

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**EFFECTO DE LA ILUMINACIÓN LED EN UN SISTEMA VERTICAL DE
PRODUCCIÓN CON LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) BAJO AMBIENTE
CONTROLADO**

JUDITH ANGELA ESPINAL CALANI

La Paz – Bolivia

2021

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

**EFFECTO DE LA ILUMINACIÓN LED EN UN SISTEMA VERTICAL DE PRODUCCIÓN
CON LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) BAJO AMBIENTE CONTROLADO**

Tesis de grado presentado
Para obtener el Título de:
INGENIERO AGRÓNOMO

JUDITH ANGELA ESPINAL CALANI

Asesores:

Ing. Ms. C. Hugo Bosque Sánchez _____

Ing. Rodrigo Quispe Pérez _____

Tribunal Revisor:

Ing. PhD. Carmen Rosa Del Castillo Gutierrez _____

Ing. Ms. C Juan José Vicente Rojas _____

Ing. Wiliams Murillo Oporto _____

APROBADO:

Presidente del tribunal examinador: _____

La Paz – Bolivia

2021

“Nosotros somos solo una parte de la solución para un gran problema. Seguimos necesitando visionarios y mucho trabajo por delante”.

Marc Oshima

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo incondicional y creer en mí.

A mi hermana y amigos, por animarme a continuar.

A los docentes, porque les debo gran parte de mis conocimientos.

A mis asesores, por su paciencia, enseñanza y comprensión.

A la universidad, por abrir sus puertas y formar buenos
profesionales.

Finalmente, a los estudiantes universitarios, porque querer, actuar
y creer, es poder.

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento para:

Mis padres, Natalio Eloy Espinal Coaquira y Ana Calani Quispe, por ser un apoyo incondicional y un pilar en mi formación como persona.

Al Ing. M.Sc. Hugo Bosque, por aceptar ser mi guía en este trabajo.

Al Ing. Rodrigo Quispe Perez, por su apoyo y enseñanza desinteresada durante el proceso de este proyecto.

A la Dra. Carmen Rosa Del Castillo, por incentivar a la realización del presente trabajo.

Ing. Juan José Vicente Rojas y al Ing. William Murillo Oporto, por demostrar su interés en la culminación de este proyecto.

A los ingenieros Frida Maldonado de Kalam, Humberto Chuquimia, José Barrios, que aportaron con ideas para concluir este trabajo.

A mi hermana y mis amigos por motivarme durante los momentos más difíciles y aportar su granito de arena plasmado en el presente documento.

A los docentes de la carrera, quienes aportaron sus conocimientos en mi formación profesional.

A la Universidad Mayor De San Andrés, por brindarme la oportunidad de aprender en sus aulas.

RESUMEN

El clima se ha tomado como un factor impredecible en los últimos tiempos mellando poco a poco en la forma de cultivo tradicional parcelario a campo abierto; no obstante, durante los periodos de crisis alimentaria, el aplicar nuevas tecnologías de cultivo coadyuvan a la mejora de rendimientos, productos alimenticios y generan gran expectativa para continuar innovando y creando sistemas de producción más eficientes.

Con ese propósito, el cultivar de lechuga es el más estudiado para implementar nuevas tecnologías debido a su sensibilidad con los factores de cultivo como la temperatura, el pH, entre otros, que lo hacen un buen elemento para realizar experimentos agrícolas incorporando nuevos sistemas de producción.

Como consecuencia la idea de proponer un sistema de producción iluminado con luz artificial empleando materiales de fácil alcance además de económicos como las cintas LED 5050-IP65, además de los estantes y el sistema hidropónico se realizaron de manera artesanal; entonces, se puede evaluar la energía y eficiencia de la iluminación respecto al cultivo para posteriormente conocer sus rendimientos y además de las características físico – químicas en un ambiente de laboratorio, no se encuentra tan fuera de la realidad debido a que la luz visible es percibida de manera muy diferente en las plantas que en los seres humanos.

Los tratamientos a emplear fueron de iluminación con luz blanca (T1), luz violeta (T2), y la combinación de luces roja y azul (T3) en un 50% cada una cuyo diseño experimental fue uno completamente al azar, para ello se empleó el programa de análisis estadístico SAS.

Los resultados de las variables a evaluar mediante el sistema fueron: la energía suministrada, la eficiencia fotosintética como variables de energía; el contenido de clorofila, el crecimiento de la planta, la longitud de hojas, el número de hojas como variables agronómicas; eficiencia de uso de superficie; contenido de nutrientes, contenido de materia seca, contenido de humedad como variables químicas; peso de planta, peso de órgano cosechado como variable rendimiento; terminando en el análisis económico.

Las plantas que crecieron bajo la influencia de luz violeta fueron las que obtuvieron buenos resultados en las variables de energía suministrada con $0,29 \mu\text{mol}$ y la eficiencia fotosintética con $6,05 \times 10^{-19} \mu\text{mol/J}$; los resultados significativos se obtuvieron en las variables porcentaje de nitrógeno con $0,21 \%$, el contenido de boro con $0,40 \%$, el contenido de humedad con $83,96 \%$, en la variable peso de planta y peso de hojas se obtuvieron resultados de $48,82 \text{ g}$ y $31,46 \text{ g}$ respectivamente; en cuanto a los resultados altamente significativos se obtuvieron en las variables la longitud de hoja con $18,9 \text{ cm}$.

