

Automatización del crecimiento de plantas con iluminación artificial proveniente de Neopixels

Carolay Castellanos Espitia, Marco Antonio Leal Benítez y Marisol Rico López

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Magíster en Potencia Eléctrica

Codirector

Luz Nayibe Garzón Gutiérrez

Doctora en Ciencias Agropecuarias área Fitopatología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico a mis padres y a cada una de las personas que me acompañaron en este proceso.

Carolay Castellanos Espitia

Este proyecto se lo dedico a mis padres y compañeros.

Marco Antonio Leal Benítez

Este proyecto se lo dedico a mi familia que con su esfuerzo, consejos y confianza aportaron a este logro, a mis amigos y compañeros que hicieron parte del proceso y a mi por demostrarme una y otra vez que siempre se puede.

Marisol Rico López

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios y a mi familia por ser esa inspiración y ese motor para cumplir mis sueños.

Carolay Castellanos Espitia

Quiero agradecer a todas aquellas personas que fueron parte de este proceso.

Marco Antonio Leal Benítez

Quiero agradecer a Dios por haber sido guía y fortaleza durante mi estadía en la universidad, a mi familia por darme el apoyo, la paciencia, el amor y los principios fundamentales para lograr esta meta.

A mis amigos que durante estos años se convirtieron en familia e hicieron de esta una gran experiencia, por ultimo y no menos importante a mi, por todo el esfuerzo y trabajo realizado.

Marisol Rico López

Tabla de Contenido

Introducción	15
1 Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2 Marco Referencial	18
2.1 Luz RGB	18
2.2 Automatización	18
2.3 Longitud de onda	19
2.4 Lux	19
2.5 Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)	19
2.6 Hardware	20
2.6.1 <i>Microcontrolador</i>	20
2.6.2 <i>Cámara de crecimiento vegetal</i>	20
2.6.3 <i>Led</i>	21
2.7 Software	21
2.7.1 <i>Arduino IDE</i>	21
2.7.2 <i>Protocolo de comunicación para la transferencia de datos del LED WS2812</i>	21

2.8	Necesidades de los interesados	22
2.9	Selección de la planta	23
2.9.1	<i>Rúcula</i>	23
2.9.2	<i>Espinaca</i>	24
2.9.3	<i>Lechuga</i>	24
2.10	Características del proyecto	25
3	Sistema de iluminación con NeoPixels	26
3.1	Tratamiento de luz	26
3.1.1	<i>Selección de NeoPixels</i>	26
3.1.2	<i>Iluminación hortícola con NeoPixels</i>	27
3.1.3	<i>Efectos de radiación sobre la plantas</i>	28
3.2	Sistema de riego	29
3.3	Sistema de control	30
3.3.1	<i>Lazo cerrado</i>	31
3.3.2	<i>Lazo abierto</i>	32
3.4	Sistema de alimentación	32
3.5	Montaje del invernadero	33
3.5.1	<i>Circuito sistema de iluminación Neopixels</i>	33
3.5.2	<i>Estructura sistema de iluminación Neopixels</i>	35
3.5.3	<i>Iluminación de las plantas</i>	37

4	Sistema de iluminación con Cámara de Crecimiento vegetal	39
4.1	Cámara de crecimiento vegetal	39
4.2	Plantación de la lechuga	40
4.2.1	<i>Plantas de clima tropical</i>	41
4.2.2	<i>Elementos completamente desinfectados para el ingreso a la cámara</i>	41
4.2.3	<i>Monitoreo constante de la siembra</i>	41
4.2.4	<i>Personal capacitado para el manejo de la cámara</i>	41
4.2.5	<i>Descripción del escenario de implementación</i>	42
5	Plantas con luz solar	44
5.1	Selección de las plantas	44
5.2	Entorno de crecimiento	46
6	Resultados	48
6.1	Longitud del tallo	48
6.2	Ancho de las hojas	49
6.3	Largo de las hojas	50
6.4	Peso de las plantas	51
6.5	Largo de la raíz de las plantas	52
7	Análisis de resultados	53
7.1	Longitud del tallo	53

7.2	Largo de las hojas	55
7.3	Ancho de las hojas	56
7.4	Largo de la raíz	58
7.5	Peso de las plantas	59
8	Conclusiones	61
9	Recomendaciones	62
	Referencias Bibliográficas	64
	Apéndices	68

Lista de Figuras

Figura 1	Matriz NeoPixels	27
Figura 2	Distribución matricial de los NeoPixels en la matriz RGB 8*8	29
Figura 3	Tarjeta de desarrollo Esp32-cam	31
Figura 4	Diagrama de lazo cerrado para el sistema de riego	31
Figura 5	Diagrama de lazo abierto para el sistema de iluminación	32
Figura 6	Diagrama de lazo abierto para el sistema de la cámara	32
Figura 7	Conexiones sistema de potencia	33
Figura 8	PCB implementada sistema Neopixels	34
Figura 9	Parte posterior de la PCB implementada	35
Figura 10	Distribución de matrices en el invernadero	36
Figura 11	Estructura del invernadero	37
Figura 12	Sistema de iluminación con Neopixels y plantas de lechuga en el día del trasplante	38
Figura 13	Plantas de lechuga que crecieron bajo iluminación de Neopixels 28 días después de trasplantadas	39
Figura 14	Plant Growth Chamber MGC-450-Hp-2	40
Figura 15	Plantas en la cámara de crecimiento en el día del trasplante	43
Figura 16	Plantas en la cámara de crecimiento en el día 28 después del trasplante	44

Figura 17	Semillas de Lechuga Black Simpson	46
Figura 18	Plantas de lechuga con luz natural el día del trasplante	47
Figura 19	Plantas de lechuga con luz natural en el día 28 después del trasplante	47

Lista de Tablas

Tabla 1	Características colores de leds	28
Tabla 2	Clima de Bucaramanga	45
Tabla 3	Mediciones en promedio de la longitud del tallo de las plantas de lechuga	49
Tabla 4	Mediciones en promedio del ancho de las hojas de las plantas de lechuga	50
Tabla 5	Mediciones en promedio del largo de las hojas de las plantas de lechuga	51
Tabla 6	Mediciones del peso de las plantas de lechuga en el día final del proyecto	52
Tabla 7	Mediciones del largo de la raíz de las plantas de lechuga en el día final del proyecto	53
Tabla 8	Análisis resultados longitud del tallo	53
Tabla 9	Plantas con Neopixels vs. Plantas en entorno natural	54
Tabla 10	Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara	54
Tabla 11	Análisis resultados largo de las hojas	55
Tabla 12	Plantas con Neopixels vs Plantas en entorno natural	55
Tabla 13	Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara	56
Tabla 14	Análisis resultados ancho de las hojas	56
Tabla 15	Plantas con Neopixels vs Plantas en entorno natural	57
Tabla 16	Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara	57
Tabla 17	Análisis resultados largo de la raíz	58

Tabla 18	Plantas con Neopixels vs Plantas en entorno natural	58
Tabla 19	Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara	59
Tabla 20	Análisis resultados peso de las plantas	59
Tabla 21	Plantas con Neopixels vs Plantas en entorno natural	60
Tabla 22	Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara	60
Tabla 23	Tabla de costos sistema de iluminación con NeopiXels	69
Tabla 24	Tabla de costos cámara de crecimiento vegetal	69

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A Código para el control de los sistemas de iluminación y riego programado en Arduino IDE	68
Apéndice B Código para el monitoreo fotografico con la Esp32-cam programado en Arduino IDE	68
Apéndice C Costos sistema de iluminación con NeopiXels	68
Apéndice D Costos cámara de crecimiento vegetal	69
Apéndice E Hoja de datos matriz de Neopixels 8x8 Ws2812	69
Apéndice F Imágenes de las plantas tomadas con la ESP32_CAM	69

Abstract

Title: Plant growth automation with artificial illumination from Neopixels *

Authors: Carolay Castellanos Espitia, Marco Antonio Leal Benítez, Marisol Rico López **

Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez Magister in Electrical Power

Codirector: Luz Nayibe Garzón Gutiérrez Ph.D. in Agricultural Sciences, Phytopathology area.

Keywords: NeoPixels, Automation, Artificial lighting, Wavelengths of light.

Description: A prototype of a lighting system with artificial light from Neopixels was developed, which allowed automating the growth of lettuce plants. To achieve this, a system was implemented that consisted of exposing the plants to artificial light with a specific pattern using RGB LEDs and controlling the time of exposure to light. In addition, irrigation was automated by means of a soil moisture sensor and a small water pump controlled by a microcontroller, which allowed supplying the right amount of water to the plants. The culture was also developed in two other scenarios, a plant growth chamber by *in vitro* culture and a culture that was developed under natural light and rain irrigation conditions, in order to compare how effective the main method of the project was. An ESP32-CAM was used to take photographic records of plant growth under artificial Neopixel illumination, and leaf, stem and root growth data were collected for statistical analysis of growth in the three scenarios.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Resumen

Título: Automatización del crecimiento de plantas con iluminación artificial proveniente de NeoPixels. *

Autores: Carolay Castellanos Espitia, Marco Antonio Leal Benítez, Marisol Rico López **

Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez Magister en Potencia Eléctrica

Codirector: Luz Nayibe Garzón Gutiérrez Doctora en Ciencias Agropecuarias área Fitopatología

Palabras claves: NeoPixels, Automatización, Iluminación artificial, Longitudes de onda de luz.

