.56	28
Zinc (Zn-EDTA)	0.21	3.3
Cobre (Ce-EDTA)	0.11	1.7
Manganeso (Mn-EDTA)	0.84	15.2
Molibdeno (Mo)	0.06	0.7
Fuente: Inverfarms (s.f.)		

5.9 Diseño Experimental

Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar. Este diseño constó de tres variedades de lechuga distribuidas en cuatro bloques, con dos repeticiones de cada variedad por bloque, sumando un total de 24 plantas.

Para asegurar una evaluación precisa, los datos recopilados se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), y las comparaciones de medias entre las variedades se realizaron utilizando la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) a través del programa Statistical Analysis Systems (SAS) versión 9.0. Este método estadístico fue crucial para determinar diferencias significativas entre las variedades en cada bloque.

5.10 Variables a evaluar

5.10.1 Número de hojas

Dividido en 4 periodos, se contó en cada una de las plantas el número de hojas en cada uno de los 4 bloques para así determinar el área foliar.

5.10.2 Largo y ancho de hojas

Se midió el largo y ancho de hojas igualmente en 4 periodos utilizando un vernier dando los resultados en mm (Anexo 7).

5.10.3 Peso fresco y seco

Al cosechar se pesó el peso en fresco de cada lechuga con una balanza de precisión de laboratorio, una vez pesadas las lechugas se colocaron cada una en una bolsa de papel y se metieron a una estufa de secado durante 12 horas a una temperatura de 90 grados Celsius, una vez secadas con la misma balanza de precisión fueron pesadas en seco.

5.10.4 Humedad relativa

Con el sensor DHT11 conectado al Arduino, se midió la humedad del aire dentro de la torre para evitar condiciones demasiado secas o húmedas,

5.10.5 Temperatura

Al igual que la humedad relativa, se ocupó el mismo sensor DHT11 para medir la temperatura dentro del prototipo las 24 horas del día.

5.10.6 Niveles de CO₂

Se monitoreo por medio del sensor MQ 135 los niveles de dióxido de carbono en la torre para asegurar que las plantas tengan suficiente CO₂ para llevar a cabo la fotosíntesis de manera eficiente.

5.10.7 pH y conductividad eléctrica en la solución nutritiva

Se midió la conductividad eléctrica y el pH del agua de riego para asegurar que la solución nutritiva tuviese los niveles adecuados de nutrientes y estén en los rangos óptimo para las lechugas.

5.10.8 Contenido nutricional

Por medio de dos procedimientos se evaluaron los contenidos nutricionales de distintos elementos en la lechuga, para la determinación del nitrógeno mediante el método Kjeldahl, las muestras fueron sometidas a un proceso que incluyó tres etapas principales: digestión, destilación y titulación. La digestión se llevó a cabo utilizando ácido sulfúrico concentrado, lo que permitió descomponer el material orgánico de las muestras. Posteriormente, se realizó la destilación del amoníaco generado, el cual fue absorbido en una solución estándar de ácido bórico. Finalmente, la concentración de nitrógeno fue determinada mediante titulación (Anexo 8).

Para los elementos fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) hierro (Fe) y magnesio (Mg), se utilizó la técnica de ICP, que permite una determinación precisa y simultánea de múltiples elementos. Antes del análisis, las muestras fueron sometidas a un pretratamiento mediante digestión ácida utilizando el sistema de microondas Mars XP1500 Plus, diseñado para garantizar una descomposición completa de la materia orgánica y facilitar la extracción de los nutrientes. Este pretratamiento fue fundamental para obtener una solución homogénea que pudiera ser analizada mediante el ICP.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Número de hojas

En el análisis estadístico de la variable número de hojas se observa diferencia significativa en el tratamiento 1, con la variedad Blanes, en las cuatro fechas de evaluadas. Como se observa en el cuadro 4. De acuerdo con Nitu *et al.* (2024) el número de hojas en lechuga cultivada hidropónicamente puede ser afectado por la variedad de planta y las condiciones de oxígeno e iluminación.

Chowdhury *et al.* (2024) evaluando sistemas hidropónicos en lechugas en producción de lechugas orgánicas menciona que la altura de planta, numero de hojas y área foliar de hoja se modifican por tratamiento utilizado.

Cuadro 4. Medias de número de hojas en tres variedades de lechuga.

Tratamientos	08/04/2024	22/04/2024	11/05/2024	22/05/2024
T1. Blanes	10.75 a	11 a	20.25 a	15 a
T2. Ruby Sky	5.12 b	5 b	10.12 b	9 b
T3. Cirkuz	4.37 b	4.5 b	6.75 b	5.25 b
C.V	37.62	37.3	38.77	40.28
DMSH	3.24	3.25	6.12	5.01

Medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación.