La combinación de colores azul y rojo obtuvieron un resultado altamente significativo en la variable contenido de clorofila; en cuanto a la iluminación blanca, la variable materia seca tuvo un resultado significativo con $23,79 \text{ g}$ y el contenido de potasio obtuvo un resultado altamente significativo con $0,17 \%$; el análisis económico resulto con $31,54$ como beneficio neto para la iluminación violeta señalándola como mejor opción.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación	4
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Cultivo de lechuga	4
3.1.1. Taxonomía	4
3.1.2. Características del cultivo de lechuga	5
3.1.3. Variedades del cultivo	5
3.1.4. <i>Lactuca sativa</i> variedad Boston White	6
3.1.5. Propiedades nutritivas de la Lechuga	7
3.1.6. Requerimientos nutricionales	7
3.2. Cultivos hidropónicos	7
3.2.1. Métodos de cultivo en hidroponía	8
3.2.2. Experiencia de los cultivos hidropónicos	9
3.3. Fuentes de luz en la producción de plantas	9
3.3.1. Fuente natural	9
3.3.2. Fuente artificial	10
3.4. Importancia de la luz	10
3.4.1. Función de la luz	11
3.4.2. Luz visible	11
3.5. Absorción de luz por vegetales	11
3.5.1. Energía	11
3.5.2. Fotosíntesis	12
3.5.3. Fase luminosa	12
3.5.4. Fase oscura	13
3.5.5. Clorofila y pigmentos	13
3.6. Iluminación artificial	13
3.6.1. Ventajas	14

3.6.2.	Iluminación LED.....	14
3.6.3.	Intensidad luminosa.....	15
3.6.4.	Flujo luminoso.....	15
3.6.5.	Iluminancia.....	16
3.6.6.	Características del LED.....	16
3.7.	Aplicación de los diodos LED.....	18
3.7.1.	Clasificación según la radiación emitida.....	18
3.7.2.	Cinta A LED 5050 – IP65.....	19
3.8.	Sistemas de producción.....	19
3.8.1.	Producción al aire libre.....	20
3.8.2.	Producción en ambiente protegido.....	20
3.8.3.	Agricultura en interiores.....	20
3.9.	Experiencia del empleo de luz LED en agricultura.....	21
3.9.1.	Aplicaciones.....	22
3.9.2.	Instalación agrícola.....	23
3.9.3.	Cámara climatizada.....	23
3.9.4.	Nave agrícola.....	23
3.9.5.	Contenedor.....	23
3.10.	Análisis económico de experimentos agrícolas por presupuestos parciales.....	24
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
4.1.	Materiales.....	25
4.1.1.	Materiales de estudio.....	25
4.1.2.	Materiales de trabajo.....	25
4.1.3.	Materiales de gabinete.....	25
4.2.	Metodología.....	25
4.2.1.	Procedimiento experimental.....	26
4.2.2.	Diseño experimental.....	28
4.2.3.	Tratamientos.....	28
4.2.4.	Análisis estadístico.....	29
4.2.5.	Croquis experimental.....	29
4.3.	Variables de estudio.....	31
4.3.1.	Intensidad lumínica.....	31
4.3.2.	Tiempo de iluminación.....	31

4.3.3.	Temperatura	31
4.3.4.	Humedad relativa.....	31
4.3.5.	Desarrollo del cultivo.....	31
4.4.	Variables de respuesta	31
4.4.1.	Energía del sistema:	31
4.4.2.	Variables agronómicas	32
4.4.3.	Eficiencia del uso de superficie.....	33
4.4.4.	Características físico químicas	33
4.4.5.	Rendimiento.....	33
4.4.6.	Análisis económico	33
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
5.1.	Energía del sistema.....	34
5.1.1.	Energía suministrada	34
5.1.2.	Eficiencia fotosintética	35
5.2.	Variables agronómicas	36
5.2.1.	Contenido de clorofila a la cosecha	36
5.2.2.	Crecimiento de la planta	37
5.2.3.	Longitud de hoja	40
5.2.4.	Número de Hojas	41
5.3.	Eficiencia del uso de superficie	42
5.4.	Características físico – químicas.....	43
5.4.1.	Contenido de nutrientes.....	43
5.4.2.	Materia Seca.....	47
5.4.3.	Contenido de humedad.....	49
5.5.	Rendimiento	50
5.5.1.	Peso de planta completa	50
5.5.2.	Peso de órgano cosechado	51
5.6.	Análisis de costos parciales	52
6.	CONCLUSIONES	54
7.	RECOMENDACIONES	56
8.	BIBLIOGRAFÍA	57
9.	ANEXOS.....	61
9.1.	Comandos empleados en el programa SAS	62

