

## ARTÍCULO

# DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LÁMPARA DE LUCES LED PARA SISTEMA HIDROPÓNICO INDOOR PARA LA PRODUCCIÓN DE LECHUGAS EN EL BUS HIDROPÓNICO DE LA UNIVERSIDAD UTEPSA

*Development and Implementation of an LED Light Lamp for an Indoor Hydroponic System for Lettuce Production in the Hydroponic Bus at UTEPSA University*

Por:

**Jonny Aguilera Cernades**

**Centro de Investigación UTEPSA**

Ingeniería Mecánica Automotriz y Agroindustrial

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9558-4662>

[jonnyaguilera1170@gmail.com](mailto:jonnyaguilera1170@gmail.com)

**Simar Luis del Villar Leyva**

**Centro de Investigación UTEPSA**

Ingeniería Mecánica Automotriz y Agroindustrial

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3163-5760>

[s.l.delvillarleyva@gmail.com](mailto:s.l.delvillarleyva@gmail.com)

## RESUMEN

**E**sta investigación surgió ante la necesidad de crear un prototipo de sistema hidropónico indoor para satisfacer la creciente demanda de productos naturales que puedan cultivarse en espacios cerrados y con poca luz natural. La principal finalidad fue desarrollar una lámpara con luces LED que cumpla las mismas funciones que las disponibles en el mercado extranjero, pero a un costo menor. Durante el proceso, se comprobó la eficacia del

sistema, logrando un crecimiento saludable de las plantas. Sin embargo, las primeras pruebas revelaron un crecimiento anormal del tallo en las lechugas, lo que afectó su presentación comercial. Para corregir este problema, se ajustó el espectro lumínico de las luces LED, optimizando el crecimiento y mejorando la calidad del producto final, haciéndolo más atractivo para los consumidores. Además, se utilizó una solución nutritiva equilibrada, proporcionando los nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, garantizando un desarrollo vigoroso.

El control de enfermedades se logró mediante la manipulación del ambiente, minimizando la necesidad de pesticidas químicos. Este enfoque integral permitió corregir los problemas iniciales, maximizar la producción en un entorno controlado y demostrar la viabilidad y eficiencia de los sistemas hidropónicos indoor, especialmente en entornos urbanos o regiones con condiciones climáticas adversas. Para obtener los resultados, se realizó un proceso experimental tomando como población 30 lechugas de las variedades Crespa Isabela y Mantecosa Flandria, para el crecimiento se utilizaron luces led en 3 tipos de distribuciones de color, denominados primer, segundo y tercer testigo, con las siguientes características técnicas: 18 watts, AC 160-265 V, 50-60 Hz, además del apoyo de un sistema hidráulico de bombeo mediante un bomba del agua con nutrientes de 0.5 HP y un sistema de A/C de 12.000 BTU.

**PALABRAS CLAVE:** *Hidroponía, Luces Led, Nutrientes.*

## ABSTRACT

This research originated from the need to create an indoor hydroponic system prototype to meet the growing demand for natural products that can be cultivated in enclosed spaces with limited natural light. The primary goal was to develop an LED light lamp that performs the same functions as those available on the foreign market, but at a lower cost. During the process, the system's effectiveness was demonstrated, achieving healthy plant growth. However, initial tests revealed abnormal stem growth in the lettuce, affecting its commercial appearance. To address this issue, the LED light spectrum was adjusted, optimizing

growth and improving the final product's quality, making it more appealing to consumers. Additionally, a balanced nutrient solution was used, providing essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium, ensuring vigorous development. Disease control was achieved through environmental manipulation, minimizing the need for chemical pesticides. This comprehensive approach allowed for the correction of initial problems, maximizing production in a controlled environment, and demonstrating the viability and efficiency of indoor hydroponic systems, particularly in urban settings or regions with adverse climatic conditions. To obtain the results, an experimental process was carried out using a population of 30 lettuce plants from the Crespa Isabela and Mantecosa Flandria varieties. For their growth, LED lights were applied under three different color distribution treatments, referred to as first, second, and third control groups, with the following technical specifications: 18 watts, AC 160–265 V, 50–60 Hz. In addition, the system was supported by a hydraulic pumping system with a 0.5 HP water pump supplying nutrients, and an air conditioning system of 12,000 BTU.