Descripción: Se desarrolló un prototipo de sistema de iluminación con luz artificial proveniente de Neopixels, el cual permitió automatizar el crecimiento de plantas de lechuga. Para lograr esto, se implementó un sistema que consistió en la exposición de las plantas a luz artificial con un patrón específico utilizando LEDs RGB y se controló el tiempo de exposición a la luz. Además, se automatizó el riego por medio de un sensor de humedad del suelo y una pequeña bomba de agua controlada por un microcontrolador, que permitió suministrar la cantidad adecuada de agua a las plantas. También se desarrolló el cultivo en dos escenarios más, una cámara de crecimiento vegetal por medio de cultivo *in vitro* y un cultivo que fue desarrollado bajo condiciones de luz natural y riego por lluvia, para de esta manera comparar que tan efectivo resultó el método principal del proyecto. Se utilizó una ESP32-CAM para tomar registros fotográficos del crecimiento de las plantas con iluminación artificial de Neopixels y se recopilieron datos del crecimiento de las hojas, tallo y raíz para realizar análisis estadísticos de crecimiento en los tres escenarios.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Introducción

¿Las plantas pueden crecer con iluminación artificial proveniente de neopixels?

El crecimiento de plantas con luz artificial se debe en parte a la necesidad de producir alimentos de manera más eficiente y sostenible, y en parte a la creciente demanda de productos frescos y saludables todo el año. La automatización del crecimiento de plantas con luz artificial es una técnica que permite controlar la cantidad y calidad de luz que reciben las plantas (Robles, 2023), lo cual puede mejorar el rendimiento, aumentar la producción y la disponibilidad de ciertos cultivos, además de adaptar la iluminación a las necesidades específicas de estos.

La luz es un factor clave en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Zheng et al., 2021). Es necesaria para la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas producen su propio alimento a partir de dióxido de carbono y agua. La luz también juega un papel importante en la germinación de semillas, el desarrollo de flores y frutos, y la producción de aceites esenciales y pigmentos. En los próximos años uno de los grandes retos será abastecer a una población en aumento que tiene una creciente demanda de alimentos, que de igual forma se ve afectada por el cambio climático que podría desmejorar las condiciones de los cultivos que actualmente se desarrollan, generando un impacto negativo en la producción de alimentos. La luz artificial puede ser utilizada para sustituir o complementar la luz solar en el crecimiento de plantas (Zheng et al., 2021). Existen diversas fuentes de luz artificial, como bombillas fluorescentes, lámparas de sodio y luces LED, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Es importante elegir la fuente de luz adecuada en función del tipo de planta y el objetivo del cultivo, en donde un proceso automatizado del crecimiento de

plantas con luz artificial permite controlar el nivel de luz que reciben estas a diferencia de la luz natural. Esto puede mejorar la calidad y el rendimiento de las plantas al proporcionar una cantidad óptima de luz y evitar interrupciones en la iluminación. La automatización también permite controlar la duración, el espectro y la intensidad de la luz, lo que puede mejorar el crecimiento y el desarrollo de las plantas (Bernardo et al., mbre).

La UIS busca contribuir a esta problemática promoviendo investigación que aproveche la experiencia en temas electrónicos y biológicos, para lo cual ha identificado la necesidad de desarrollar un prototipo de sistema automático que permita evaluar la viabilidad del crecimiento de plantas mediante el uso de luz artificial proveniente de Neopixels. Con la automatización se tendría mayor eficiencia energética y el uso de esta tecnología permitiría un mayor control y monitoreo del crecimiento de las plantas. El impacto y los beneficios de este proyecto vienen encaminados en poder hacer cultivos a grande o pequeña escala en lugares que hoy en día son poco convencionales o no aptos para la agricultura, ya que vamos a poder hacerlo en lugares cerrados no óptimos para cultivos porque no llega mucha luz natural, como en lugares abiertos que no cuente con las condiciones necesarias para poder sembrar, esto creará un gran cambio en la forma de pensar de las personas que no pueden cultivar ya sea por espacio o por las condiciones en donde viven.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Automatizar el crecimiento de plantas utilizando iluminación artificial proveniente de Neopixels.

1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar semillas de buena calidad y adecuar los lugares donde estas se plantarán.
- Determinar los espectros de radiación que se van a utilizar para iluminar las plantas y seleccionar los Neopixels y su circuito de alimentación para definir un área de trabajo en donde se colocaran los cultivos.
- Diseñar un sistema digital que permita controlar mediante un microcontrolador, en los Neopixels, el nivel de brillo, longitud de onda y horarios con los que se estimulará la planta para favorecer su crecimiento.
- Realizar un seguimiento periódico al crecimiento de las plantas y realizar comparaciones que permitan establecer la influencia de la iluminación artificial en el crecimiento de las plantas.

2. Marco Referencial

El propósito de esta sección es presentar las tecnologías y elementos presentes en este proyecto con la finalidad de que ayude a contextualizar y entender a cabalidad el diseño planteado.

2.1 Luz RGB

La luz RGB es una forma de luz que se compone de tres colores primarios: rojo (R), verde (G) y azul (B). Estos colores se combinan para producir una amplia gama de tonos y colores (Suárez, 2013).

La luz RGB se utiliza en muchas aplicaciones, incluyendo la iluminación de pantalla en televisores, monitores de ordenador y teléfonos móviles, y en la iluminación de escenarios y eventos. También se utiliza en la industria de la impresión y en la producción de video (Suárez, 2013).

2.2 Automatización

Está íntimamente ligado a la presencia del movimiento automático (sin intervención directa del hombre) repetitivo y mecánico. Se puede considerar por lo tanto, sinónimo de mecanización y sus herramientas fundamentales son la neumática, la electricidad y la hidráulica (Álvarez, 1994).

En el mundo globalizado en que vivimos actualmente, la automatización de procesos industriales se vuelve necesaria ya que es una herramienta que permite elevar la eficiencia de estos, aumentando la velocidad a la manejada por sistemas controlados por computadores y mejorando la repetitividad de los mismos. Dentro de los procesos automatizados, encontramos diversas tendencias en su aplicación debido al desarrollo constante de nuevas tecnologías. (Rojas, 2019).

2.3 Longitud de onda

La longitud de onda es la longitud de ciclo de una onda, que puede ser medida como la distancia entre dos crestas de ondas sucesivas (Gonzalez and Cuentas, 2013). La cual se mide en múltiplos o submúltiplos del metro en unidades del Sistema Internacional de Unidades y la de luz visible es del orden de nanómetros.

La longitud de onda depende del medio en la que la perturbación se propaga. En medios no uniformes, la longitud de onda puede variar con la posición. Algunas ondas complejas se pueden expresar como la superposición de ondas sinusoidales simples; el rango de longitudes de onda que comprende la onda se denomina espectro (Putnis, 1992).

2.4 Lux

Unidad de iluminancia del sistema internacional, que equivale a la iluminancia de una superficie que recibe un flujo luminoso de 1 lumen por metro cuadrado (RAE, 2010).

2.5 Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)

La PAR es la porción del espectro electromagnético que es absorbida por las plantas para llevar a cabo la fotosíntesis. Esta radiación se encuentra en el rango de longitudes de onda de aproximadamente 0,40 a 0,70 micrómetros, que corresponde a la luz visible. La PAR es esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que es utilizada por los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila, para convertir la energía lumínica en energía química, que se almacena en forma de carbohidratos. En resumen, la PAR es la luz necesaria para que las plantas realicen la fotosíntesis y puedan sobrevivir (Escobedo et al., 2020).

2.6 Hardware

2.6.1 *Microcontrolador*

Un microcontrolador es un pequeño circuito integrado que contiene un microprocesador, memoria y periféricos de entrada/salida. Es un dispositivo programable que se utiliza para controlar y automatizar diferentes procesos y sistemas, desde electrodomésticos hasta maquinaria industrial (Montañez, 2017).

Los microcontroladores son capaces de procesar datos en tiempo real, ejecutar algoritmos complejos y controlar dispositivos mediante señales digitales o analógicas. Además, son más económicos y fáciles de programar que los microprocesadores tradicionales, lo que los hace ideales para una amplia gama de aplicaciones en áreas como la robótica, la electrónica de consumo, la automoción, la medicina, la agricultura y la industria (Reyes, 2008).

2.6.2 *Cámara de crecimiento vegetal*

La cámara de crecimiento vegetal es un tipo particular de cámara climática construida para el cultivo de vegetales, como plantas y semillas, y pequeños organismos vivos como insectos y cultivos bacterianos (FDM, 2021).

Como todas las cámaras climáticas, permite ajustar la temperatura y la tasa de humedad en el interior de las salas para influir en las distintas etapas de desarrollo de los organismos objeto de estudio. Sin embargo, además de las cámaras climáticas estándar, las cámaras de crecimiento están equipadas con un sistema de iluminación que simula el efecto de la exposición solar.

La iluminación puede ser vertical u horizontal y puede obtenerse utilizando lámparas de

neón, LED o UV, dependiendo de las necesidades específicas (FDM, 2021), (Rua, 2010).

2.6.3 Led

Un LED se define por sus siglas como diodo emisor de luz y no es más que un pequeño chip de material semiconductor, que cuando es atravesado por una corriente eléctrica, en sentido apropiado, emite luz monocromática sin producir calor, es decir un componente electrónico semiconductor, con polaridad por lo que se usará en funciones de señalización, estética y, actualmente iluminación (Déleg, 2010).

2.7 Software

2.7.1 Arduino IDE

Es un conjunto de herramientas de software que permiten a los programadores desarrollar y grabar todo el código necesario para hacer que el microcontrolador funcione como queramos. El IDE de Arduino nos permite escribir, depurar, editar y grabar nuestro programa de una manera sumamente sencilla, en gran parte a esto se debe el éxito de Arduino, a su accesibilidad (Peña, 2020).

2.7.2 Protocolo de comunicación para la transferencia de datos del LED WS2812

Estos leds utilizan el protocolo NZR (No Zero Return) el cual es utilizado para controlar las luces RGB (rojo, verde y azul) en sistemas de iluminación. Este protocolo se basa en la transmisión de datos digitales a través de una línea de comunicación entre un controlador y las luces RGB (Vásquez, 2019).

El protocolo NZR utiliza una secuencia de bits para representar los diferentes comandos y valores de color que se desean enviar a las luces RGB. Cada bit se transmite como un nivel de

voltaje, donde un nivel alto representa un "1" y un nivel bajo representa un "0"(Vásquez, 2019).