6.2 Largo y ancho de hojas

El largo y ancho de las hojas mostró diferencias significativas entre las variedades y fechas de evaluación ($P \leq 0.05$). La variedad Blanes alcanzó los mayores valores en ambas dimensiones hacia el final del estudio. Para el 29 de mayo, Blanes presentó un largo promedio de 153.68 mm, superando estadísticamente a las otras variedades. Los valores más altos en el ancho promedio de la hoja lo obtuvieron la variedad Blanes y Ruby Sky, superando estadísticamente a la variedad Cirkuz, especialmente en la última medición, con 83.28 mm de largo y 48.95 mm de ancho (Cuadro 5).

Sapkota *et al.* (2019) en su trabajo de investigación observó que el tamaño de las hojas puede verse influenciada por la composición de la solución nutritiva utilizada, señalando que una solución menos equilibrada resulta en hojas más cortas. Rosit *et al.* (2015) menciona que el ancho de hoja en lechuga varía notablemente según el tratamiento aplicado. Las plantas tratadas con una mezcla casera mostraron un ancho de hoja hasta un 24% mayor en comparación con aquellas tratadas con agua de coco y aminoácidos orgánicos comerciales. Este incremento en el ancho de hoja sugiere que ciertas combinaciones de nutrientes pueden promover una expansión foliar más efectiva en sistemas hidropónicos.

Cuadro 5. Medias de largo y ancho de hojas en tres variedades de lechuga.

Tratamientos	08/04/2024		22/04/2024		11/05/2024		29/05/2024	
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)
T1. Blanes	25.83 a	16.49 a	31.10 a	22.1 a	133.50 a	98.98 a	153.68 a	111.06 a
T2. Ruby S.	24.29 a	15.58 a	27.57 a	18.66 a	94.95 b	82 a	128.83 b	101.15 a
T3. Cirkuz	19.84 a	13.92 a	23.68 a	16.74 a	86.14 b	50.42 b	83.28 c	48.95 b
C.V	49.94	48.11	49.01	49.99	33.22	34.21	26.49	28.68
DMSH	8.87	5.62	10.25	7.3	26.55	20.11	24.61	19.03

Medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación.

6.3 Peso fresco y seco

El peso en fresco y seco mostró variaciones significativas entre las tres variedades de lechuga evaluadas ($P \leq 0.05$). La variedad Blanes presentó el mayor peso fresco con un promedio de 31 g, superando estadísticamente a las demás variedades. En contraste, la variedad Cirkuz obtuvo el menor valor, con 13.25 g. La variedad Ruby Sky se ubicó en un nivel intermedio con 18 g de peso fresco. En cuanto al peso seco, Blanes también destacó con 1.93 g, mostrando diferencias significativas respecto a Cirkuz, que tuvo el menor peso seco (0.89 g). La variedad Ruby Sky presentó un valor de 1.17 g, sin diferencias significativas respecto a Blanes según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Estos resultados indican que la variedad Blanes logró tanto el mayor peso en fresco como en seco, lo que sugiere un mejor desarrollo general en comparación con las otras variedades (Cuadro 6).

Chowdhury *et al.* (2024) reporta peso fresco de lechuga de 30g a 90g, y peso seco de lechuga de 1.5g a 3.5g, por efecto del sistema hidropónico utilizado. Sapkota *et al.* (2019) observó que las diferencias de peso fresco de lechugas cultivadas hidropónicamente están influenciadas por concentraciones de nutrientes, particularmente N, Ca y K, que son críticos para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Cuadro 6. Medias de peso en fresco y seco en tres variedades de lechuga.

Tratamientos	Variedad	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
T1	Blanes	31 a	1.93 a
T2	Ruby Sky	18 b	1.17 ba
T3	Cirkuz	13.25 b	0.89 b
C.V		39.36	53.34
DMSH		10.42	0.9

Medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación.

6.4 Contenido de agua

El contenido de agua no mostró diferencias significativas entre las variedades de lechuga evaluadas ($P \leq 0.05$). (Cuadro 7). Según Yang *et al.* (2024), el diseño del sistema hidropónico influye en la captación de agua, con sistemas como NFT que presentan un mayor consumo de agua debido a la transpiración y evapotranspiración aumentadas.

Cuadro 7. Contenido de agua en tres variedades de lechuga

Tratamientos	Variedad	Contenido de agua (%)
T1	Blanes	93.34 a
T2	Ruby Sky	70.03 a
T3	Cirkuz	93.98 a
C.V		26.4
DMSH		28.9

Medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación.

6.5 Humedad relativa y temperatura

A lo largo de los días evaluados, se observaron fluctuaciones significativas tanto en la temperatura como en la humedad relativa. La temperatura promedio diaria varió entre 19.75°C y 39.17°C, con picos más altos en días específicos como el día 9. Thakulla *et al.* (2021) señala que la temperatura es un factor ambiental clave que afecta los procesos fotosintéticos de la lechuga y que temperaturas elevadas podrían reducir la absorción de agua y nutrientes.

La humedad relativa mostró una tendencia a la baja en varios días, con valores que oscilaron entre 33.88% y 72.60 %, presentando algunos días de humedad muy baja como el día 11 y otros con valores más altos como el día 18. Estos resultados sugieren un comportamiento diferente en ambas variables (Figura 5). Yang *et al.* (2024) en su trabajo de crecimiento y concentración fitoquímica en lechuga en sistema hidropónico reporta porcentajes de humedad relativa desde 72.1% a 81.7% en su entorno de crecimiento con luz integral diaria.