**KEYWORDS:** *Hydroponics, Led Lights, Nutrients.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La hidroponía es un método innovador de cultivo que prescinde del uso de suelo, empleando soluciones nutritivas minerales para proporcionar los elementos esenciales directamente a las raíces de las plantas. Este enfoque presenta múltiples ventajas, entre las cuales se destacan una mayor eficiencia en el uso del agua y los nutrientes, y un control preciso sobre las condiciones de crecimiento, lo que puede resultar en una producción más rápida y uniforme (Resh, 2013). Los sistemas hidropónicos se pueden clasificar en varias categorías, como el cultivo en agua (Raíz flotante), el sistema de película nutritiva (NFT), y los sistemas de sustratos inertes, incluyendo lana de roca, perlita y vermiculita (Jones, 2016).

El sistema de película nutritiva (NFT) es una técnica de cultivo hidropónico que se caracteriza por hacer circular una

una fina capa de solución nutritiva a través de un canal o tubería por donde las plantas crecen. En el sistema NFT, las raíces de las plantas están en contacto continuo con la solución nutritiva, lo que permite una absorción eficiente de nutrientes y oxígeno. La solución nutritiva fluye de manera constante, proporcionando a las plantas todos los elementos esenciales y manteniendo un equilibrio óptimo para el crecimiento (Jones, 2016). Este sistema tiene la ventaja de un bajo consumo de agua y nutrientes, ya que la solución circula continuamente y se recicla en el sistema, reduciendo el desperdicio (Resh, 2013). Además, este sistema permite un crecimiento rápido y uniforme de las plantas debido a la constante disponibilidad de nutrientes y a la excelente oxigenación de las raíces (Massa et al., 2008).

La hidroponía indoor se refiere al cultivo de plantas en un entorno cerrado y controlado, donde las condiciones de luz, temperatura y humedad son reguladas artificialmente para optimizar el crecimiento. Este tipo de cultivo es especialmente beneficioso en áreas urbanas o regiones con condiciones climáticas adversas, permitiendo la producción continua de alimentos durante todo el año, independientemente del clima exterior (Gruda, 2019). La iluminación artificial, como las luces LED, desempeña un papel crucial en este tipo de cultivo, ya que simula la luz solar necesaria para la fotosíntesis y permite un crecimiento vegetal óptimo. Para maximizar el crecimiento de las plantas, las luces LED deben emitir ciertos colores de luz a longitudes de onda específicas. La luz azul (400-500 nm) es esencial para el desarrollo vegetativo, promoviendo un crecimiento compacto y saludable (Massa et al., 2008). La luz roja (600-700 nm) es crucial para la floración y el desarrollo de frutos, y es particularmente importante durante la fase de floración para obtener una producción óptima (Goins et al., 1997).

La intensidad de la luz también es importante; las plantas generalmente requieren entre 200 y 400 micromoles de luz por metro cuadrado por segundo ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) para un crecimiento efectivo, y la cantidad de lúmenes necesaria puede variar dependiendo de la etapa de crecimiento y el tipo de planta (Nelson, 2018).

En Santa Cruz, Bolivia, se ha observado un incremento significativo en la adopción de sistemas hidropónicos. Este aumento ha sido documentado en medios locales, como el periódico El Deber, que destaca cómo la población está cada vez más interesada en productos agrícolas cultivados bajo condiciones controladas, debido a la percepción de estos productos como más saludables y sostenibles. Ante esta creciente demanda, la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz y Agroindustrial de la universidad UTEPSA ha instalado un sistema hidropónico indoor dentro de un bus ubicado en su campus, con el fin de realizar pruebas y replicar la calidad de luz de las lámparas del mercado extranjero, pero utilizando materiales locales para disminuir el costo, además de ser armadas por los propios estudiantes de la carrera.

El interés por la hidroponía en Santa Cruz refleja una tendencia hacia prácticas agrícolas más limpias y eficientes, respondiendo a desafíos como la calidad del suelo y la seguridad alimentaria (El Deber, 2017).

La creciente aceptación de estos sistemas subraya un cambio hacia métodos de cultivo más sostenibles y adaptados a las necesidades de las zonas urbanas en expansión. De acuerdo a lo comentado, la finalidad de este trabajo es lograr producir lechugas con las mismas características ofrecidas en el mercado, pero producidas en el bus de la universidad UTEPSA, mediante la técnica Indoor con las lámparas elaboradas por los estudiantes de la carrera.