El protocolo NZR también incluye un mecanismo de detección de errores para garantizar la integridad de los datos transmitidos. Esto se logra mediante la inclusión de bits de paridad o mediante el uso de algoritmos de detección y corrección de errores (Vásquez, 2019).

En resumen, el protocolo NZR es una forma de comunicación digital utilizada para controlar luces RGB, permitiendo enviar comandos y valores de color a través de una línea de comunicación entre un controlador y las luces (Vásquez, 2019).

2.8 Necesidades de los interesados

La automatización del cultivo de plantas representa un paso importante en la agricultura, ya que no solo ayuda a optimizar la utilización de recursos como el agua y el suelo, si no que permite controlar e intervenir en todas las etapas del cultivo, independientemente del tipo de planta o si el sistema es en invernadero o al aire libre.

El desarrollo de un prototipo de proyecto que permita la automatización del crecimiento de plantas, se debe optimizar en cuanto presupuesto y desarrollo del sistema, con el fin de que sea asequible y la ejecución del mismo sea lo mas optimo posible.

- **Agricultura:** La agricultura es uno de los sectores más interesados en el crecimiento de plantas por medio de luz artificial. Las técnicas de cultivo en interiores, utilizando luz artificial, permiten una producción agrícola más controlada. Además, los sistemas de cultivo en interiores pueden proporcionar una producción constante durante todo el año, lo que es especialmente útil para productos agrícolas de temporada limitada.

2.9 Selección de la planta

Para el desarrollo del proyecto se estudiaron diferentes cultivos, para escoger el más apropiado, los cuales fueron:

2.9.1 Rúcula

La rúcula (*Eruca sativa* Mill.) es conocida desde la antigüedad por sus múltiples propiedades curativas y estimulantes: depurativas, diuréticas, afrodisíacas y tónicas. Se destaca de otros vegetales de hoja por su mayor contenido de fibras, hierro y Vitamina C. Las hojas tienen un sabor entre picante y amargo que se consumen crudas en ensaladas, en la decoración de platos y también cocidas. Las flores también se utilizan, para decoración o aderezos. Se usa en mezclas de vegetales de hoja presentadas en bandejas. Las hojas más viejas son más picantes, y pueden incluirse en salsas, sopas y como aderezo de pizzas (Del Pino, 2012).

Es una planta anual, erecta, las hojas tienen hendiduras en los márgenes con punta redondeada, son levemente carnosas y poco pubescentes. La planta tiene de 5 a 7 hojas, cuyo tamaño varía según las épocas del año, pero puede llegar a 25 cm de largo o más. Como el órgano de consumo es la hoja sin inflorescencia, la aparición de esta no es deseable. Se cultiva al aire libre o en invernadero, y en la primavera con días largos y altas temperaturas, florece, y esto perjudica la calidad (Del Pino, 2012).

El ciclo de cosecha es muy corto, de 20 a 60 días, y la cosecha se realiza con raíz o por cortes sobre la base del tallo, sobre hojas de 10 a 15 cm. Tiene muy buena capacidad de rebrote, y se pueden realizar de 4 a 5 cortes con intervalos de 10 a 20 días (Del Pino, 2012).

2.9.2 *Espinaca*

La espinaca, es una hortaliza de hoja originaria del medio oriente. Es muy apreciada en la dieta alimenticia del ser humano en especial de personas con problemas de anemia, por contener proteínas, carbohidratos, hierro, vitamina A y minerales. Para su siembra los suelos deben ser sueltos y ricos en materia orgánica, permeables, con una buena aereación y drenaje. La espinaca tolera la salinidad, pero es poco tolerante a la acidez (pH óptimo: 6.0 - 6.8) y a demás para un buen desarrollo la mejor época de siembra son los meses de otoño e invierno, por las condiciones adecuadas de temperatura y humedad ambiental (Sigüeñas, 2002).

2.9.3 *Lechuga*

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) pertenece a la familia Compositae. Es la hortaliza más cultivada en Cundinamarca con un área aproximada de 636 ha con una producción anual de 9.276 t (Asohofrucol, 2008). Contiene alto porcentaje de agua (90-95%), como también folatos, vitamina A o beta-caroteno y cantidades apreciables de vitamina C, estas dos últimas con acción antioxidante, relacionadas con la prevención de enfermedades cardiovasculares e incluso de cáncer (Carranza et al., 2009).

La lechuga posee un tallo que, en sus primeras etapas, crece muy lentamente y no ramifica, lo cual permite la formación de una roseta de hojas y las lechugas repollos (lechugade repollo y lechuga romana). No obstante, después del "bolting"(cerramiento), el tallo se alarga rápidamente (60-120cm), ramifica y cada planta termina en una inflorescencia. La transformación del ápice floral es facilmente detectable, mediante ciertos cambios en las características del desarrollo y

formación, así como en la morfología de los órganos laterales, pues, frecuentemente, los ápices de las inflorescencias y de las flores son claramente más planos y anchos que el ápice vegetativo. (Pinzón et al., 1993).

La duración del cultivo suele ser de 50-60 días para las variedades tempranas y de 70-80 días para las tardías, como término medio, desde la plantación hasta la recolección.

Finalmente, por las condiciones climáticas y de diferentes características del cultivo, decidimos desarrollar el proyecto con lechuga, por ser un cultivo que se adapta mejor al clima y es más consumido en esta región.

2.10 Características del proyecto

El proyecto se desarrolla en tres escenarios diferentes, donde el principal es en una cámara tipo invernadero que se diseñó y construyó a bajo costo y es iluminada artificialmente con luz proveniente de Neopixles, el riego es automático controlado por medio de un sensor de humedad, el nivel de iluminación se configuró para obtener un crecimiento en las plantas de lechuga y de igual forma el tiempo de iluminación. También se construyó para esta cámara un sistema de ventilación y un circuito de alimentación con el cual se garantizara que el sistema pudiera trabajar el tiempo requerido sin que los elementos sufrieran algún daño.

Los resultados de este sistema se pretenden comparar con los arrojados en los otros escenarios, los cuales son sembrar plantas de lechuga en una cámara de cultivo, la cual trae en su sistema para configurar el ambiente al cual están expuestas las plantas por medio de características como la humedad, tiempo de iluminación e intensidad de la misma, de igual forma se cultivaron plantas de lechuga en entorno natural, teniendo en cuenta que la única intervención que se tendría en el

cultivo, sería el riego.

Por recomendación de la Doctora Luz Nayibe Florez, coodirectora del proyecto e integrante de la escuela de Biología, para cada uno de los tres escenarios se utilizaron la cantidad de 10 matas de lechuga, esto con el fin de obtener un análisis estadístico confiable.

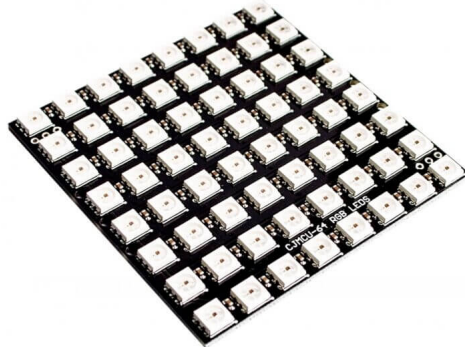
3. Sistema de iluminación con NeoPixels

En esta sección esta la información del diseño y montaje del sistema de iluminación con NeoPixels en sus respectivas etapas.

3.1 Tratamiento de luz

3.1.1 Selección de NeoPixels

Para iniciar el desarrollo del sistema automatizado, se decidió utilizar NeoPixels como fuente de luz para las plantas. El siguiente paso consistió en seleccionar un diseño con una buena relación costo-beneficio, donde al evaluar varias opciones, se encontró que la matriz cuadrada de NeoPixels de 8x8 (Ws2812) se adaptaba mejor a los requerimientos del proyecto, las cuales funcionan a 5[V] y su forma cuadrada permite una cobertura amplia del espacio, proporcionando una cantidad adecuada de luz. (Hoja de datos en Apendice E)

Figura 1*Matriz NeoPixels*

Nota. Tomado de MATRIZ DE LED RGB WS2812 8X8. (s.f.). MACTRONICA.

3.1.2 Iluminación hortícola con NeoPixels

El color de luces se seleccionó de acuerdo a las longitudes de onda y a las características de crecimiento que cada uno de ellos le proporcionan a las plantas. Se utilizaron 5 colores diferentes: rojo, azul, blanco, violeta e Rosa-Rojo. Estos fueron escogidos porque ayudan a la ramificación y crecimiento del tallo, crecimiento vegetativo y de las hojas, al igual que el violeta en pequeñas cantidades ayuda al color, sabor y aroma de la planta y finalmente el infrarrojo estimula el crecimiento de la planta.

En la tabla 1 se observan algunas características de cada color seleccionado.

Tabla 1*Características colores de leds*

Colores	Tension [V]	Longitud de onda [nm]	Corriente [mA]	Fabricante	Referencia
Rojo	1.8-2.2	620-630	20	Worldsemi	WS2812
Blanco	3.4		20	Worldsemi	WS2812
Azul	3.2-3.4	465-475	20	Worldsemi	WS2812
Rosa-Rojo	2.16	627,12	20	Worldsemi	WS2812
Violeta	3-3.8	549.13	20	Worldsemi	WS2812

Nota. Tomado de WS2812 Intelligent control LED integrated light source. (s.f.). Worldsemi.

3.1.3 Efectos de radiación sobre la plantas

Esencialmente toda la luz visible es capaz de promover la fotosíntesis, pero las regiones de 400 a 500 [nm] y de 600 a 700[nm] son las más eficaces. Así la clorofila pura, tiene una absorción muy débil entre 500 y 600 [nm], los pigmentos accesorios complementan la absorción de la luz en esta región, suplementando a las clorofilas (Jaramillo, 2005).