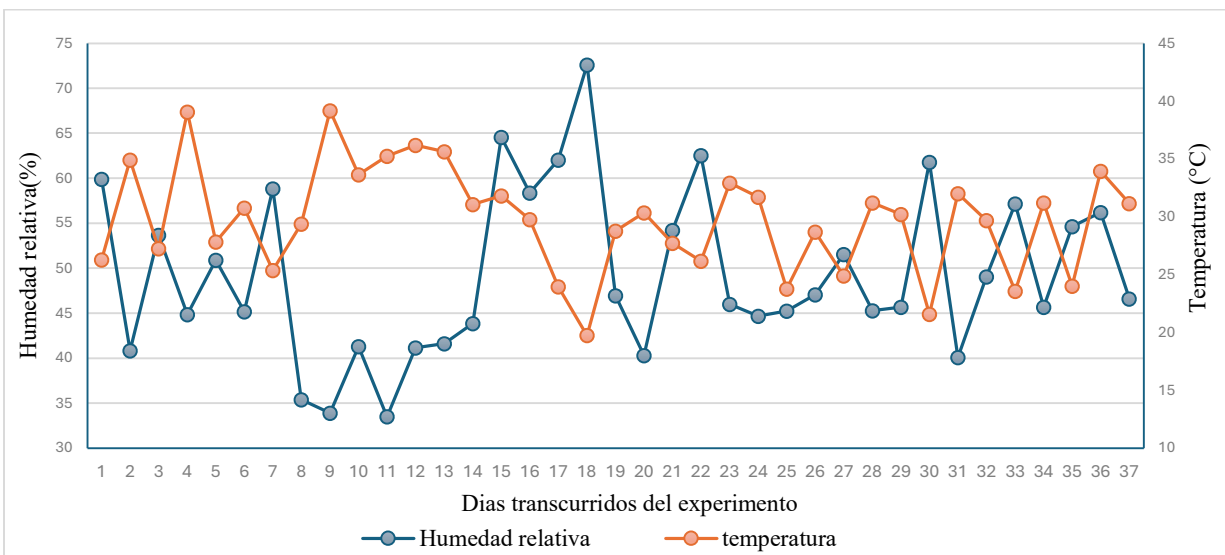


Figura 3. Tendencia de la humedad relativa y temperatura en fluctuación diaria

6.6 Niveles de CO₂

A lo largo de los días evaluados, se observaron fluctuaciones significativas en los niveles de CO₂. El promedio diario de CO₂ varió entre 107.32 ppm y 432.51 ppm, con picos más

altos en días específicos como el día 23. Estos resultados sugieren un comportamiento variable en los niveles de CO₂ a lo largo del periodo evaluado (Figura 6). Singh *et al.* (2020) destaca la importancia del CO₂ como la variable climática más significativa en la producción de invernadero, esto debido a que tiene un impacto directo en la asimilación fotosintética y en consecuencia el crecimiento del cultivo e indica que niveles más altos mejoran significativamente el rendimiento.