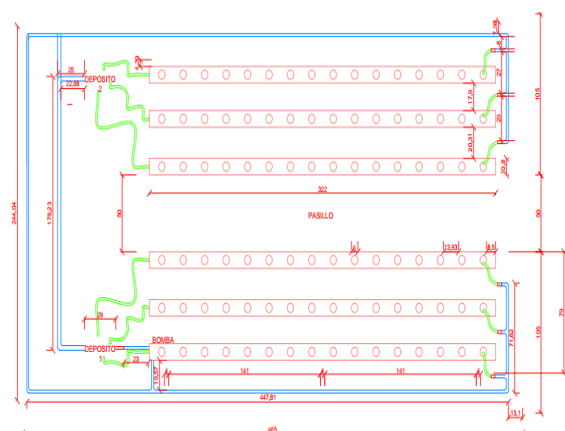
**Imagen 1:** Bus hidropónico de Utepsa

## MATERIALES Y MÉTODOS

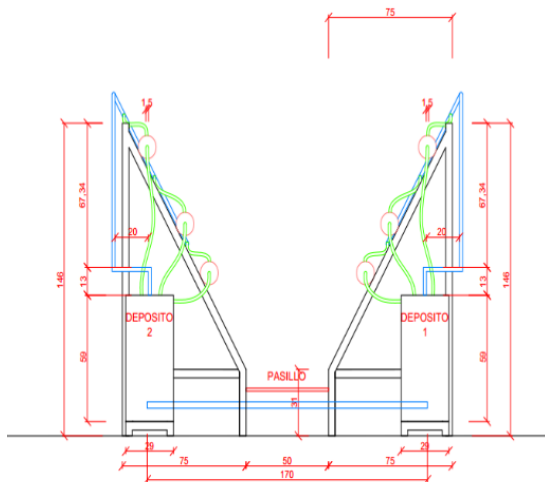
El experimento se llevó a cabo en un sistema hidropónico indoor, diseñado específicamente para el cultivo de lechugas (*Lactuca sativa*). Se utilizaron dos variedades de lechuga en la experimentación: Crespa Isabela y Mantecosa Flandria. La lechuga Crespa Isabela es una variedad de hojas rizadas, caracterizada por su textura crujiente y su color verde brillante. Sus hojas son de tamaño mediano a grande, con bordes ondulados que le dan una apariencia atractiva y voluminosa. Esta variedad es valorada por su sabor suave y fresco, siendo rica en vitaminas A y C, así como en antioxidantes (Bañón, Rodríguez-García, Díaz, & Molero, 2020). Por otro lado, la lechuga Mantecosa Flandria es una variedad de hoja ancha y textura mantecosa. Las hojas son suaves al tacto, de color verde claro, con un sabor ligeramente dulce y una consistencia tierna. Es conocida por su estructura compacta y su capacidad para mantener una textura delicada, siendo una excelente fuente de folato y fibra dietética, además de vitamina K (Clarkson et al., 2005).

Se utilizó una estructura metálica de angular para soportar los 6 tubos de PVC de 3" de diámetro, con una longitud de 322 cm cada uno, los cuales poseen orificios separados a 20 cm donde se colocan los canastillos que contienen las plantas junto con la esponja fenólica. Una bomba centrífuga de 0.5 HP es utilizada para impulsar el agua con nutrientes, y 2 depósitos de plástico, uno principal y uno secundario, son encargados de recibir el agua proveniente de los tubos para su posterior recirculación.