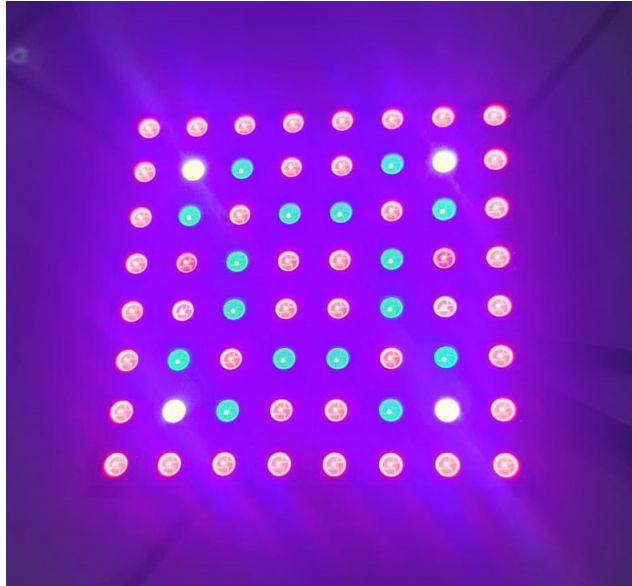
- 620-700 [nm] (rojo): una de las bandas de mayor absorción de la clorofila.
- 510-620 [nm] (naranja, amarillo, verde): de débil actividad fotosintética
- 380-510 [nm] (violeta, azul y verde): es la zona más energética, de intensos efectos formativos. De fuerte absorción por la clorofila. (Jaramillo, 2005)

Para la iluminación de las plantas se configuró la matriz de 64 LEDS con una distribución que corresponde al 6.25 % de luz blanca, 3.125 % de luz rosa-rojo y de igual forma 3.125 % de luz violeta, teniendo una mayor distribución para los colores azul y rojo, los cuales corresponden al

25 % y 62.5 % respectivamente. Para esta configuración se tuvo en cuenta que las plantas estaban en etapa de crecimiento por lo cual se combinaron en mayor proporción los colores rojo y azul para el proceso de fotosíntesis y estimular el crecimiento de las hojas y los tallos.

Figura 2

*Distribución matricial de los NeoPixels en la matriz RGB 8*8*



3.2 Sistema de riego

Con el objetivo de lograr un invernadero autónomo, se implementó un sistema automático de riego, que no solo proporciona un monitoreo diario controlado, sino que también permite distribuir el agua de manera uniforme entre todas las plantas.

Para el montaje del sistema, se utilizaron los siguientes elementos debido a su costo asequible y consumo energético reducido:

- 1 modulo relé (jqc-3ff-s-z), este dispositivo actúa como receptor de señal del microcontrolador y cumple la función de interruptor, encendiendo o apagando una mini bomba de agua.

- 1 sensor de humedad del suelo (FC-28 YL-69), El sensor de humedad y suelo es capaz de tomar lecturas que abarcan desde suelos extremadamente áridos hasta suelos muy húmedos. En la resolución de la ESP32, el valor 0 representa el suelo más húmedo, mientras que el valor 4096 representa el suelo más árido. Este fue programado para que al captar una baja humedad en la tierra, el microcontrolador mande una señal al relé para que este active la mini bomba hasta obtener la humedad requerida.
- 1 mini bomba de agua sumergible 5[V], se escogió ya que es una opción bastante económica y proporciona un caudal de agua eficiente para esta aplicación.
- Manguera de agua (3[m] de longitud), cuyas perforaciones uniformes permiten tener igual distribución de agua entre todas las plantas.

3.3 Sistema de control

Para la autonomía de un invernadero, es necesario de un dispositivo que permita mantener las variables deseadas dentro de los rangos requeridos. En este caso se utilizó la tarjeta de desarrollo ESP32-cam, la cual se seleccionó por ser el microcontrolador más completo para las necesidades del proyecto ya que es fácil de programar, se utilizó la librería Adafruit_NeoPixel necesaria en el sistema de iluminación para ajustar la intensidad de la luz de las matrices de Neopixels, dicho micro controlador cuenta con 9 pines GPIO, pines suficientes para asegurarle señales de entrada y de salida a cada sistema del invernadero. Tiene una ventaja y es que cuenta con una cámara de 2 Megapíxel y la posibilidad de añadir una tarjeta microSD lo que permite tener un fotomonitorio del crecimiento de las plantas y por último y no menos importante es su bajo costo.

Figura 3

Tarjeta de desarrollo Esp32-cam



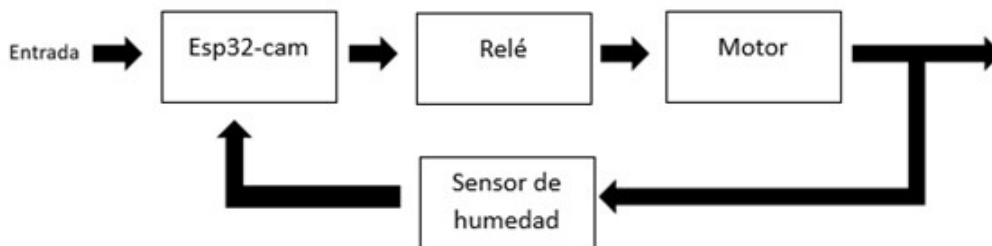
Nota. Tomado de Pascual, C. (2022, 19 enero). ESP32 CAM introducción y primeros pasos. Programar fácil con Arduino

3.3.1 Lazo cerrado

El sistema opera en un lazo cerrado para asegurar que la tierra se mantenga húmeda, evitando que las plantas sufran de falta de agua, lo cual es esencial para su crecimiento. El sensor monitorea constantemente la humedad del suelo y envía los datos al microcontrolador. Si la medida está por debajo del punto de ajuste, el microcontrolador envía una señal al relé, activando así la mini bomba de agua para mantener la tierra húmeda.

Figura 4

Diagrama de lazo cerrado para el sistema de riego



3.3.2 Lazo abierto

El sistema también opera en un lazo abierto para proporcionar a las plantas un ciclo de luz constante. Este ciclo consiste en 14 horas de luz seguidas de 10 horas sin luz. Además, se captura una foto cada 300 segundos para documentar la evolución de las plantas en el sistema.

Figura 5

Diagrama de lazo abierto para el sistema de iluminación

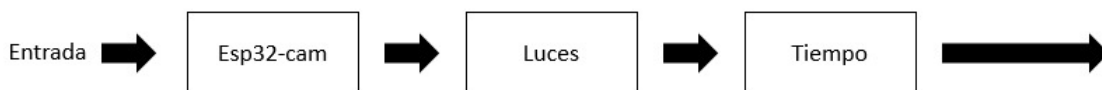


Figura 6

Diagrama de lazo abierto para el sistema de la cámara



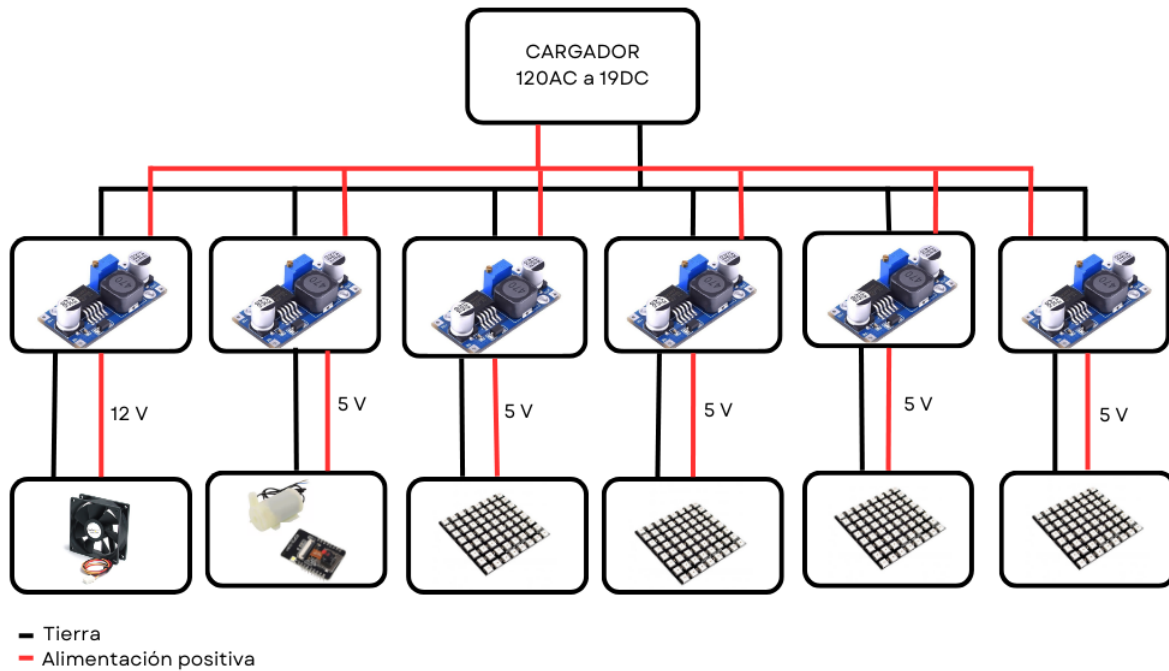
3.4 Sistema de alimentación

Para el diseño del sistema de alimentación se optó por utilizar una fuente que se tenía en casa la cual proporciona 19[V] y 3.42[A]. Para entregarle la tensión requerida por cada elemento fue necesario utilizar seis reguladores de voltaje, uno para ventilación, uno para el sistema de riego y control y cuatro reguladores para las matrices de Neopixels, con tensiones ajustadas a 12[V] y 5[V]. Finalmente el prototipo de iluminación por NeopiXels tiene un consumo total de 37.33[W](19.24 [V] y 1.94[A]), medida para cuando todos los sistemas están trabajando. Cuando la Bomba de agua se apaga el invernadero tiene un consumo de 36.17[W](19.24[V] y 1.84[A]). En

el momento en que las matrices se apagan y solo quedan funcionando ventiladores y Esp32-cam se tiene un consumo de 7.31[W](19.24[V] y 0.38[A]).