9.2. Glosario	64
9.3. Figuras	68
9.4. Anexos, metodología.....	71

INDICE DE TABLAS

<u>Tabla 1: Clasificación taxonómica del cultivar de lechuga variedad boston white</u>	4
<u>Tabla 2: Requerimiento de nutrientes para lechuga en ppm o mg/l.</u>	7
<u>Tabla 3: Comparación de iluminancia Harper</u>	16
<u>Tabla 4: Características de la cinta A LED 5050 IP-65</u>	19
<u>Tabla 5: Energía suministrada por colores</u>	34
<u>Tabla 6: Eficiencia fotosintética</u>	35
<u>Tabla 7: Unidades de energía en μmolKJ</u>	35
<u>Tabla 8: Análisis de varianza del contenido de clorofila con $\alpha=0,05$</u>	36
<u>Tabla 9: Prueba Duncan del contenido de clorofila con $\alpha=0,05$</u>	37
<u>Tabla 10: Análisis de varianza de la variable longitud de hoja con $\alpha=0,05$</u>	40
<u>Tabla 11: Prueba Duncan de la variable longitud de hoja</u>	40
<u>Tabla 12: Análisis de varianza de la variable número de hojas a la cosecha con $\alpha=0,05$</u>	41
<u>Tabla 13: Cantidad de superficie en relación al número de estantes</u>	42
<u>Tabla 14: Análisis de varianza de la variable porcentaje de nitrógeno con $\alpha=0,05$</u>	43
<u>Tabla 15: Prueba Duncan del porcentaje de nitrógeno</u>	44
<u>Tabla 16: Análisis de varianza del contenido de fósforo con $\alpha=0,05$</u>	45
<u>Tabla 17: Análisis de varianza del contenido de potasio $\alpha=0,05$</u>	45
<u>Tabla 18: Prueba Duncan del contenido de potasio</u>	46
<u>Tabla 19: Análisis de varianza de la variable contenido de boro $\alpha=0,05$</u>	46
<u>Tabla 20: Prueba Duncan del contenido de boro</u>	47
<u>Tabla 21: Análisis de varianza de la variable materia seca $\alpha=0,05$</u>	47
<u>Tabla 22: Prueba Duncan de la variable materia seca</u>	48
<u>Tabla 23: Análisis de varianza de la variable del contenido de humedad $\alpha=0,05$</u>	49
<u>Tabla 24: Prueba Duncan del contenido de humedad</u>	49
<u>Tabla 25: Análisis de varianza de la variable peso de planta $\alpha=0,05$</u>	50
<u>Tabla 26: Prueba Duncan de la variable peso de planta</u>	50
<u>Tabla 27: Análisis de varianza de la variable peso de hojas $\alpha=0,05$</u>	51
<u>Tabla 28: Prueba Duncan de la variable peso de hojas</u>	51
<u>Tabla 29: Análisis de costos parciales mediante análisis económico de experimentos agrícolas</u>	52
<u>Tabla 30: Análisis de dominancia</u>	53

INDICE DE FIGURAS

<u>Figura 1: Vista de planta del croquis experimental</u>	29
<u>Figura 2: Vista frontal del croquis experimental</u>	30
<u>Figura 3: Vista inferior de nivel con el marco de plantación del cultivo</u>	30
<u>Figura 4: Vista superior de nivel con la distancia entre luces LED</u>	30
<u>Figura 5: Crecimiento promedio con luz blanca</u>	38
<u>Figura 6: Crecimiento con luz violeta</u>	38
<u>Figura 7: Crecimiento promedio con combinación azul y rojo</u>	39
<u>Figura 8: Shigeharu Shimamura, la mente maestra tras la tecnología del uso de luces LED para los cultivos in door en Japón</u>	68
<u>Figura 9: Mirai.co fábrica de plantas a cargo de shimamura</u>	68
<u>Figura 10: Fábrica de plantas en Nueva Jersey</u>	68
<u>Figura 11: Lechuga romama casaca</u>	68
<u>Figura 12: Lechuga acogollada</u>	68
<u>Figura 13: Lechuga de hoja suelta</u>	68
<u>Figura 14: Lechuga esparrago</u>	68
<u>Figura 15: Longitud de onda en fase semillero</u>	68
<u>Figura 16: Longitud de onda en fase de crecimiento vegetativo</u>	69
<u>Figura 17: Longitud de onda en fase floración</u>	69
<u>Figura 18: Color según la temperatura de la luz (temperatura de color)</u>	69
<u>Figura 19: Diferencia de luz blanca según la temperatura</u>	69
<u>Figura 20: Rendimiento de color de la iluminación LED</u>	69
<u>Figura 21: Panasonic y cultivos en su planta de Singapur</u>	69
<u>Figura 22: Fábrica en Kyoto, Japón</u>	70
<u>Figura 23: Philips leds apoya a la producción con luz artificial</u>	70
<u>Figura 24: Instalación agrícola con la marca Philips terminad</u>	70
<u>Figura 25: Proyecto innovatus de la marca Phillips, cámara climatizada terminada</u>	70
<u>Figura 26: Nave agrícola, marca Phillips</u>	70
<u>Figura 27: Contenedor de plantas del proyecto Ecobain, marca Phillips</u>	70
<u>Figura 28: Instalación de luces, de iluminación la cinta ALED 5050 – IP65</u>	70
<u>Figura 29: Soldado de luces con los cables</u>	70
<u>Figura 30: Timer SONOFF® ired wifi socket</u>	70
<u>Figura 31: Aplicación Ewelink, registro de estado del dispositivo</u>	70
<u>Figura 32: Aplicación Ewelink, control de encendido y apagado del dispositivo</u>	70
<u>Figura 33: Germinación de las plantas de lechuga</u>	72
<u>Figura 34: Crecimiento de las plantas de lechuga bajo luz blanca</u>	72
<u>Figura 35: Crecimiento de lechuga con luz violeta</u>	72
<u>Figura 36: Crecimiento de lechuga con luz bicolor (rojo y azul)</u>	72
<u>Figura 37: Tratamiento T1 con iluminación blanca</u>	72
<u>Figura 38: Medición de planta, con iluminación violeta</u>	72
<u>Figura 39: Tratamiento T2 con iluminación violeta</u>	73
<u>Figura 40: Tratamiento T3 con iluminación bicolor</u>	73
<u>Figura 41: Medición de la planta con iluminación violeta</u>	73
<u>Figura 42: Planta de lechuga con iluminación blanca</u>	73