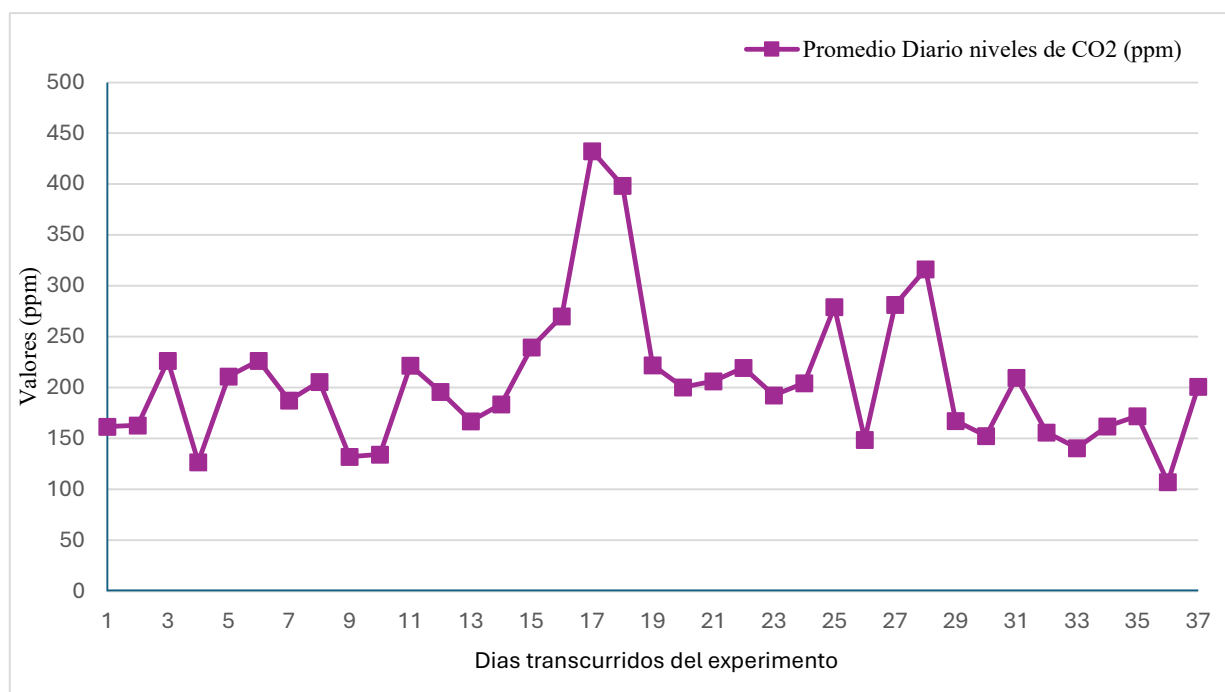


Figura 4. Comportamiento diario de los niveles de CO₂

6.7 pH y Conductividad eléctrica en la solución nutritiva

Singh y Bruce (2016) menciona que tanto el pH como la conductividad eléctrica son fundamentales para la hidroponía, ya que afectan directamente la disponibilidad y absorción de nutrientes, recomendando rangos de pH de 5.5 a 6.5 y de conductividad eléctrica de 1200 a 2400 $\mu\text{S/cm}$. La conductividad eléctrica y el pH variaron a lo largo de las semanas. En la semana 1, la CE fue de 1240 $\mu\text{S/cm}$ y el pH de 6.8. En la semana 4, la CE alcanzó 1632 $\mu\text{S/cm}$ mientras que el pH se mantuvo en 6.7. En la semana 7, la CE alcanzó su valor más alto con 2604 $\mu\text{S/cm}$ y el pH aumentó a 7.3, superando los valores recomendados para esa etapa. En la última medición, la CE disminuyó a 2302 $\mu\text{S/cm}$ y el pH bajó a 7.0. (Figura 7).

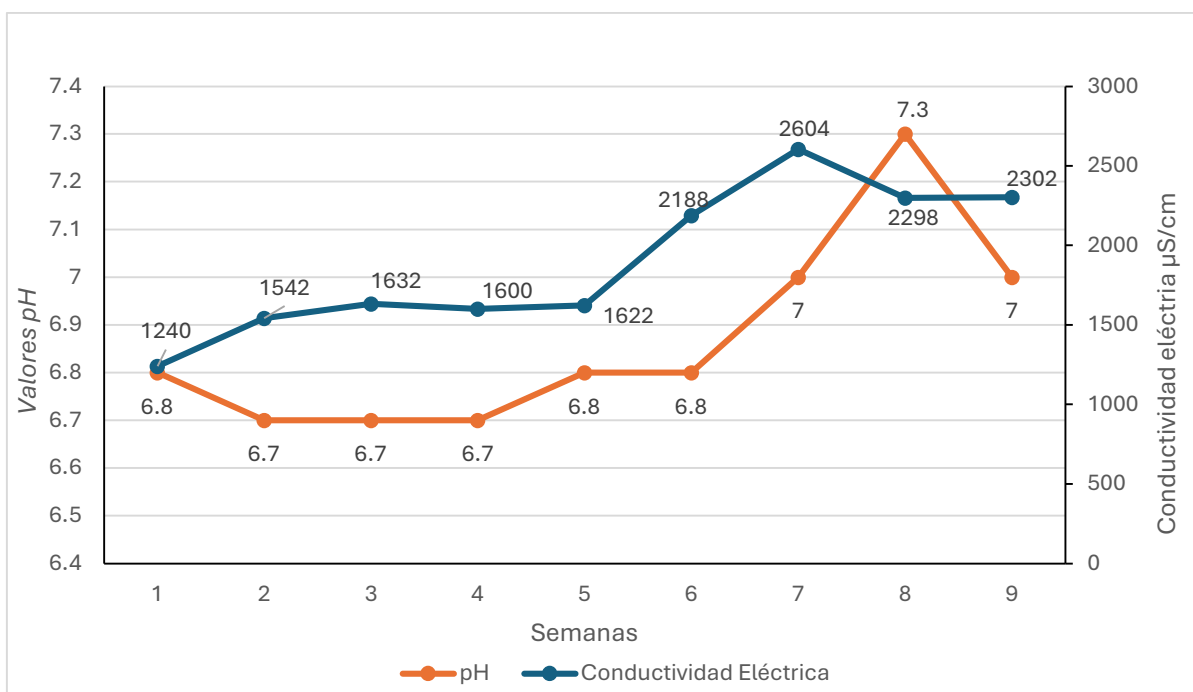


Figura 5. Diferencias de los valores de pH y conductividad eléctrica.