Figura 7

Conexiones sistema de potencia



3.5 Montaje del invernadero

El diseño de un sistema óptimo que permita un trabajo constante y autónomo debe contener elementos que una vez integrados tengan un comportamiento coordinado entre sí y sean capaces de trabajar varias horas consecutivas realizando su proceso correctamente.

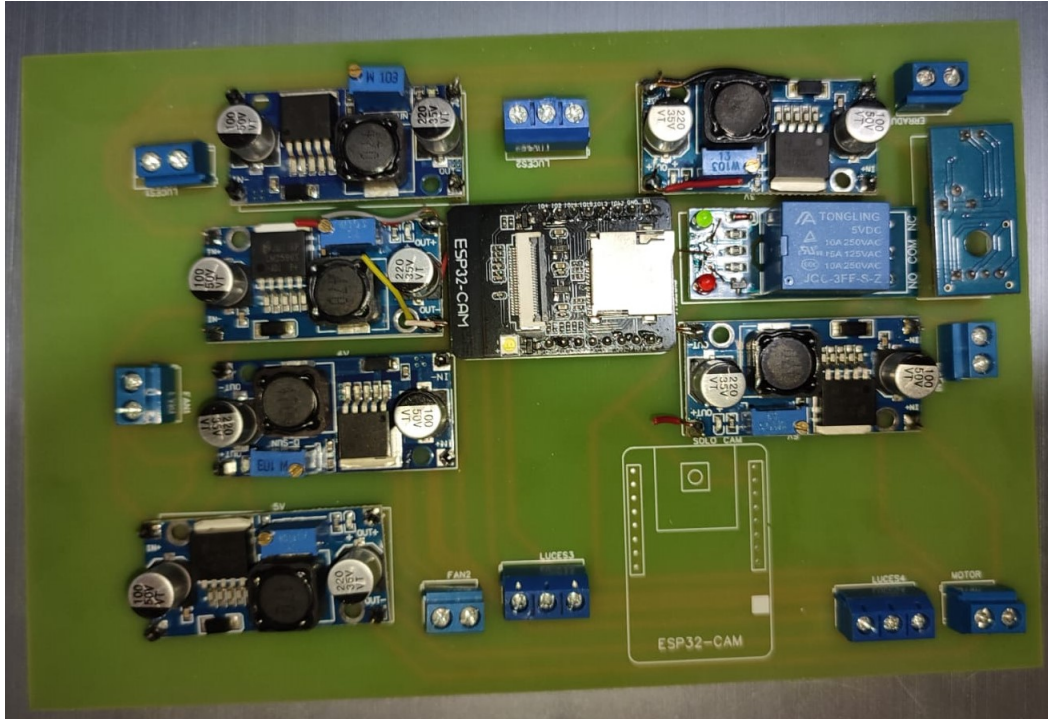
3.5.1 Circuito sistema de iluminación Neopixels

El diseño de la PCB se realizó en el software EasyEDA, el cual cuenta con una librería de footprint, lo que hizo que no fuera necesario crear cada uno de los dispositivos solo cerciorarse de

elegir el diseño de footprint correcto. El diseño final podemos observarlo en la Figura 8.

Figura 8

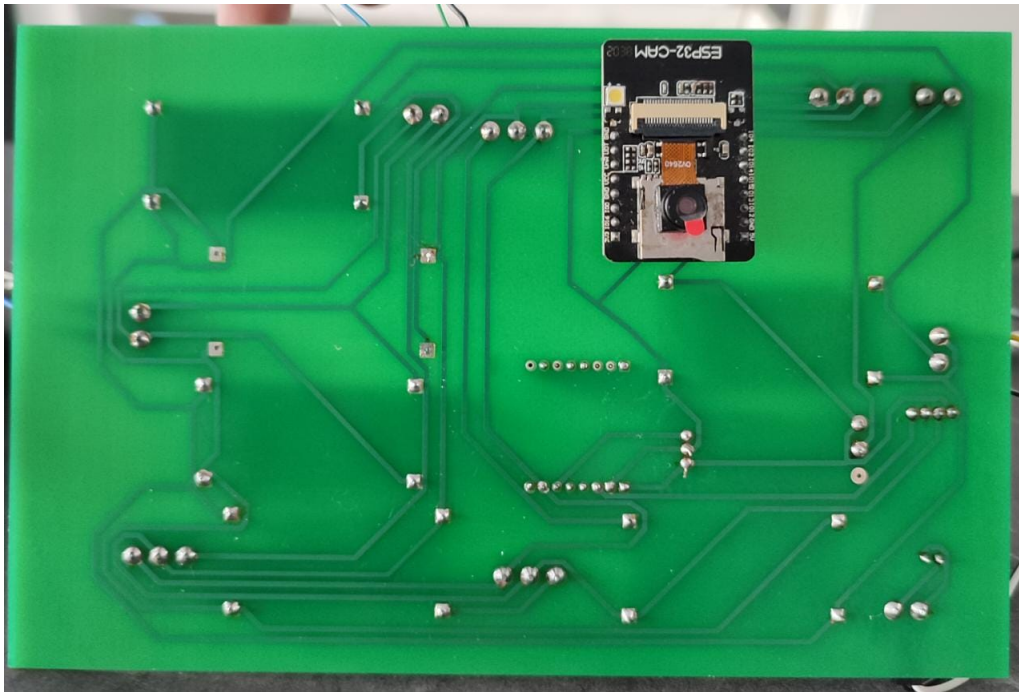
PCB implementada sistema Neopixels



Para la toma de imágenes con la ESP32-CAM (Apéndice F), se ubicó el microcontrolador en la parte posterior de la PCB, como se observa en la Figura 9.

Figura 9

Parte posterior de la PCB implementada

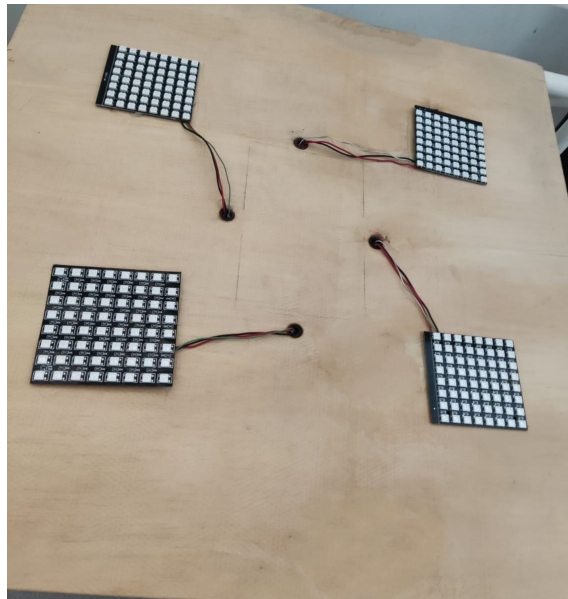


3.5.2 Estructura sistema de iluminación Neopixels

Para el montaje del sistema se optó por armar una estructura en forma de casa con medidas 0.6[m] x 0.6[m] x 10[m] de alto, ancho y largo respectivamente, esta se armó con tubos de pvc y se forró con cartulina negra para proporcionar la oscuridad requerida para el estudio. El circuito del sistema fue ubicado en una tabla de 0.6[m] x 0.6[m], por debajo de la tabla se montaron las matrices con una distancia de 20 cm entre ellas, con el fin de proporcionarle una distribución uniforme de luz a las plantas de lechuga. Además de las matrices también se ubicó en el centro de la tabla la esp32-cam utilizada explícitamente para el monitoreo de crecimiento de las plantas.

Figura 10

Distribución de matrices en el invernadero



En la parte superior de la tabla se ubicó el resto del circuito, tabla que se fijó a la estructura con abrazaderas, a los mismos tubos se fijaron dos ventiladores como se puede observar en la Figura 11, debido a que las matrices tendían a calentarse y al estar tanto tiempo activas así como todo el circuito se ve la necesidad de proporcionar ventilación al sistema.

Figura 11*Estructura del invernadero*

Finalmente, en una bandeja de dimensiones de 0.5[m] x 0.9[m] se trasplantaron 10 plantas de lechuga a una distancia de 0.14[m] y 0.18[m] entre ellas, a esta bandeja se le adecua una manguera con orificios de tal forma que el riego es por goteo y cada planta tiene ubicado estratégicamente un orificio de la manguera para el correcto riego.

3.5.3 Iluminación de las plantas

En este sistema la cantidad de luxes que emiten las matrices llega aproximadamente a 4000 [lux], que en comparación con los otros métodos probados es la mitad o menos, por lo que la bandeja con las plantas se ubicó a una distancia de 25[cm] para que las plantas pudieran aprovechar la mayor cantidad de energía proveniente de esta luz.

Además, para asegurar una similitud al tiempo en que ilumina el sol, se expusieron las plantas a 14 horas de iluminación con el sistema de neopixels y las 10 horas restantes en completa oscuridad.

Figura 12

Sistema de iluminación con Neopixels y plantas de lechuga en el día del trasplante



El resultado final de las plantas bajo el sistema de iluminación se evidencia en la siguiente imagen:

Figura 13

Plantas de lechuga que crecieron bajo iluminación de Neopixels 28 días después de trasplantadas



4. Sistema de iluminación con Cámara de Crecimiento vegetal

En esta sección esta la información del sistema de iluminación con cámara de crecimiento en sus respectivas etapas.

4.1 Cámara de crecimiento vegetal

La cámara de crecimiento vegetal modelo MGC-450-Hp-2 es una cámara de crecimiento de plantas utilizada en investigación y producción de plantas en cultivos *in vitro*. Esta cámara proporciona un ambiente controlado y optimizado para el crecimiento de plantas en condiciones estables y uniformes, lo que permite a los investigadores controlar factores como la temperatura,

la humedad y la iluminación para estudiar los efectos de diferentes condiciones en el crecimiento de las plantas. Este equipo tiene un consumo total de potencia de 2000[W] (Grupo-EMIN, 2021), además, esta cámara también puede ser utilizada para la producción de plantas y cultivos en condiciones controladas, lo que permite una producción más eficiente y predecible en comparación con el cultivo en campo abierto.