<u>Figura 43: Iluminación blanca a los 100 días.....</u>	73
<u>Figura 44: Iluminación violeta a los 100 días.....</u>	73
<u>Figura 45: Iluminación bicolor (Azul y Roja), planta de lechuga iluminada con luz artificial</u>	74
<u>Figura 46: Pesado de muestra iluminado con luz blanca</u>	74
<u>Figura 47: Pesado de muestra iluminado con luz violeta</u>	74
<u>Figura 48: Pesado de muestra iluminado con luz bicolor (Azul y Rojo).....</u>	74
<u>Figura 49: Contenido de clorofila en luz blanca mediante equipo OPTI-SCIENCES en planta.....</u>	74
<u>Figura 50: Contenido de clorofila en luz violeta, mediante equipo OPTI-SCIENCES en planta.....</u>	74
<u>Figura 51: Contenido de clorofila en iluminación azul y rojo, mediante equipo OPTI-SCIENCES en planta</u>	75
<u>Figura 52: Peso de muestras secas</u>	75
<u>Figura 53: Plantas con luz LED blanca.....</u>	75
<u>Figura 54: Plantas con luz LED combinación azul y rojo.....</u>	75
<u>Figura 55: Plantas con luz LED violeta.....</u>	75
<u>Figura 56: Resultados del análisis de laboratorio</u>	¡Error! Marcador no definido.

1. INTRODUCCIÓN

Las inclemencias del tiempo, la migración de la población rural, son un problema latente al cual se enfrentan las comunidades rurales en estas últimas décadas; con el calentamiento global que afecta las parcelas de cultivo de los productos agropecuarios, las plagas y enfermedades que ocasionan daños y perjuicios en la producción de alimentos no garantiza la seguridad alimentaria; la población rural más joven, opta por abandonar los campos y decide iniciar su vida en el área urbana, disminuyendo así la producción de alimentos que generan un alza de precios en la canasta familiar y escasez de los productos agrícolas que son de primera necesidad. Los pobladores que quedan cultivando la tierra, no generan el alimento suficiente para la creciente demografía de las ciudades y sobreviven con lo poco que la madre tierra puede ofrecer, a parte que el campesino vive en surcufundio clara muestra de que hay carencia de tierra para cultivar así mismo en la producción agrícola no es factible mecanizar ya que cada familia usufructúa un terreno menor a una hectárea como máximo que además es parcelada, la cual, posteriormente, es dividida en sucesión hereditaria convirtiéndose la tierra en pequeños surcos.

Países como India y China ya han demostrado que la agricultura tradicional ha fracasado. Los agricultores, empobrecidos por los sueldos bajos tras enormes cambios en el clima han tenido que abandonar el campo e irse a los entornos urbanos afirma el profesor Dickson Despommier, según (Rojo, 2018).

La pregunta surge a los que deciden innovar mediante los estudios, el cómo mejorar y mantener la seguridad alimentaria del país. Estas dificultades nos hacen pensar en investigar alternativas de cultivo a grandes cantidades en áreas pequeñas, aprovechando el espacio de cada metro cuadrado para cultivar de forma eficiente además mejorando la producción para que de esta manera se pueda solucionar la escasez de alimentos, por eso, se realizó este trabajo de investigación, como una alternativa más de obtener alimentos sanos, saludables e incrementar la producción.

1.1. Antecedentes

La producción agrícola a nivel mundial y nacional se ha visto afectada por diversos factores; el crecimiento poblacional y el cambio climático principalmente, ocasionando insuficientes alimentos, baja producción y calidad no aceptable de los alimentos.

Urey (2007) mencionado por Quispe, (2015) señala que la producción hidropónica en el Sistema NFT en predios de la Universidad de San Simón Cochabamba - Bolivia donde la variedad Crespa es la que mayor rendimiento obtuvo (42,375 t/ha), seguido de la variedad Romana con 40,585 t/ha, y por último la variedad Blanca con un rendimiento de 33,062 t/ha. Correspondiendo la respuesta varietal y genética de las variedades Crespa y Romana que son las que mejor respondieron al sistema hidropónico re circulante.

Intipampa, (2014) comparte que los estudios realizados en dos variedades de lechuga donde los resultados obtenidos bajo las condiciones climáticas del municipio de Caranavi el cultivar que mayor rendimiento presentó en la comunidad de Santa Fe es Grand Rapids “Bonanza” con 1,96 kg/m² y menor rendimiento para Waldmann Green con un valor de 1,88 kg/m² para Waldmann Green y de 1,78 kg/m² y en Bolinda es de 1,88 kg/m² para Grand Rapids “Topseed”.

Las granjas verticales surgen como alternativa a la agricultura urbana junto al crecimiento de la población de las ciudades para consumir alimentos. Este método es empleado por japoneses para cultivar alimentos en edificios y de esta manera poder distribuir a la ciudadanía alimentos frescos, orgánicos, evitando al mismo tiempo costos por transporte y almacenamiento; esta práctica permite la siembra en espacios pequeños, es hidropónico e independiente a las condiciones climáticas exteriores por que el productor puede controlar la luz, humedad y temperatura en el interior del edificio (Mannise, 2016).