6.8 Contenido de nutrientes

En el análisis del contenido de calcio (Ca), hierro (Fe), potasio (K), magnesio (Mg) y fósforo (P) en las variedades Blanes, Ruby Sky y Cirkuz no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($P > 0.05$), lo que sugiere que, bajo las condiciones experimentales, el sistema hidropónico empleado mantiene perfiles nutricionales consistentes entre las variedades (Cuadro 8). Al contrario de lo obtenido por Chowdhury *et al.* (2024), donde mencionan que el contenido nutrimental en las hojas de lechuga puede variar según la fecha de evaluación y el sistema hidropónico utilizado.

Al comparar estos resultados con los valores óptimos de nutrientes en hojas de lechuga reportados por Henry *et al.* (2018) (N: 3.75%-5.60%, P: 0.45%-0.77%, K: 3%-6.5%, Ca: 1.25%-2.50%, Mg: 0.45%-0.78%, Fe: 0.005%-0.015%), observamos que los niveles de Ca (0.2067%-0.270%), K (0.680%-0.7833%), Mg (0.100%-0.1267%) y P (0.2567%-0.270%) en nuestras muestras están por debajo de estos rangos óptimos, lo cual podría indicar una limitación en el suministro de nutrientes o una variabilidad en la absorción nutrimental bajo

nuestras condiciones de cultivo. Siendo nitrógeno con (3.63%-5.76%) y Fe (0.0193%-0.0383%) los únicos nutrientes en estar en el rango sugerido.

Cuadro 8. Contenido de nutrientes en tres variedades de lechuga.

Nutrientes	Ca (%)	Fe (%)	K (%)	Mg (%)	P (%)
T1. Blanes	0.270 a	0.0383 a	0.7733 a	0.1267 a	0.2567 a
T2. Ruby S.	0.2233 a	0.0203 a	0.6800 a	0.1000 a	0.2600 a
T3. Cirkuz	0.2067 a	0.0193 a	0.7833 a	0.1033 a	0.2700 a
C.V	17.96	49.5	19.8	23.28	22.92
DMSH	0.105	0.0322	0.3698	0.0641	0.1505

Medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación.

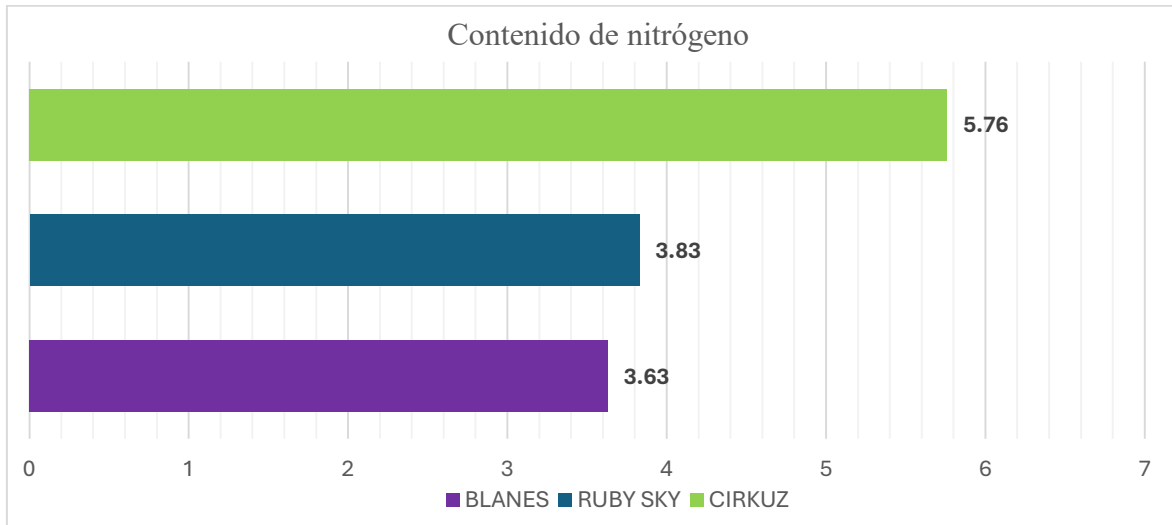


Figura 6. Contenido de nitrógeno en tres variedades de lechuga: Blanes, Ruby Sky y Cirkuz.

VII. CONCLUSIÓN

El prototipo de jardinería vertical hidropónico basado en Arduino fue diseñado e implementado satisfactoriamente, logrando un sistema funcional que integra la tecnología IoT para monitorear de forma remota parámetros clave como temperatura, humedad relativa y CO₂. Sin embargo, la eficacia en términos de crecimiento y calidad del cultivo no fue la esperada, debido principalmente a la precisión en el suministro de la solución nutritiva lo que afectó el rendimiento general en las tres variedades de lechuga.

La variedad Blanes mostró un desarrollo superior en términos de número y tamaño de hojas, así como en peso fresco y seco, destacándose en comparación con Ruby Sky y Cirkuz, no obstante, el bajo contenido de nutrientes en todas las variedades y el rendimiento más limitado en Ruby Sky y Cirkuz indican que el prototipo no fue óptimo en la producción de manera consistente en todas las variedades.