Figura 14

Plant Growth Chamber MGC-450-Hp-2



4.2 Plantación de la lechuga

El cultivo de plantas bajo este sistema de cámara de crecimiento posee ciertos cuidados específicos y características mínimas que las plantas deben cumplir para su óptimo desarrollo:

4.2.1 Plantas de clima tropical

El proyecto al ser implementado en la ciudad de Bucaramanga requiere que las plantas que se siembren se puedan desarrollar en un clima tropical, ya que dentro de la cámara se simula la cantidad de iluminación que aporta el sol en un día normal en esta ciudad.

4.2.2 Elementos completamente desinfectados para el ingreso a la cámara

Los distintos elementos que se utilizaron tanto en la siembra como el riego de las plantas de lechuga, fueron previamente desinfectados con alcohol y el agua que se utilizó era agua destilada.

4.2.3 Monitoreo constante de la siembra

La cámara de crecimiento posee un sistema de climatización que permite programar la intensidad de iluminación, el tiempo de la misma y el porcentaje de humedad que mantiene en cada intervalo de luz o de oscuridad, se programo para que 14 horas fueran de luz y 10 horas de oscuridad así como que mantuviera una humedad constante del 80%. Se tomaron datos del crecimiento de las plantas cada semana para el análisis estadístico de su crecimiento.

4.2.4 Personal capacitado para el manejo de la cámara

El equipo implementado para esta etapa del proyecto, fue proporcionado por el laboratorio de Genética y Biotecnología de la Escuela de Biología, para el cual fue necesaria una capacitación previa por parte del encargado del laboratorio para el manejo del mismo. Se obtuvo el conocimiento necesario para poder monitorear la cámara nosotros mismos.

4.2.5 Descripción del escenario de implementación

La cámara de crecimiento es utilizada para el desarrollo de proyectos que tengan que ver con siembra de plantas en las que se pueda tener un monitoreo constantes de sus condiciones climáticas. Posee compartimientos para colocar varias bandejas sobre las cuales pueden ir los elementos del proyecto, en este caso las plantas en su debida materia. Tiene lamparas que se ubican verticalmente en sus tres laterales, las cuales se encienden o se apagan según la intensidad de iluminación que programemos, por lo cual para un 100% de iluminación se observa que todas se encienden y para menos iluminación algunas permanecen apagadas.

La cámara también posee externamente tanques con agua que van conectados internamente al equipo, lo cual permite extraer agua para mantener la humedad interna de la cámara, por lo cual fue necesario recargar estos tanques constantemente y también realizar su debida desinfección.

La intención con esta parte del proyecto es poder comparar resultados del cultivo de plantas de lechuga en diferentes escenarios, teniendo en cuenta que en todos los sistemas las plantaciones fueron en el mismo tiempo y con características iguales como la misma variedad de semilla, igual tierra y se monitorearon por la misma cantidad de días, donde se sembraron 10 plantas en la cámara distribuidas en 2 bandejas para una mejor recepción de luz, como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Plantas en la cámara de crecimiento en el día del trasplante



Figura 16

Plantas en la cámara de crecimiento en el día 28 después del trasplante

**5. Plantas con luz solar****5.1 Selección de las plantas**

Para los requerimientos de este proyecto fue importante tener en cuenta factores como el clima, humedad, cantidad de horas que brilla el sol y temperatura en Bucaramanga para la selección de las plantas, dado los datos presentados en la tabla 2:

Tabla 2*Clima de Bucaramanga*

Clima	Mes	Días de lluvia [días/mes]	Temperatura [°C]	Brillo solar [horas/día]	Humedad relativa [%]
Seco	Diciembre, Enero, Febrero	10	Promedio: 22.6; Máxima media: 28; Mínima: 18-19	5-6	80
Seco	Junio, Julio, Agosto	17-19	Promedio: 22.6; Máxima media: 28; Mínima: 18-19	5-6	80
Templado	Marzo, Abril, Mayo, Septiembre, Octubre, Noviembre	17-19	Promedio: 22.6; Máxima media: 28; Mínima: 18-19	4	84

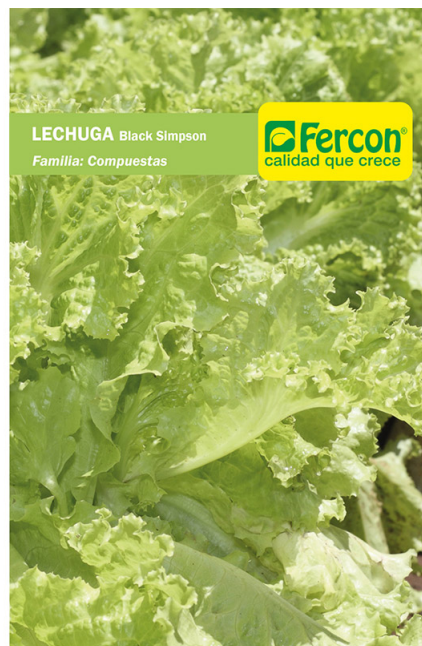
Nota. Tomado de El clima en Bucaramanga, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia) - Weather Spark. (s.f.). Weather Spark.

Se seleccionaron plantas de lechuga de la variedad Black Simpson (Figura 17), con una pureza de 99 % y un nivel de germinación del 85 % de 5 gramos en total, las cuales son un tipo de planta que se adapta muy fácilmente a cualquier tipo de clima pero en este caso a un clima tropical, por lo cual se desarrollan mejor en suelos con buena filtración y con humedad constante. También se seleccionó este tipo de lechuga porque posee un desarrollo más rápido que otras variedades, ya

que sus hojas son rizadas y no forma cabeza, lo que hace que para este proyecto el crecimiento de la misma en 28 días que dura el experimento sea suficiente para poder tomar datos relevantes cada 7 días que brinden información eficiente para su respectivo análisis estadístico, donde se analizó la media, la desviación estándar y de estos datos se calculó el índice de confianza que permitió comparar los resultados de los tres escenarios de cultivo.

Figura 17

Semillas de Lechuga Black Simpson



Nota. Tomado de LECHUGA BLACK SIMPSON – Fercon. (s.f.).

5.2 Entorno de crecimiento

El crecimiento de estas plantas se desarrolló en un ambiente al aire libre, donde la radiación era directa a la planta ya que la temperatura no era extrema en su punto máximo en el día y este era su fuente de luz y energía, de igual forma el riego era por lluvia o manual según las condiciones

climáticas que exigieran el mismo, teniendo en cuenta que las plantas debían mantener la tierra húmeda, pero no en exceso para un mejor desarrollo.

Figura 18

Plantas de lechuga con luz natural el día del trasplante



Figura 19

Plantas de lechuga con luz natural en el día 28 después del trasplante



6. Resultados

Durante 28 días estuvieron las plantas en crecimiento después del trasplante, esto debido a que la lechuga posee un crecimiento rápido y este tiempo fue suficiente para analizar su desarrollo para cumplir el objetivo del proyecto.

Durante este tiempo se realizaron mediciones de las características tanto del tallo como de las hojas de las plantas. Estas mediciones fueron tomadas cada semana para hacer un seguimiento al crecimiento de estas, cada sistema tuvo su seguimiento individual para así finalmente hacer una comparación y evaluar la efectividad de los mismos.

6.1 Longitud del tallo

La adquisición de los datos de medición de las plantas de lechuga para la altura del tallo, tomadas cada semana durante 4 semanas en promedio, se comportan como se muestra en la tabla 3; para los siguientes 28 días de crecimiento después del trasplante; dicha información es cotejada con los datos obtenidos para cada uno de los sistemas.

Tabla 3*Mediciones en promedio de la longitud del tallo de las plantas de lechuga*

Número de planta	Sistema Neopixels [cm]	Sistema Cámara[cm]	Sistema Natural[cm]
1	0,76	1,72	0,85
2	0,92	2,54	0,86
3	0,92	1,64	0,66
4	0,64	1,34	0,70
5	0,92	2,12	0,52
6	0,95	1,52	0,81
7	0,94	1,56	0,63
8	0,85	1,60	0,66
9	0,61	1,12	0,67
10	0,50	1,10	0,49

6.2 Ancho de las hojas

Las tomas realizadas para la medición del ancho de las hojas, se realizó en promedio del número de hojas que tenía la planta y de esta manera se obtuvieron los resultados consignados en la tabla 4.

Tabla 4*Mediciones en promedio del ancho de las hojas de las plantas de lechuga*

Número de planta	Sistema Neopixels [cm]	Sistema Cámara[cm]	Sistema Natural[cm]
1	1,16	1,80	4,13
2	1,16	1,90	3,69
3	1,42	2,14	3,50
4	1,21	1,70	4,69
5	1,07	1,62	1,88
6	1,32	1,98	1,93
7	0,99	1,62	3,49
8	1,01	2,00	2,92
9	1,11	1,46	3,84
10	1,20	1,90	4,10

6.3 Largo de las hojas

La toma de datos realizada para la medición del largo de las hojas, se calculó en promedio del número de hojas que tenía la planta y de esta manera se obtuvieron los resultados consignados en la tabla 5.

Tabla 5*Mediciones en promedio del largo de las hojas de las plantas de lechuga*

Número de planta	Sistema Neopixels [cm]	Sistema Cámara[cm]	Sistema Natural[cm]
1	3,49	3,22	7,62
2	3,41	3,50	7,75
3	4,43	3,56	6,56
4	4,04	2,80	8,05
5	3,39	2,90	3,50
6	4,31	4,20	3,32
7	2,94	2,86	6,85
8	3,08	3,90	5,52
9	3,25	2,70	7,05
10	4,00	3,32	7,91

6.4 Peso de las plantas

Al final del proyecto, se realizó toma de datos del peso (Tabla 6) de cada planta de lechuga con el fin de analizar mejor la efectividad del sistema en el desarrollo de las plantas.