El cultivo interior más grande del mundo se ha puesto en marcha en Kashiwa, en Japón, cerca de Tokio. El proyecto corre a cargo del fisiólogo Shigeharu Shimamura, que fraguó la idea mientras trabajaba en una de las zonas afectadas por el terremoto y el tsunami de 2011. Shimamura ha adaptado una antigua fábrica de Sony y ahora produce 10.000 lechugas al día. Se sirve de 17.500 LED para proporcionar luz a los cultivos, que están colocados en 16 alturas. (Bejerano, 2014) (Ver figuras 1 y 2 en anexos).

Otro encargado de este proyecto en Japón es Shinji Inada quien explicó que la idea es de contribuir a la producción existente, empleando luces LED y reutilizando el agua en los cultivos; además permite multiplicar la superficie cultivable prácticamente sin gasto de superficie (Mannise, 2016).

En Newark, Nueva Jersey, en pleno corazón de una localidad tradicionalmente considerada como desierto alimentario, la pequeña puerta trasera de una de estas naves se abre hacia un entorno esterilizado cuya luz, temperatura y humedad están controladas al segundo por ordenador y donde crecen, felizmente, hasta 20 variedades de plantas comestibles sin tierra, luz natural, ni riego convencional (Rojo, 2018) (ver figura 3 en anexos).

Recién en 2012, en Singapur, se abrió la primera granja vertical comercial. Desde entonces, gracias a nuevas tecnologías que permiten reducir el gasto energético, se han ido sumando otros proyectos, localizados, en su mayoría, en Estados Unidos y el continente asiático. (Lastra, 2015)

Rojo, (2018) informa que Marc Oshima, cofundador de la granja vertical Aerofarms y responsable de marketing y comunicación en la empresa, *nos da la bienvenida y nos pide que firmemos unos formularios de seguridad, tras un minucioso proceso de descontaminación del exterior, nos invita a la particular huerta de la empresa. La enorme sala, de iluminación blanquecina y un suave ruido sordo de ventiladores, comprende hileras en las que se apilan hasta 21 niveles de grandísimas bandejas sobre las que crecen verduras a distintas velocidades.*

En Alemania funcionan establecimientos como Infarm, un concepto aún más completo cuya misión es acoger, en un mismo edificio, una superficie de alimentación en cuya planta baja exista un supermercado, con una vitrina de cristal a través de la que se pueda ver dónde y cómo crecen las plantas, probarlas y escogerlas prácticamente en su momento álgido de maduración, una especie de una huerta urbana "al minuto" (Rojo, 2018).

La tecnología LED hace realidad el sueño de cultivar en pequeñas superficies de interior, porque proporcionan el espectro de luz óptimo para ello y permiten utilizar varias capas para aumentar al máximo la producción (Philips, 2020).

En nuestro país, este tipo de agricultura no ha sido adaptado por ningún productor, debido a los costos altos de inversión que requiere, no obstante, esta idea innovadora podría reducir los costos de producción y mejorar la calidad del alimento a largo plazo; también se podrían adaptar algunas variedades de hortalizas, además de que la población podría consumir alimentos sanos, a buenos precios y frescos todos los días para mejorar su nutrición y la de sus familias.

1.2. Planteamiento del problema

En este momento, la mitad de la población mundial vive en ciudades y se estima que, para el 2025, las dos terceras partes de la población mundial vivirán en áreas urbanas (García, 2010); dada la creciente demografía que presenta el planeta, el problema de la alimentación está latente; con el desgaste de los suelos y la contaminación, los productos alimenticios ya no nos brindan los mismos beneficios de antes.

El cambio climático también hace su parte, inundaciones, sequías, desertificación, ya son temas muy comunes en nuestros días; el factor climático ya no nos es favorable.

Para poder enfrentarnos a esta situación, se deben optar por alternativas de producción de cultivos (abonamiento, manejo integrado de plagas y biofertilizantes), más amigables con el medio ambiente.

Suzuki, (2014) expresa lo siguiente: *nuestro enfoque inicial era primero identificar con precisión las necesidades y luego crear algo para un futuro más brillante. Sufrimos daños, pero decidimos aprender y mejorar la experiencia pasada. El problema existente, la escasez de alimentos renovó la comprensión de la importancia de los productos alimenticios*¹.

Como respuesta a este problema, surge la idea de producir en interior y haciendo uso adecuado de la tecnología con luces led como una forma de cooperar con la seguridad alimentaria con ayuda de la agricultura urbana; como alternativa ante el problema de la escasez de alimentos y bajo un ambiente controlado, puede brindarnos mayores rendimientos con mejor calidad, alimentos frescos, orgánicos y a gran escala, aprovechando cada metro cuadrado en vertical de las instalaciones.

¹ Texto traducido al inglés del japonés, versión en inglés en anexos como texto 1

1.3. Justificación

Debido al cambio climático la producción a campo abierto se ve amenazada, entonces es necesario optar por alternativas que sean amigables con el medio ambiente además de brindar alimentos de calidad y así poder contribuir a la seguridad alimentaria.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la iluminación LED en un sistema vertical de producción con lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo ambiente controlado.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar la energía y eficiencia de los emisores de luz LED respecto al cultivo.
- Evaluar las características físico – químicas del cultivo.
- Conocer los rendimientos de la producción de lechuga hidropónica con luz artificial.
- Análisis de costos parciales de producción para el cultivo de lechuga con luz artificial.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Cultivo de lechuga

Casaca, (2015) indica que la lechuga es una hortaliza que se consume en fresco, su contenido de agua es alto, además posee un bajo valor energético, por lo que puede utilizarse en las dietas hipocalóricas o para disminuir de peso.