El experimento enfrentó desafíos desde la construcción del prototipo hasta la producción del cultivo, sin embargo, presenta una base sólida y adaptable para desarrollo futuro. Con ajustes adicionales en el control y manejo de parámetros, tiene potencial para ser más eficiente y contribuir a la innovación en producción de alimentos en sistemas verticales inteligentes.

VIII. LITERATURA CITADA

- Agrilyst 2017. State of Indoor Farming. En línea: <https://www.bayer.com/sites/default/files/stateofindoorfarming-report-2017.pdf>
Consultado: 13/06/24.
- Alzate J. y Loaiza L. 2008. Monografía del cultivo de la lechuga. En inteligencia en agroproducción. Colinagro. Bogotá, Colombia. pp 2-4.
- Atlas Scientific. 2024. Unearthing The Benefits of Hydroponics. En línea: <https://atlas-scientific.com/blog/benefits-of-hydroponics/> Consultado: 09/06/2024.
- Caughill P. 2018. Urban farming will bring food to city-dwellers who need it most. En línea: <https://futurism.com/urban-farming-future-agriculture>. Consultado: 15/03/24.
- Changmai T.; Sethavidh G.; Pariyanuj C.; 2018. Smart Hydroponic Lettuce Farm using Internet of Things. Department of Computer Science 10(3) 231-236.
- Chavan M. S.; Patil V. P.; Chavan S.; Sana S.; Shinde C. 2018. Design and implementation of IoT-based real-time monitoring system for aquaculture using Raspberry Pi. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. (6)3. En línea: <https://ijritcc.org/index.php/ijritcc/article/view/1477>. Consultado: 10/03/24.
- Chowdhury M.; Samarakoon U. C.; & Altland J. E. 2024. Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production in controlled environment. Frontiers in Plant Science, 15(07). En línea: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1401089>. Consultado: 16/04/24.
- Fischer N. 2018. The History of Lettuce. En línea: <https://www.motherearthgardener.com/plant-profiles/the-history-of-lettuce-zm0z18szphe/>. Consultado: 14/01/24.
- Frasetya B.; Taofik A.; Sholehah M. 2021. The effect of hydroponics systems on the growth of lettuce. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 6 p. En línea: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/4/042115>. Consultado: 23/11/2024.

Google Earth. (s.f). DICA, Prol. de la 14 Sur, Cd Universitaria, Cdad. Universitaria, 72592 Heroica Puebla de Zaragoza, Pue. En línea: <https://earth.google.com/web/search/DICA,+Prolongaci%C3%B3n+de+la+14+Sur,+Ciudad+Universitaria,+Cdad.+Universitaria,+Heroica+Puebla+de+Zaragoza,+Pue./@19.005724,-98.20515169,2122.23031049a,793.98422289d,35y,359.99999991h,0t,0r/> Consultado: 18/09/24.

Granval N.; Graviola C. 1991. Manual de producción de semillas hortícolas. En línea: <https://www.uv.mx/hab/files/2021/12/produccion-de-semillas-horticolos.pdf> Consultado: 23/04/24.

Henry J.; Whipker E. B.; Owen W. G.; Currey C. 2018. Nutritional Monitoring Series Lettuce (*Lactuca sativa*). E-GRO, 7p. En línea: <https://hortamericas.com/wp-content/uploads/2018/04/e-gro-Nutritional-Factsheet-Lettuce.pdf>. Consultado: 06/06/23.

Hussain A.; Hammad M.; Hafeez K.; Zainab T. 2016. Programming a Microcontroller. International Journal of Computer Applications 155 (1). En línea: https://www.researchgate.net/publication/311669390_Programming_a_Microcontroller. Consultado: 13/10/23.

INFOAGRO. 2020. El Cultivo de lechuga. En línea: <https://www.infoagro.com/hortalizas/lechuga.htm> Consultado: 09/04/ 2020.

Infocampo. 2024. Hidroponía: Guía práctica para crear tu propio sistema de raíz flotante en tu hogar. En Línea: <https://www.infocampo.com.ar/hidroponia-guia-practica-para-crear-tu-propio-sistema-de-raiz-flotante-en-tu-hogar/>. Consultado: 04/11/2024.

Kaiser C.; Ernst M. 2016. Hydroponic Lettuce. Center for Crop Diversification, University of Kentucky College of Agriculture, Food and Environment. En línea: <https://www.uky.edu/ccd/sites/www.uky.edu.ccd/files/hydrolettuce.pdf> Consultado: 27/10/2024.