Tabla 6*Mediciones del peso de las plantas de lechuga en el día final del proyecto*

Número de planta	Sistema Neopixels [g]	Sistema Cámara[g]	Sistema Natural[g]
1	0,36	1,96	16
2	0,41	1,98	18
3	0,25	2,94	9
4	0,34	2,21	26
5	0,16	1,69	7
6	0,67	4,03	7
7	0,09	1,49	6
8	0,29	3,17	6
9	0,35	0,97	11
10	0,28	2,65	18

6.5 Largo de la raíz de las plantas

Se realizó de igual forma la toma de datos del largo de la raíz (Tabla 7) de cada planta de lechuga con el fin de analizar mejor la efectividad del sistema en el desarrollo de las plantas.

Tabla 7*Mediciones del largo de la raíz de las plantas de lechuga en el día final del proyecto*

Número de planta	Sistema Neopixels [cm]	Sistema Cámara[cm]	Sistema Natural[cm]
1	13,2	9,2	15,1
2	3,28	7,8	13,5
3	9,76	14,1	11,6
4	8,97	18,2	19,2
5	9,31	12,9	12,2
6	4,03	20,1	11,8
7	4,39	15,4	11,3
8	2,78	14,8	9,6
9	3,1	15,1	13,1
10	4	14,8	13,8

7. Análisis de resultados

Se tomaron mediciones para los distintos sistemas de iluminación y se realizó un tratamiento de los datos con excel para calcular la media, la desviación estándar y el índice de confianza para cada sistema.

7.1 Longitud del tallo

Tabla 8*Análisis resultados longitud del tallo*

Sistema	Núm. de muestras	Media [cm]	Desv. Est.
Natural	10	0,6850	0,1262
Cámara	10	1,6260	0,4371
Neopixels	10	0,8006	0,1634

Se realizó una comparación estadística de los datos recolectados con el sistema de Neopixels con respecto a las plantas que crecieron en el entorno natural, el cual arrojó los resultados

mostrados en la Tabla 9

Tabla 9

Plantas con Neopixels vs. Plantas en entorno natural

Diferencia	IC del 95 %	p
0,1156	(-0,02156 ; 0,25276)	0,0935

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Con un 95 % de confianza, la diferencia entre el crecimiento promedio del tallo de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de entorno natural no presenta diferencia significativa por lo que los tallos en ambos sistemas crecieron igual.

De igual forma se realizó el mismo análisis para las plantas con el sistema de Neopixels con respecto a las que crecieron en la cámara, el cual arrojó los resultados mostrados en la Tabla 10

Tabla 10

Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara

Diferencia	IC del 95 %	p
-0,82540	(-1,13539 ; -0,51541)	2,62E-05

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Con un 95 % de confianza, la diferencia entre el crecimiento promedio del tallo de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de la cámara de crecimiento se observó que la hipótesis nula es falsa, por lo que se presenta una diferencia significativa en el crecimiento del tallo en estos dos sistemas, donde el promedio del largo del tallo de las plantas en el la cámara es mayor que el

de las que crecieron bajo iluminación de Neopixels.

7.2 Largo de las hojas

Tabla 11

Análisis resultados largo de las hojas

Sistema	Núm. de muestras	Media [cm]	Desv. Est.
Natural	10	6,4128	1,7531
Cámara	10	3,2960	0,4998
Neopixels	10	3,6344	0,5207

Se realizó una comparación estadística de los datos recolectados con el sistema de Neopixels con respecto a las plantas que crecieron en el entorno natural, el cual arrojó los resultados mostrados en la Tabla 12

Tabla 12

Plantas con Neopixels vs Plantas en entorno natural

Diferencia	IC del 95 %	p
-2,7784	(-3,99338 ; -1,56342)	0,0001

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Con un 95 % de confianza, la diferencia entre el crecimiento promedio del largo de las hojas de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de entorno natural presentan una diferencia significativa donde el promedio del largo de las hojas de las plantas en el entorno natural es mayor que el de las que crecieron bajo iluminación de Neopixels.

De igual forma se realizó el mismo análisis para las plantas con el sistema de Neopixels con respecto a las que crecieron en la cámara, el cual nos arrojó los resultados mostrados en la Tabla

13

Tabla 13*Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara*

Diferencia	IC del 95 %	p
0,33840	(-0,14111 ; 0,81791)	0,1555

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Con un 95 % de confianza, la diferencia entre el crecimiento promedio del largo de las hojas de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de la cámara de crecimiento se tiene que la hipótesis nula es verdadera por lo que no se ve una diferencia significativa en el crecimiento del largo de las hojas en estos dos sistemas, donde el promedio del largo es igual.

7.3 Ancho de las hojas

Tabla 14*Análisis resultados ancho de las hojas*

Sistema	Núm. de muestras	Media [cm]	Desv. Est.
Natural	10	3,4158	0,9234
Cámara	10	1,8120	0,2100
Neopixels	10	1,1650	0,1326

Se realizó una comparación estadística de los datos recolectados con el sistema de Neopixels con respecto a las plantas que crecieron en el entorno natural, el cual arrojó los resultados mostrados en la Tabla 15

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Tabla 15*Plantas con Neopixels vs Plantas en entorno natural*

Diferencia	IC del 95 %	p
-2,2508	(-2,87057 ; -1,63103)	4,78E-07

Con un 95% de confianza, la diferencia entre el crecimiento promedio del ancho de las hojas de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de entorno natural es significativa, donde el promedio del ancho de las hojas de las plantas en el entorno natural es mayor que el de las que crecieron bajo iluminación de Neopixels.

De igual forma se realizó el mismo análisis para las plantas con el sistema de Neopixels con respecto a las que crecieron en la cámara, el cual arrojó los resultados mostrados en la Tabla 16

Tabla 16*Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara*

Diferencia	IC del 95 %	p
-0,647	(-0,812 ; -0,482)	1,61E-07

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Con un 95% de confianza, la diferencia entre el crecimiento promedio del ancho de las hojas de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de la cámara de crecimiento se tiene que la hipótesis nula es falsa por lo que se presenta una diferencia significativa, donde se tiene que el crecimiento del ancho de las hojas de las plantas en la cámara es mayor que el de las que crecieron bajo iluminación de Neopixels.

Tabla 17*Análisis resultados largo de la raíz*

Sistema	Núm. de muestras	Media [cm]	Desv. Est.
Natural	10	13,1200	2,6267
Cámara	10	14,2400	3,6731
Neopixels	10	6,2820	3,6759

7.4 Largo de la raíz

Se Realizó una comparación estadística de los datos recolectados con el sistema de Neopixels con respecto a las plantas que crecieron en el entorno natural, el cual arrojó los resultados mostrados en la Tabla 18

Tabla 18*Plantas con Neopixels vs Plantas en entorno natural*

Diferencia	IC del 95 %	p
-6,838	(-9,83958 ; -3,83642)	0,0001

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Con un 95 % de confianza, la diferencia entre el crecimiento promedio del largo de la raíz de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de entorno natural presentan una diferencia significativa donde el promedio del largo en el entorno natural es mayor que el de las que crecieron bajo iluminación de Neopixels.

De igual forma se realizó el mismo análisis para las plantas con el sistema de Neopixels con respecto a las plantas que crecieron en la cámara, el cual arrojó los resultados mostrados en la Tabla 19

Tabla 19*Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara*

Diferencia	IC del 95 %	p
-7,958	(-11,4104 ; -4,5056)	0,0001

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Con un 95 % de confianza, la diferencia entre el crecimiento promedio del largo de la raíz de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de la cámara de crecimiento tenemos que la hipótesis nula es falsa por lo que se presenta una diferencia significativa en el crecimiento y el largo de la raíz de las plantas en la cámara es mayor que el de las que crecieron bajo iluminación de Neopixels.

7.5 Peso de las plantas

Tabla 20*Análisis resultados peso de las plantas*

Sistema	Núm. de muestras	Media [g]	Desv. Est.
Natural	10	12,4000	6,7856
Cámara	10	2,3090	0,9009
Neopixels	10	0,3201	0,1561

Se realizó una comparación estadística de los datos recolectados con el sistema de Neopixels con respecto a las plantas que crecieron en el entorno natural, el cual arrojó los resultados mostrados en la Tabla 21

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Tabla 21*Plantas con Neopixels vs Plantas en entorno natural*

Diferencia	IC del 95 %	p
-12,07995	(-16,58929 ; -7,57061)	2,44E-05

Con un 95 % de confianza, la diferencia entre el peso promedio de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de entorno natural presentan una diferencia significativa, donde las plantas en el entorno natural presentaron un mayor peso promedio con respecto a las que crecieron bajo iluminación de Neopixels.

De igual forma se realizó el mismo análisis para las plantas con el sistema de Neopixels con respecto a las que crecieron en la cámara, el cual arrojó los resultados mostrados en la Tabla 22

Tabla 22*Plantas con Neopixels vs Plantas en Cámara*

Diferencia	IC del 95 %	p
-1,98895	(-2,59639 ; -1,38151)	1,96E-06

Nota. IC denota el intervalo de confianza y p indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Con un 95 % de confianza, la diferencia entre el peso promedio de las plantas que crecieron con luz de Neopixels y las de la cámara es significativa, por lo que la hipótesis nula es falsa, de lo cual el peso promedio de las plantas en la cámara es mayor que el de las que crecieron bajo iluminación de Neopixels.

8. Conclusiones

Este proyecto permitió aplicar conocimientos adquiridos durante la carrera así como los nuevos proporcionados por la rama de biología, donde se logró automatizar un sistema que monitoreaba las variables ambientales de las plantas de lechuga y se pudo corroborar el efecto positivo de la luz artificial en el crecimiento de estas.