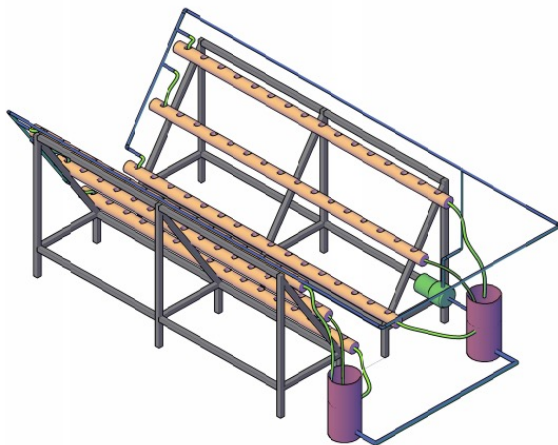
La cañería de PVC de 1/2" se utilizó en la línea de presión y mangueras de 1/2" en la línea de descarga, con cada tubo descargando de manera individual en los depósitos, con 3 tubos descargando en el depósito principal y los otros 3 en el depósito secundario. Se instaló un timer para automatizar el encendido y apagado de la bomba, programado para iniciar a las 08:00 hasta las 19:00 con intervalos de 30 minutos encendido y 60 minutos apagado. A continuación, se presentan algunos planos del sistema.

**Imagen 2:** Vista de planta del sistema hidropónico NFT del Bus de Utepsa

**Imagen 3:** Vista lateral del sistema hidropónico NFT del Bus de Utepsa



**Imagen 4:** Vista isométrica del sistema hidropónico NFT del Bus de Utepsa



En las primeras experimentaciones se utilizaron luces LED de color blanco o amarillo, pero el crecimiento de las lechugas fue insatisfactorio, con tallos anormales y hojas de tamaño reducido. Tras una investigación minuciosa, se determinó que los colores ideales para el crecimiento vegetativo eran rojo y azul. Se distribuyeron las luces para el

espectro del cultivo con tres configuraciones:

- **Primer testigo:** Cuatro luces LED cristal azul y una luz LED cristal roja.
- **Segundo testigo:** Cuatro luces LED ahumada azul y una luz LED ahumada roja.
- **Tercer testigo:** Cantidad y tipo de luces LED aleatorias.

**Imagen 5:** Primer testigo



**Imagen 6:** Segundo testigo



Imagen 7: Tercer testigo



El kit de nutrientes y las semillas se compraron del proveedor Hydroci, ubicado en la ciudad de Cochabamba, la presentación comercial del kit es suficiente para 1.000 litros de agua, están distribuidos en tres grupos: solución A, solución B y solución C.

La solución nutritiva contiene una mezcla de macro y micronutrientes, además de oligoelementos como hierro, manganeso, zinc y cobre. La solución se preparó y se monitoreó diariamente para mantener los niveles adecuados de pH (6.0) y conductividad eléctrica (2 mS/cm) (Resh, 2012).

Imagen 8: Kit hidropónico comercializado por Hydroci



En el siguiente cuadro se encuentra el detalle de componentes que posee el kit de nutrientes y también se hace referencia a la cantidad de cada uno de ellos expresados en unidades de gramos.

Tabla 1. Kit hidropónico preparado

| Ítem                   | Componente          | Porción (g) | Volumen (L) |
|------------------------|---------------------|-------------|-------------|
| Solución concentrada A |                     |             |             |
| 1                      | Nit One             | 103,00      | 5           |
| 2                      | Nitrato de potasio  | 353,00      |             |
| 3                      | Fosfato monoamónico | 150,00      |             |
| Solución concentrada B |                     |             |             |
| 1                      | Sulfato de Magnesio | 508,00      | 5           |
| 2                      | Micronutrientes     | 200,00 mL   |             |
| 3                      | Sulfato de potasio  | 210,00      |             |
| 4                      | Quelato de hierro   | 16,60       |             |
| Solución concentrada C |                     |             |             |
| 1                      | Nitrato de calcio   | 985,00      | 5           |

Se utilizó un sistema de refrigeración tipo Split de la marca IRT con una capacidad de 12.000 BTU. La temperatura interna se reguló a 20°C con un encendido manual a las 08:00 y apagado a las 19:00, manteniendo el sistema en funcionamiento durante todo el día. Los rangos recomendados de temperatura para el cultivo de lechugas en hidroponía indoor suelen estar entre 18°C y 22°C durante el día, y entre 15°C y 18°C durante la noche. Estas condiciones permiten un crecimiento óptimo y previenen el estrés térmico que puede afectar el desarrollo de las plantas (Savvas & Gruda, 2018).

Se implementó un diseño experimental que contempló varias cosechas, en todos los casos se trabajó con las mismas variedades de lechugas. Los tratamientos consistieron en diferentes configuraciones del espectro lumínico de las lámparas LED para evaluar su impacto en el crecimiento de las lechugas (Gruda, 2019).