- Kondaveeti H. K.; Kumaravelu N. K.; Vanambathina S. D.; Mathe S. E.; Vappangi, S. 2021. A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. *Computer Science Review* 40: 100364.
- Leiva E, S. T.; Román P, A.; Vilca V, N. C.; Neri Ch, J. C. 2018. Comportamiento productivo de 11 variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en sistema hidropónico NFT recirculante (Chachapoyas – Amazonas). *INDES. Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable* 1(2): 29–36.
- Montaño-Blacio M.; González-Escarabay J.; & Jiménez-Sarango Ó. 2023. Diseño y despliegue de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología* (30): 9-18
- Namgyel T.; Siyang S.; Khunarak C.; Pobkurt T.; Norbu J.; Chaiyasit T. 2018. IoT based hydroponic system with supplementary LED light for smart home farming of lettuce. 15th International conference on electrical engineering/electronics, computer, telecommunications and information technology (ECTI-CON). Chiang Rai, Thailand. pp: 221-224.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2022. A Novel Approach to Growing Gardens in Space. NASA Science Editorial Team. En línea: <https://science.nasa.gov/science-research/science-enabling-technology/technology-highlights/a-novel-approach-to-growing-gardens-in-space/#h-project-lead>. Consultado: 11/11/2024.
- Nitu O. A.; Ivan E. Ş.; Tronac A. S.; Arshad A. 2024. Optimizing lettuce growth in nutrient film technique hydroponics: Evaluating the impact of elevated oxygen concentrations in the root zone under LED illumination. *Agronomy*, 14(9). En línea: <https://doi.org/10.3390/agronomy14091896>. Consultado: 14/10/23.
- NU (Naciones Unidas). 2015. 17 Objetivos para Transformar el Mundo. En línea: <https://www.un.org/es/exhibits/17-objetivos-para-transformar-el-mundo>. Consultado: 19/11/23.

- Reddy K. J.; Ghada S.; Rajat M.; Saikanth D. 2023. Future of hydroponics in sustainable agriculture. *Scripown Publications* 1(7): 108.
- Rosit J. F.; Pascual P. R. L.; Rio J.; Sacamay M. B.; Alferez R.; Camomot L. 2015. Potentials of home-made concoction as nutrient solution in a modified hydroponic system. *JPAIR Multidisciplinary Research* 22(1). En línea: <https://doi.org/10.7719/jpair.v22i1.337>. Consultado: 29/05/24.
- Saavedra Del R. G.; Corradini S. F.; Antúnez B. A.; Felmer E. S., Estay P. P., Sepúlveda R., P. 2017. Manual de Producción de Lechuga. Boletín INIA - INDAP, No.374. En línea: <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/c3ac6f98-7340-431f-8459-bbbfcbe21b95/content> Consultado: 21/09/2024.
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2019. Conozcamos un poco más de la lechuga. En línea: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/conozcamos-un-poco-mas-sobre-lalechuga?idiom=es#:~:text=Alrededor%20del%20mundo%20existen%20una,variedades%20Baby%20leaf%20y%20Escarola>. Consultado: 31/01/24.
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2021a. Al alza producción y exportación de lechuga mexicana. En línea: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/al-alza-produccion-y-exportacion-de-lechuga-mexicana?idiom=es> . Consultado: 15/12/23.
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2021. Manuales prácticos para la elaboración de bioinsumos, capítulo 6 solución steiner. (1). 28p. En línea: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737326/7_Solucio_n_Steiner.pdf. Consultado: 03/09/23
- Sagar L. K.; & Gupta R. 2024. Improving agricultural productivity through IoT-based hydroponic systems: Literature review & prototype study. *Research Square*. En línea: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3889989/v1> Consultado: 28/10/2024.

- Sandoya G. V.; Bosques J.; Rivera F.; Campoverde E. V. 2021. Growing Lettuce in Small Hydroponic Systems. Horticultural Sciences Department. En línea: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS1422> Consultado 08/07/2024.
- Sapkota, S., Sapkota, S., & Liu, Z. 2019. Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae*, 5(4), 72.
- Singh H.; Poudel M. R.; Dunn B. L.; Fontanier C.; Kakani, G. 2020. Effect of greenhouse CO₂ supplementation on yield and mineral element concentrations of leafy greens grown using nutrient film technique. *Agronomy*, 10(3), 323.
- Singh H.; Bruce D. 2016. Electrical conductivity and pH guide for hydroponics (HLA-6722). Oklahoma Cooperative Extension Service, Division of Agricultural Sciences and Natural Resources, Oklahoma State University. En línea: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/print-publications/hla/electrical-conductivity-and-ph-guide-for-hydroponics-hla-6722.pdf>. Consultado: 01/11/24.
- Sivaji C.; Ramachandran M.; Vidhya P.; Sonya S.; Sowmiya S. 2022. Application of Arduino devices in various IOT Application. *Renewable and Nonrenewable Energy* 1(1): 40-41.
- Tabaglio V.; Gavazzi C.; Bertora C.; Sacco D.; Grignani C. 2020. Intermittent Nutrient Solution Reduction Strategy to Improve Yield and Quality of Soilless Cultivated Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Agronomy* 10(8): 1208.
- Tang C. 2019. El valor ambiental y social de la agricultura vertical. En línea: <https://blogs.anderson.ucla.edu/global-supply-chain/2019/08/the-environmental-and-social-value-of-vertical-farming.html>. Consultado: 14/04/24.
- Thakulla D.; Dunn B.; Hu B.; Goad C.; Maness, N. 2021. Nutrient solution temperature affects growth and °Brix parameters of seventeen lettuce cultivars grown in an NFT hydroponic system. *Horticulturae* 7(9): 321.