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 (Japon, 1977).

3.1.1. Taxonomía

Saavedra et al, (2017) señalan que la lechuga pertenece a la familia dicotiledónea más grande del reino vegetal, la Asteraceae. La lechuga presenta una gran diversidad, dado principalmente por los diferentes tipos de hojas y hábitos de crecimiento de las plantas. Esto ha llevado a diversos autores a distinguir variedades botánicas en la especie, existiendo varias que son importantes como cultivos hortícolas en distintas regiones del mundo.

La clasificación botánica de la lechuga de acuerdo a Saavedra et al, (2017) es la siguiente:

Tabla 1: clasificación taxonómica del cultivar de lechuga variedad boston white.

Clase	Magnoliopsida
Orden	Asterales
Familia	Asteraceae
Género	Lactuca
Especie	L sativa. L
Nombre Científico	Lactuca sativa. L
Nombre Común	Lechuga
Variedad	Boston White

3.1.2. Características del cultivo de lechuga

La lechuga es una planta anual autógena, que posee una raíz pivotante, relativamente gruesa en la corona que se adelgaza gradualmente en profundidad, la cual puede alcanzar más de 60 cm (Saavedra, y otros, 2017).

Los mismos autores indican que las hojas sésiles están distribuidas en forma de espiral, en una roseta densa alrededor de un tallo corto. Hay una considerable diversidad de colores, formas, tipos de superficies, márgenes y textura entre los diversos tipos y formas de lechuga. Los grados de color verde de las hojas pueden variar desde oscuros a claros, pero la cualidad de verde puede ser variado por tintes amarillentos. Además, la presencia de antocianinas puede estar en toda la hoja o en sectores dando tonalidades diferentes.

Desde el punto de vista agronómico, en el ciclo de cultivo de la mayor parte de las lechugas se distinguen las siguientes fases:

- Fase de formación de una roseta de hojas.
- Fase de formación de un cogollo más o menos compacto.
- Fase de reproducción o de emisión de un tallo floral.

De las tres fases, la segunda es la que más difiere de acuerdo al tipo de lechuga y a las distintas variedades, ya que el acogollado es de carácter genético cuantitativo y acarrea conjuntamente, plantas con hojas anchas en la base (Theodoracopoulos, Lardizabal, & Arias, 2009).

3.1.3. Variedades del cultivo

Según Casaca, (2015) las variedades de lechuga se pueden clasificar en los siguientes grupos botánicos: (ver figuras 4, 5, 6 y 7 en anexos)

- Romanas: *Lactuca sativa var. Longifolia*, no forman un verdadero cogollo, las hojas son oblongas, con bordes enteros y nervio central ancho, ejemplo: la Romana y la Baby.

- Acogolladas: *Lactuca sativa* var. *Capitata*, estas lechugas forman un cogollo apretado de hojas, ejemplo: Batavia, Mantecosa o Trocadero, Iceberg.
- De hojas sueltas: *Lactuca sativa* var. *Inybasea*, son lechugas que poseen las hojas sueltas y dispersas, ejemplo: Lollo Rossa, Red Salad Bowl, Cracarelle.
- Lechuga espárrago: *Lactuca sativa* var. *Augustaza*, son aquéllas que se aprovechan por sus tallos, teniendo las hojas puntiagudas y lanceoladas. Se cultivan principalmente en China y la India.

3.1.4. *Lactuca sativa* variedad Boston White

Son lechugas de excelente calidad culinaria, con hojas tiernas, de aspecto aceitoso. Forman una cabeza floja, con poca resistencia al transporte. En las zonas de valles se las cultiva bajo invernáculo. Se pueden sembrar desde principios de primavera hasta principios de otoño (Sipan.inta, 2020).

a) Características

Posee una raíz pivotante y las raíces laterales se desarrollan en los primeros 30 centímetros del perfil del suelo. El tallo es muy corto con una roseta de hojas que varían en tamaño, color y textura de acuerdo con las cultivares (Sipan.inta, 2020).

Agroactiva, (2020) describe que necesita altos niveles de nutrientes y terrenos que drenen bien y por tanto no se genere pozos o se inunde. Algunos recomiendan el uso de humus, el cual deja pasar y absorbe humedad en el proceso de riego. Estas plantas suelen darse en terrenos de pH de 6 a 7 y evitan los terrenos arcillosos.

b) Condiciones edafoclimáticas

Agroactiva, (2020) señala que el cultivar crece en suelos húmedos, pero que no se inunde, que tenga una buena capacidad para drenar el agua. Esto le permitirá a la lechuga desarrollarse más tierna y exquisita.

Por otra parte Sipan.inta, (2020) señala que es una especie que se desarrolla mejor en clima templado fresco. Las temperaturas del suelo para germinación son:

- Máxima: 29,4 °C; óptima: 24 °C y mínima: 1,6 °C.

Las condiciones de temperatura para lograr un buen crecimiento del cultivo y buena calidad de plantas son:

- Promedio mensual óptimo: 15 – 18 °C.
- Promedio mensual máximo: 21 – 24 °C.
- Promedio mensual mínimo: 7 °C.