En cuanto a los cultivos de lechuga desarrollados en los tres diferentes escenarios, estos revelaron diferencias morfológicas importantes en las plantas debido a factores climáticos y los distintos tipos de luz, sin embargo las mismas tuvieron un crecimiento significativo que permitió evidenciar que en los tres escenarios es posible el desarrollo de este tipo de cultivo.

Tras el análisis, se observó que las plantas tuvieron un mejor crecimiento en la cámara de cultivo *in vitro*, debido a que el nivel de brillo de la luz fue mayor que el de la cámara creada y de igual forma se evidenció que el espectro de radiación que mejor favorece el crecimiento es el de color blanco en comparación de la combinación de rojo y azul.

En conclusión, es evidente que se cumplieron con los objetivos planteados para este proyecto y al analizar los costos para cada escenario, se evidenció que es más factible optar por una cámara de cultivo fabricada utilizando Neopixels si se quiere hacer un invernadero con iluminación artificial.

9. Recomendaciones

Cambiar la fuente de alimentación de 19[V] por una fuente de 5[V] a 20[A]. Cada matriz RGB consume aproximadamente 4[A], por lo que esto evitará la necesidad de utilizar múltiples reductores de tensión.

Reemplazar los ventiladores de 12[V] por ventiladores de 5[V]. Esto permitirá que todo el sistema funcione a una misma tensión.

Explorar opciones para conectar la ESP32-CAM a internet. Esto dará la opción recibir una foto diaria para monitorear el sistema y también programar el sistema desde cualquier lugar con acceso a internet.

Desarrollar una aplicación móvil que permita ajustar el brillo, cambiar los tiempos de luz y modificar los patrones de colores de las matrices. Esto brindará mayor flexibilidad y control sobre el sistema.

Los reductores de tensión utilizados en el proyecto investigativo suelen soportar muy poco amperaje, por lo que para un próximo experimento se recomienda reemplazar estos reductores por modelos actualizados que sean más eficientes y capaces de soportar un mayor amperaje lo que sería una medida eficaz para optimizar el espacio en la PCB y aumentar la eficiencia del diseño.

Explorar la posibilidad de jugar con la iluminación como por ejemplo variar la distribución de la luces en la matriz, probar nuevos colores del espectro de luz e incluso alternar de manera controlada entre la luz artificial y la luz natural, ya que esto más que aportar al crecimiento de las plantas puede permitir estudiar la cantidad de nutrientes que esta reciba.

Para futuras implementaciones del invernadero a gran escala, se podría tener en cuenta las energías renovables para alimentar sus diferentes sistemas y finalmente para obtener una buena producción se debe llevar el cultivo con un control de tiempos estricto en cuanto a germinación, trasplantes, riego, etc.

Se recomienda colocar las 4 matrices de LEDs blancos, ya que el color blanco es una combinación de los tres colores primarios (RGB). Esto permite aprovechar al máximo los espectros de luz necesarios para la clorofila, la cual otorga el característico color verde a las plantas y es fundamental para su proceso de fotosíntesis

Referencias Bibliográficas

- Bernardo, M., Fajardo, A., and Medina, R. (2022, 17 de diciembre). End-product of solar-sharing smart lighting artificial intelligence driven platform for high-valued crops (lactuca sativa) on indoor hydroponics syste. In *2022 IEEE 10th Conference on Systems, Process Control (ICSPC)*, pages 160–165. Malaca, Malasia. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10001821>.
- Carranza, C., Lancho, O., Miranda, D., and Chaves, B. (2009). Análisis del crecimiento de lechuga (lactuca sativa l.) 'batavia' cultivada en un suelo salino de la sabana de bogotá. *Agronomía colombiana*, 27(1):41–48.
- Del Pino, M. (2012). El cultivo de rúcula. *Contacto Rural*. <https://contactorural.wordpress.com/2012/06/12/el-cultivo-de-rucula/>.
- Déleg, M. (2010). Tecnología led. *Electrónica digital*.
- Escobedo, M., Durón, S., García, J., García, V., and González, A. (2020). Radiación fotosintéticamente activa. *Memoria Universitaria*, 2(2). <https://revistas.uaz.edu.mx/index.php/MemUni/article/view/810>.
- FDM (2021). Cámara de crecimiento para la propagación y el crecimiento de cultivos arbóreos. <https://www.dellamarca.it/es/camara-crecimiento-para-propagacion-y-crecimiento-de-cultivos-arable>.
- Fillipo, V., Cano, H., and Chaves, J. (2010). Aplicaciones de iluminación con leds. *Scientia et*

technica, 16(45):13–18.

Garavito, J. and Angulo, S. (2023). *Desarrollo de un sistema prototipo para la conducción experimental del fenotipado y el monitoreo del crecimiento de plantas con el uso de luces LEDs en condiciones de laboratorio* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Gonzalez, A. and Cuentas, N. (2013). Análisis de imágenes hiperespectrales. *Revista Ingeniería & Desarrollo*, Volume 9(Nº 35):14–17. <https://hal.science/hal-00935014>.

Grupo-EMIN (2021). Bluepard mgc-450hp-2 plant growth chamber (450l, 2000w, 2 compressors, 50-90% rh).

Jaramillo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*, chapter 5. La radiación solar. Editorial BlanecolorLtda.

Montañez, J. (2017). *Desarrollo de sistema basado en microcontrolador para la automatización de un acuario* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de València, València, España.

Moreno, A. and Córcoles, S. (2018). *Arduino. Curso práctico*. Grupo Editorial Ra-Ma.

Peña, C. (2020). *Arduino IDE: Domina la programación y controla la placa*. RedUsers.

Pinzón, H., Laverde, H., and Clavijo, J. (1993). Producción de semilla de lechuga en Colombia. *Agronomía Colombiana*, 10(2):105–113. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/21253>.

Putnis, A. (1992). *Introduction to mineral sciences*. Cambridge University Press. p. 97. ISBN 0-521-42947-1.

RAE (2010). Lux. *Diccionario de la lengua española*. <https://dle.rae.es/lux>.

Reyes, C. (2008). *Microcontroladores PIC. Programación en Básico*. Carlos A. Reyes.

Robles, R. (2023). Luz led: el ingrediente saludable para la producción de alimentos sostenibles. *The Food Tech*. <https://thefoodtech.com/columnistas/luz-led-el-ingrediente-saludable-para-la-produccion-de-alimentos-sostenibles/>.

Rojas, L. A. (2019). *Estudio de Viabilidad de la Automatización del Proceso de Termoencogido de Producto Terminado en la Empresa Aldor*. [Proyecto aplicado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/27832>.

Rua, L. (2010). Tecnología e innovación como herramienta para experimentos con plantas. TECNAL. https://tecnal.com.br/es/blog/288_tecnologia_e_innovacion_comoherramienta_para_experimentos_con_plantas.

Sigüeñas, S. M. (2002). El cultivo de espinaca. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/920>.

Suárez, C. O. (2013). Implementación de un sistema de información para la fiee utilizando módulos de leds rgb. *Escuela politécnica nacional*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6057>.

Torres, H. (2014). Guía de diseño de pcb con eagle. *H. Torres-Ortega, Guía de Diseño PCB con*

EAGLE.

Vásquez, M. A. (2019). *Diseño y control electrónico de una matriz de leds RGB para la proyección de imágenes y texto alfanumérico* (tesis de maestría). Universidad Autónoma del estado de Morelos, Cuernavaca, México.

Zheng, Z., Ma, Z., Li, R., Wei, H., Chu, X., and Liu, H. (2021). Design method for improving illumination distribution uniformity of led plant growth light source. In *2021 18th China International Forum on Solid State Lighting 2021 7th International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLChina: IFWS)*, pages 202–210.

Álvarez, J. A. (1994). Automatización y automación. *Revista CINTEX*, 4:27–34.
<https://revistas.pascualbravo.edu.co/index.php/cintex/article/view/217>.

Apéndices

Apéndice A. Código para el control de los sistemas de iluminación y riego programado en

Arduino IDE

<https://create.arduino.cc/editor/marco1000001/f5925fdb-91fc-4fc2-b62b-29392d5602ed>

preview

Apéndice B. Código para el monitoreo fotografico con la Esp32-cam programado en Arduino

IDE

<https://create.arduino.cc/editor/marco1000001/af4e86c6-c401-4ec6-9415-abfcef1f9ba3>

preview

Nota. Adaptado de Esp32-cam-microsd. (2022, 17 abril). DroneBot Workshop.

Apéndice C. Costos sistema de iluminación con NeopiXels

Tabla 23*Tabla de costos sistema de iluminación con NeopiXels*

Cantidad	Descripción	Precio Unitario [\$]	Precio Total [\$]
2	Esp32-Cam	36000	72000
6	Módulo LM2596	8500	51000
4	Matriz Led RGB 8x8 WS2812	30000	120000
1	Sensor YL69	7000	7000
1	Relé 5[V]	7500	7500
1	Bomba agua	15000	15000
2	Ventilador	13000	26000
8	Borneras	800	6400
1	PCB	58000	58000
1	Articulos Varios	60000	60000
	Total		448900

Apéndice D. Costos cámara de crecimiento vegetal**Tabla 24***Tabla de costos cámara de crecimiento vegetal*

Cantidad	Descripción	Precio Total [\$]
1	Cámara de crecimiento vegetal modelo MGC-450-Hp-2	56783000

Apéndice E. Hoja de datos matriz de Neopixels 8x8 Ws2812

<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf>

Apéndice F. Imágenes de las plantas tomadas con la ESP32_CAM

[https://drive.google.com/drive/folders/1hXw5w41TkxVwL_ydYpGf0LsSu51Yjm6?](https://drive.google.com/drive/folders/1hXw5w41TkxVwL_ydYpGf0LsSu51Yjm6?usp=drive_link)

[usp=drive_link](https://drive.google.com/drive/folders/1hXw5w41TkxVwL_ydYpGf0LsSu51Yjm6?usp=drive_link)