Una vez cortada la esponja de germinación, se humedeció y se colocó sobre la bandeja de germinación. Se sembró una semilla por cada agujero de la esponja, dejándola en oscuridad durante 2 a 3 días. La solución nutritiva concentrada para 1.000 litros se preparó en tres galones de 5 litros cada uno para dosificar de manera igual en el tanque colector.

**Imagen 9:** Siembra y germinación de las lechugas



Las plántulas se llevaron a un lugar con luz indirecta y se alimentaron con solución nutritiva al 50%. Para lograr este porcentaje, se dosificó 30 ml de cada solución en un recipiente de 20 litros de agua, obteniendo una conductividad eléctrica de 1 mS/cm, que se mantuvo durante 3 a 4 semanas hasta que los plantines alcanzaron un buen tamaño. La solución nutritiva se aumentó progresivamente a medida que los plantines la consumían.

**Imagen 10:** Lechugas en crecimiento



Las lechugas se separaron y colocaron cuidadosamente en los vasitos hidropónicos sin manipular demasiado las raíces para trasplantarlas a los tubos de cultivo, manteniendo una distancia de 20 cm entre plantas para evitar interferencias en el crecimiento. Se prepararon los nutrientes al 100% dosificando 60 ml de cada solución nutritiva concentrada y 2,5 ml de ácido fosfórico en 20 litros de agua, obteniendo una conductividad eléctrica de 2 mS/cm y un pH de 6.

Estos parámetros se mantuvieron estables durante 3 a 4 semanas hasta la cosecha, realizándose la medición diaria de ambos parámetros con los instrumentos de medición necesarios, como se puede evidenciar en la siguiente imagen.

**Imagen 11:** Medición de la conductividad eléctrica y el PH



La cosecha de lechugas se realizó entre los 55 y 59 días desde la siembra de las semillas. Durante este período, se verificó el desarrollo final de las plantas, para asegurar que alcanzaran el tamaño y la calidad deseados. Se utilizaron tijeras de podar limpias y afiladas para cortar las lechugas a nivel de la esponja fenólica, evitando dañar las raíces o las plantas adyacentes. Las lechugas se recogieron en las primeras horas de la mañana, se lavaron con agua limpia, se desinfectaron y se secaron para realizar las mediciones del tamaño y peso de las plantas y posterior degustación.

**Imagen 12:** Proceso de cosecha de las lechugas.



Durante las primeras etapas de las experimentaciones, se observaron problemas significativos causados por enfermedades e insectos que afectaron el cultivo de lechugas. Entre los problemas más comunes en este tipo de cultivos, se tienen:

El moho es una enfermedad fúngica que puede causar manchas en las hojas y un crecimiento desordenado en las plantas. Es especialmente común en ambientes húmedos y mal ventilados (Jarvis, 1992).

Los pulgones son insectos que se alimentan de la savia de las plantas, debilitándolas y transmitiendo virus. Su presencia puede provocar deformaciones en las hojas y un crecimiento deficiente (Perring et al., 2015).

Los trips son pequeños insectos que también se alimentan de la savia de las plantas, causando manchas plateadas y deformaciones en las hojas. Son conocidos por ser difíciles de controlar y pueden transmitir enfermedades virales (Lewis, 1997).

El hongo *Pythium* es responsable de la pudrición de raíces en sistemas hidropónicos. Este patógeno puede afectar gravemente la salud de las plantas, provocando el marchitamiento y la muerte de las mismas (Agrios, 2005).

De la lista anterior, en las primeras experimentaciones, se tuvieron problemas especialmente con trips y con el hongo *Pythium*. Para controlar estos problemas, se selló completamente el ambiente y se prestó especial atención al control del ingreso y salida del personal. En las pruebas más recientes, estas medidas resultaron efectivas, y no se registraron más problemas con enfermedades o insectos.

De manera permanente, durante el crecimiento de las plantas, se realizó la medición de los parámetros de conductividad eléctrica y el PH de la solución nutritiva y la temperatura ambiente del interior del

bus. Durante la cosecha, se procedió a realizar la medición del resultado del crecimiento de las plantas (altura y peso fresco), la longitud del tallo, y se realizó un análisis visual para evaluar la calidad de la lechuga en términos de color, textura y presentación.