- USDA (U.S. Department of Agriculture). 2006. Classification for Kingdom Plantae Down to Genus *Lactuca* L. Natural Resources Conservation. En línea: <https://plants.usda.gov/classification/37081> Consultado: 18/04/24.
- Valadez A. 1998. Producción de hortalizas. Limusa. México. 298 p.
- Watson M. 2024. The ultimate guide to lettuce and salad green varieties. En línea: <https://www.thespruceeats.com/varieties-of-lettuce-4065606>. Consultado: 21/02/24.
- Yang T.; Samarakoon U.; Altland J. 2024. Growth, phytochemical concentration, nutrient uptake, and water consumption of butterhead lettuce in response to hydroponic system design and growing season. *Scientia Horticulturae* 332: 113201.
- Zhao C. W.; Jegatheesan J.; Loon S. C. 2015. Exploring IoT application using Raspberry Pi. *International Journal of Computer Networks and Applications* (2)1: 27–34
- Zhang X.; Dong X.; He G.; Niu Z.; Yan J. S. 2018. Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering* 11(2): 39.

IX. ANEXOS



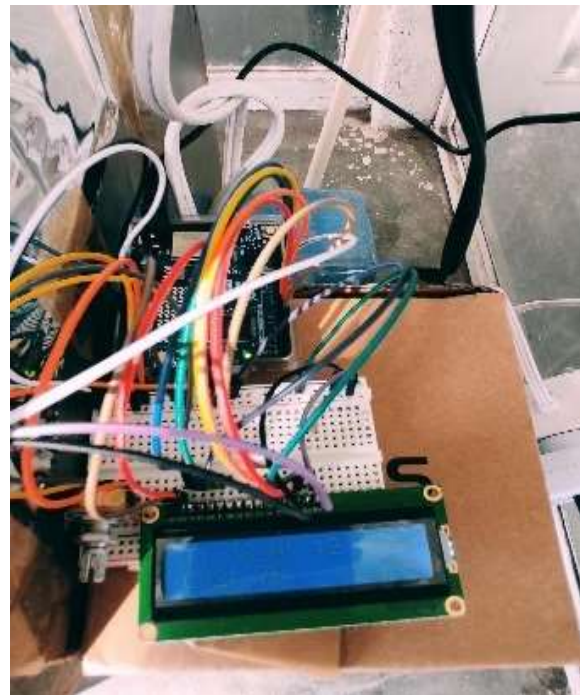
Anexo 1. Transferencia de planta al prototipo



Anexo 2. Construcción e integración del prototipo



Anexo 3. Iluminación LED dentro del prototipo



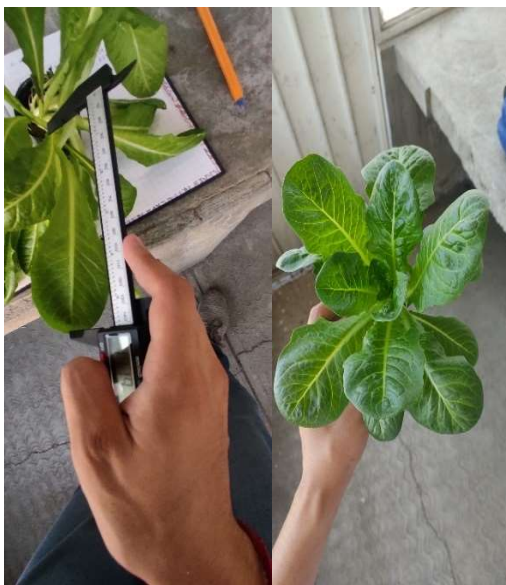
Anexo 4. Arduino y Sensores



Anexo 5. App Arduino Cloud



Anexo 6. Monitoreo de conductividad eléctrica



Anexo 7. Medición de largo, ancho y conteo de hojas



Anexo 8. Titulación para determinar nitrógeno.



BUAP.

Oficio No. FCAyP/833/2024

Jared Jesús Antonio Puon Aguilar
Egresado de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
PRESENTE

Con base en el dictamen emitido por el M.C. Guillermo Jesuita Pérez Marroquín (**Director de Tesis**), Dr. Raúl Berdeja Arbeu (**Asesor**), Dr. Fabián Enríquez García (**Asesor**) y Dr. José Víctor Tamariz Flores (**Asesor**) en su calidad de Consejo Particular, se autoriza la elaboración digital de la tesis titulada:

Cultivo de lechuga en prototipo de jardinería vertical controlada con Arduino.

Correspondiente a la Licenciatura en Ingeniería Agrohidráulica.

Sin otro particular por el momento me despido de Usted.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

San Juan Acateno, Teziutlán, Pue., a 27 de Noviembre de 2024.

Dr. Armando Ibáñez Martínez

Director de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias



c.c.p. - Archivo y Minutario
Dr. AIM/mlsm