Los días cálidos y noches frescas son ideales para la obtención de lechugas de calidad. Las altas temperaturas producen sabor amargo, cabezas poco firmes y floración prematura. Las temperaturas bajas y las heladas suaves no dañan a las plantas pequeñas que crecen con mayor lentitud, pero sí afectan a las plantas maduras dañando las hojas exteriores. Los mejores suelos para el cultivo son los de textura arcillo-arenosa con elevado contenido de materia orgánica y bien drenada. El pH óptimo está alrededor de 6 – 7; los pH ácidos (cerca de 5) disminuyen sensiblemente los rendimientos.

3.1.5. Propiedades nutritivas de la Lechuga

Estas verduras aportan muy pocas calorías por su alto contenido en agua y su escasa cantidad de hidratos de carbono, proteínas y grasas. En cuanto a su contenido en vitaminas, podemos mencionar —con aportes poco significativos— la presencia de vitamina C, folatos y provitamina A (b-carotenos). La tiamina y vitamina E, se encuentran en menores proporciones declara Agroactiva, (2020).

Según Michelena (2003) citado por Quispe, (2015), la lechuga es un alimento que aporta muy pocas calorías por su alto contenido en agua, su escasa cantidad de hidratos de carbono y menor aún de proteínas y grasas. En cuanto a su contenido en vitaminas, destaca la presencia de folatos, pro vitamina A o beta-caroteno, y vitaminas C y E, la vitamina A, además de tener propiedades antioxidantes.

También resulta una fuente importante de vitamina K, con lo que protege ante la osteoporosis. Otras vitaminas que destacan en la lechuga son la A, E y ácido fólico. Está compuesta en un 94% de agua y aporta mucho potasio y fósforo, Colinagro (2008) citado por Quispe, (2015).

3.1.6. Requerimientos nutricionales

Pomares y Ramos (2010) citado por Pastor J. , (2020) mencionan que el cultivo de lechuga se caracteriza por una alta demanda de fosforo en su etapa inicial que lo hace susceptible a su carencia al igual que el nitrógeno.

La cantidad de nutrientes requeridos por el cultivo depende de la cantidad de biomasa que genere, por lo tanto depende de la variedad del cultivo y el ciclo en el que se encuentre. Para una producción de 35 ton/ha el requerimiento nutricional es de 80 – 100 kg/ha de nitrógeno, 30 – 50 kg/ha de fosforo y 160 – 210 kg/ha de potasio.

Según Resh (1987), y también mencionado por la “Guía del Huerto Hidropónico” de Perú (2000) mencionados por Rodriguez, (2018), indican que para la producción de lechuga, se tiene la siguiente relación de macro y micro nutrientes en la tabla 2.

Tabla 2: Requerimiento de nutrientes para lechuga en ppm o mg/l.

N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
200	50	210	200	50	113	5	0.5	0.1	0.1	0.5	0.05

3.2. Cultivos hidropónicos

El cultivo sin tierra de plantas cultivadas se extendió como resultado de las técnicas de cultivo empleadas por los fisiólogos vegetales en experimentos de nutrición vegetal (Rodriguez, 2018).

Con la producción sin suelo se obtienen hortalizas de excelente calidad y sanidad, y se asegura un uso más eficiente del agua y fertilizantes. Los rendimientos por unidad de área cultivada son altos, por la mayor densidad y la elevada productividad por planta. Actualmente la hidroponía es el método más intensivo de producción hortícola; generalmente es de alta tecnología lo que implica altos costos de establecimiento

(Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria “DICTA”, 2002, citado por Cordova, 2005).

Los métodos más recientes de cultivo sin tierra difieren en algunos detalles, pero tienen dos rasgos comunes: los nutrientes se aportan en soluciones líquidas y las plantas se sostienen sobre materiales porosos, como espuma sintética, turba, arena, grava o fibra de vidrio, las cuales actúan como soporte (Rodríguez, 2018).

3.2.1. Métodos de cultivo en hidroponía

Las mayores ventajas del cultivo hidropónico frente al tradicional son una mayor eficiencia en la regulación de nutrición, su posibilidad de empleo en regiones del mundo que carecen de tierras cultivables, una utilización más eficiente del agua y fertilizantes, más fácil y bajo costo de desinfección del medio, así como una mayor densidad de plantación que nos conduce a un incremento de cosecha por área (Sánchez, 2004; citado por Rodríguez, 2018).

En la hidroponía, se hunden las raíces de las plantas directamente en el agua que circula en circuito cerrado y en la cual se inyectan nutrientes para el crecimiento de las plantas (nitrógeno, potasio y fósforo). Ya que utiliza poca agua y que no requiere pesticidas, el cultivo hidropónico aparece más sostenible que la agricultura tradicional aunque los nutrientes utilizados son a menudo abonos minerales que proceden de la industria química (Amazings®, 2016).

a) Sistema de raíz flotante

Las plantas se encuentran en planchas de poliestireno expandido que flotan sobre el agua con sus raíces sumergidas en una solución nutritiva en donde la plancha actúa como soporte mecánico (DICTA, 2002, mencionado por Cordova, 2005).

b) Sistema aeropónico.