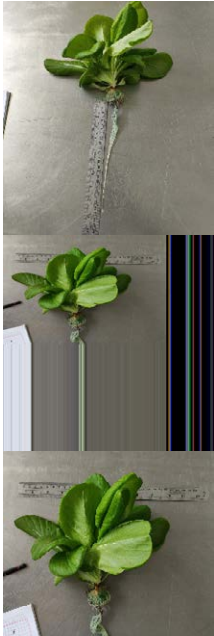
RESULTADOS

Durante el experimento, se observó que las 30 lechugas de ambas variedades, Crespa Isabela y Mantecosa Flandria, presentaron un crecimiento normal bajo las condiciones controladas del sistema hidropónico indoor. Se trabajó con focos LED de 18 watts, AC 160-265 V, 50-60 Hz, confirmando que los colores rojo y azul son los ideales para el crecimiento vegetativo de las plantas.

Las plantas expuestas a estas luces mostraron un desarrollo superior en comparación con aquellas bajo otros espectros lumínicos. En el momento de la cosecha, se realizaron diversas mediciones, incluyendo la longitud de la raíz, la longitud y el ancho de las hojas, así como la longitud y el ancho de la planta completa. Además, se contó la cantidad de hojas y se procedió al pesado de las plantas, permitiendo una evaluación exhaustiva del desarrollo vegetal bajo los diferentes tratamientos lumínicos y ambientales.

A continuación, se presenta el cuadro de resultados de dicha medición, se aclara que todos los valores mostrados son promedios:

Tabla 2. Resultados luego de la cosecha

| Variable                            | Led cristal<br>Primer testigo | Led ahumada<br>Segundo testigo | Aleatoria<br>Tercer testigo | Evidencia                                                                             |
|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Longitud de raíz (cm)               | 30                            | 30                             | 21                          |  |
| Longitud de la lechuga (largo) (cm) | 18                            | 18                             | 18                          |                                                                                       |
| Longitud de la lechuga (ancho) (cm) | 25                            | 25                             | 27                          |                                                                                       |

|                                  |    |    |                   |                                                                                     |
|----------------------------------|----|----|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Longitud de la hoja (largo) (cm) | 14 | 17 | 13 + 2.5 de tallo |  |
| Longitud de la hoja (ancho) (cm) | 9  | 10 | 7                 |  |
| Cantidad de hojas                | 24 | 27 | 21                |  |
| Peso (g)                         | 60 | 80 | 44                |  |

Posteriormente, se llevó a cabo una degustación en la que participaron estudiantes, docentes y autoridades de la universidad. En todos los casos, los participantes indicaron que el sabor, la textura y la presentación de las lechugas eran correctos, lo que respalda la calidad del producto final obtenido en el experimento. Esta degustación fue publicada en todas las RRSS de la universidad.

Imagen 13: Degustación de las lechugas



A continuación, se presenta el detalle de los costos del sistema hidropónico indoor, utilizado dentro del bus:

**Tabla 3.** Cuadro de costos del sistema hidropónico indoor

| Descripción                                   | Cantidad | Precio unitario (Bs) | Precio total (Bs) |
|-----------------------------------------------|----------|----------------------|-------------------|
| Cañería tigre ¾" PVC                          | 1        | 45,00                | 45,00             |
| Codo corto de 90 grados PVC                   | 5        | 5,00                 | 25,00             |
| Te ¾" PVC                                     | 3        | 7,00                 | 21,00             |
| Unión patente ¾" PVC                          | 1        | 10,00                | 10,00             |
| Válvula mariposa ¾ "PVC                       | 2        | 25,00                | 50,00             |
| Válvula de pie ¾ "                            | 1        | 87,00                | 87,00             |
| Bomba centrifuga 0.5HP Water Pump             | 1        | 487,00               | 487,00            |
| Válvula de compuerta abierta                  | 1        | 25,00                | 25,00             |
| Tubería plasmat 4"                            | 2        | 55,00                | 110,00            |
| Tapón de 4"                                   | 4        | 6,00                 | 24,00             |
| Aire acondicionado                            | 1        | 2.200,00             | 2.200,00          |
| Medidor de PH                                 | 1        | 850,00               | 850,00            |
| Medidor de CE                                 | 1        | 850,00               | 850,00            |
| Tubos LED                                     | 19       | 25,00                | 475,00            |
| Cable para luces LED tipo FRW-CS              | 1        | 90,00                | 50,00             |
| Soporte para luces LED de plancha galvanizada | 6        | 120,00               | 720,00            |
| Kit de nutrientes 1000 litros                 | 1        | 75,00                | 75,00             |
| Esponja de germinación 260pt                  | 1        | 12,00                | 12,00             |
| Bandejas de germinación roja                  | 1        | 35,00                | 35,00             |
| Ácido fosfórico 1k                            | 1        | 40,00                | 40,00             |
| Temporizador caja                             | 1        | 600,00               | 600,00            |
| Canastillos hidropónicos                      | 35       | 0,50                 | 17,50             |
| Lechuga mantecosa paletizada Flandria 300 u   | 1        | 50,00                | 50,00             |
| Lechuga crespa paletizada Isabela 300 u       | 1        | 18,00                | 18,00             |
|                                               |          | <b>Total</b>         | <b>6.876,50</b>   |

## DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio refuerzan la viabilidad de la hidroponía como una alternativa eficiente para la producción agrícola, particularmente en la región de Santa Cruz, donde las condiciones climáticas y la creciente demanda de alimentos saludables han impulsado la adopción de esta técnica. En el caso de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, el uso de la hidroponía indoor, se convierte en una buena alternativa de producción de alimentos, debido a la falta de espacio físico para el cultivo de este tipo de plantas, además de que una buena parte de la población vive en departamentos donde el acceso a la luz solar es una limitante. Comparado con otros métodos de cultivo convencionales, la hidroponía indoor demostró una mayor capacidad para optimizar el uso del espacio y los recursos, disminuyendo la necesidad de agua y suelo fértil.

El análisis de los diferentes sistemas de hidroponía reveló que las técnicas de flujo y reflujo, así como las de sistema de raíz flotante, tienen un impacto positivo en la tasa de crecimiento y rendimiento de las plantas. Sin embargo, uno de los desafíos encontrados fue la gestión precisa de los nutrientes y el control de las condiciones del ambiente interno, lo que sugiere la necesidad de estudios futuros para desarrollar mejores herramientas de control y dar el siguiente paso a la automatización del proceso.

Es importante destacar que, aunque la adopción de estos sistemas ha aumentado, el costo inicial sigue siendo un factor limitante para pequeños agricultores, además de la escasa capacitación que existe en este tipo de sistemas de cultivo, lo que podría retrasar su implementación a gran escala. A pesar de esto, las ventajas económicas y ecológicas a largo plazo hacen que la hidroponía sea una opción prometedora para el futuro de la agricultura en la región.

La investigación realizada demostró que la utilización de luces LED de colores rojo y azul favorece el crecimiento vegetativo de las lechugas, lo que coincide con estudios previos que señalan la importancia de estos espectros en el desarrollo de plantas (Gruda, 2019). De acuerdo a la Tabla 2, se obtuvieron mejores resultados de crecimiento con las luces LED ahumadas (segundo testigo), ya que las plantas presentaron mayor longitud y ancho de las hojas, también se evidencia mayor cantidad de hojas y un peso superior al de los otros 2 testigos de la prueba. Este hallazgo es significativo, ya que resalta la necesidad de optimizar el espectro de luz en sistemas hidropónicos indoor para maximizar el rendimiento.

El desempeño de las dos variedades de lechuga utilizadas, Crespa Isabela y Mantecosa Flandria, fue consistente en términos de crecimiento y calidad, confirmando que ambas variedades pueden adaptarse bien al sistema hidropónico propuesto.

Las diferencias en textura y sabor entre las dos variedades, señaladas durante la degustación, confirman la diversidad en las preferencias de los consumidores, pero no afectaron el rendimiento general del cultivo.

Los problemas iniciales con los trips y el hongo *Pythium* destacaron la vulnerabilidad de los sistemas hidropónicos a las plagas y enfermedades, especialmente en ambientes controlados. Sin embargo, el sellado adecuado y las medidas de bioseguridad implementadas demostraron ser efectivas, lo que sugiere que un manejo riguroso del ambiente es crucial para evitar pérdidas significativas.

En cuanto a la solución nutritiva, el monitoreo constante del pH y la conductividad eléctrica permitió mantener un entorno estable para el desarrollo de las plantas, lo que está alineado con recomendaciones en la literatura (Savvas & Gruda, 2018). La importancia de un control adecuado de los nutrientes fue evidente en la calidad final de las lechugas cosechadas, lo que sugiere que incluso pequeñas desviaciones en los parámetros podrían afectar de manera negativa el cultivo.

Finalmente, los costos asociados al sistema de luces LED fueron relativamente bajos comparado con el costo total del sistema, como se puede evidenciar en la tabla 3, la sumatoria de los ítems: Tubos LED, cables y soporte, asciende a Bs. 1.245, que representa el 18% del costo total. Si se revisa el internet en busca de kit's de luces LED, es posible encontrar en la página Alibaba.com, donde se tiene una oferta variada, como ejemplo colocamos el que se encuentra en la Imagen 14, donde se puede evidenciar que el costo promedio es de \$us 250, sin tomar en cuenta costos de envío y nacionalización, además que la longitud del kit es de 1 metro, mientras que el sistema utilizado en el bus abarca lámparas 3.22 metros de longitud. Cabe aclarar que, si bien el bus cuenta con 6 tubos de PVC con

capacidad para 90 plantas, para esta investigación solo se utilizaron 2 tubos y se lograron cosechar 30 unidades de lechuga.



**Imagen 14:** Kit de luces LED ofrecido en internet

En síntesis, este estudio refuerza la viabilidad técnica y económica de la hidroponía indoor como alternativa para la producción de lechugas en entornos urbanos, aunque reconoce limitaciones relacionadas con la escala de prueba, el rango de variables analizadas y la necesidad de fortalecer la capacitación en su implementación. Las implicaciones de estos hallazgos se orientan hacia tres ejes principales:

**Productivo:** la optimización del espectro lumínico y del control de nutrientes es clave para maximizar el rendimiento.

**Sanitario:** los sistemas indoor requieren protocolos de bioseguridad sólidos para evitar pérdidas por plagas y enfermedades.

**Socioeconómico:** se precisa apoyo institucional y académico para superar las barreras de costo y formación técnica que limitan la adopción a gran escala.

Con base en estas consideraciones, se concluye que la hidroponía indoor no solo es una opción prometedora para garantizar la seguridad alimentaria urbana en Santa Cruz, sino también un campo fértil para el desarrollo de proyectos de automatización, diversificación de cultivos y formación especializada que permitan consolidar su impacto a largo plazo.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado con el apoyo de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz y Agroindustrial, juntamente con los auxiliares de laboratorio de la carrera.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bañón, S., Rodríguez-García, I., Díaz, P., & Molero, R. (2020). Evaluación de variedades de lechuga en sistemas hidropónicos. *Horticultura Internacional*, 39(1), 24-29.

Gruda, N. (2019). Impact of LED Lighting on Plant Growth in Controlled Environments. *Horticulturae*, 5(4), 102-118.

Gruda, N. (2019). Hydroponics and its challenges in vegetable production: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 42(10), 1235-1240.

Nelson, P. V. (2018). *Greenhouse operation and management* (8th ed.). Pearson.

Savvas, D., & Gruda, N. (2018). *Plant Production in Hydroponics*. Elsevier.

El Deber. (2017, junio 12). El auge de los productos hidropónicos en Santa Cruz. *El Deber*.

Jones, J. B. (2016). *Hydroponics: A practical guide for the soilless grower* (2nd ed.). CRC Press.

Perring, T. M., Gruenhagen, N. M., & Farrar, C. A. (2015). *Aphids as Crop Pests*. CABI.

Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (7th ed.). CRC Press.

Massa, G. D., Kim, H. H., Wheeler, R. M., & Mitchell, C. A. (2008). Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 43(7), 1951-1956.

Agrios, G. N. (2005). *Plant Pathology* (5th ed.). Elsevier Academic Press.

Clarkson, G., Rothwell, S., & Taylor, G. (2005). Nutritional qualities of lettuce varieties and their relevance to dietary intake. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18(6), 647-654.

Lewis, T. (1997). *Thrips as Crop Pests*. CABI.

Jarvis, W. R. (1992). *Managing diseases in greenhouse crops*. American Phytopathological Society.