Duran (2000) mencionado por Cordova, (2005), lo define como una columna de cultivo en un cilindro de PVC, colocado en posición vertical, con perforaciones en las paredes laterales, por donde se introducen las plantas en donde las raíces crecen en oscuridad y pasan la mayor parte del tiempo expuestas al aire. Por el interior del cilindro una tubería distribuye la solución nutritiva mediante pulverización media o baja presión.

c) Sistema Nutrient Film Technic (NFT).

Carrasco (1996), mencionado por Cordova, (2005) indican que el principio de este sistema hidropónico consiste en la circulación constante de una lámina fina de solución nutritiva a través de las raíces, no existiendo pérdida o salida al exterior de la solución nutritiva, por lo que se constituye en un sistema de tipo cerrado.

DICTA (2002) citado por el mismo autor, agrega que el sistema consiste en recircular la solución por una serie de canales de Cloruro de Polivinilo (PVC) de un diámetro de 4 a 6 pulgadas, el agua junto con la solución nutritiva circula por medio de los tubos mediante una bomba, los tubos están apoyados sobre mesas o armazón, y tiene una ligera

pendiente que facilita la circulación de la solución, la que posteriormente es recolectada y almacenada en un tanque, la cual es recirculada nuevamente.

Por los canales recorre una película de solución nutritiva de apenas 3 a 5 mm, además a esta técnica se le conoce como sistema de recirculación continua al ser un sistema cerrado, y es por esto que las raíces están en constante contacto con la solución, la que les proporciona oxígeno y nutrientes (Alvarado et al., 2001 citado por Cordova, 2005).

3.2.2. Experiencia de los cultivos hidropónicos

La hidroponía es considerada como un sistema de producción agrícola apto para la siembra de hortalizas, plantas ornamentales y medicinales, almácigos, forrajes, producción de algas y semillas certificadas en lugares donde estos productos son de difícil accesibilidad, pudiendo ser posible la obtención de varias cosechas al año y de la misma especie (Malca, 2001 citado por Siñani, 2017).

Resh (1997) mencionado por Siñani, (2017), mencionan que en cuanto a la salud y alimentación, este sistema es importante porque la hidroponía provee de alimentos frescos de alto valor nutritivo (vitaminas, proteína, fibra y minerales), siendo mejor la calidad del producto, ante la menor presencia de plagas y enfermedades y por lo tanto de contaminación de productos tóxicos por el menor uso de pesticidas, contribuyendo así en la conservación del medio ambiente.

3.3. Fuentes de luz en la producción de plantas

3.3.1. Fuente natural

Cada organismo ha adoptado diferentes sistemas para captar el nivel óptimo de radiación solar; los vegetales tienden a crecer hacia las zonas de mayor intensidad luminosa, pues aprovechan esta para la fotosíntesis; las plantas del estrato herbáceo de un bosque hacen coincidir su periodo reproductivo con la caída de las hojas de los árboles y arbustos circundantes, pues entonces disponen de mayor cantidad de luz (Martul, 1986).

a) Luz solar

La importancia de la luz solar, reside en que es la principal fuente de energía, sin la cual la vida no podría existir, su incidencia directa sobre las células provoca la muerte. Por consiguiente la biosfera ha tenido que evolucionar de forma que solo lleguen a hasta la Tierra los componentes útiles de la luz y que se atenúen o eliminen los perjudiciales (Martul, 1986).

La luz solar llega a toda la superficie de la hoja, considerando que esta es el 100%, se puede observar que la luz absorbida, en este proceso es mínima, en vista que se va perdiendo en forma de calor, de reflexión, de transmisión como se describe a continuación:

La luz reflejada (10 – 15 %), es la luz que llega a la hoja y no es absorbida si no desviada.

La luz transmitida (5%), es la luz que traspasa la hoja, semejante al vidrio que deja pasar la luz.

La luz absorbida (80 – 85%), es la que penetra a la hoja y se pierde por calor, en el proceso de transpiración por evaporación del agua. Parte de esta luz se utiliza para la fotosíntesis (5 – 3,5%) (Maldonado, 2013).

3.3.2. Fuente artificial

Jimenez C. , (1997) clasifica la luz artificial en:

- a) Emisores de origen térmico: utilizan la combustión de un medio oxigenado (bujías, lámparas de aceite y gas).
- b) Lámparas de incandescencia: contienen una atmósfera gaseosa (halógenos, xenón, criptón y argón).
- c) Fuentes de tipo luminiscente: son lámparas de descarga en atmósfera gaseosa y con adición de metales en forma de halogenuros, yoduros, tierras raras, mercurio, yodo y sodio.
- d) Fuentes de tipo foto luminiscente: como diodos emisores de luz semiconductores (LED), luminarias de emergencia y pinturas luminiscentes.
- e) Lámparas fluorescentes: deben su funcionamiento a la luminiscencia y fotoluminiscencia.
- f) Lámparas de inducción: donde se integran luminiscencia, fotoluminiscencia e inducción magnética.

3.4. Importancia de la luz

Absorción de luz por vegetales: la energía de cada fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda, por lo que las longitudes de onda azul y violeta tienen fotones más energéticos que las longitudes del rojo y del anaranjado, que son las más largas (Salisbury & Ross, 2000).

Los mismos autores indican que el proceso global de la fotosíntesis es la oxidación del agua (eliminación de electrones con liberación de O₂ como subproducto) y la reducción del CO₂ para formar compuestos orgánicos.

Por otra parte Almansa, (2011) señala que, la luz artificial en los cultivos puede cumplir tres objetivos importantes:

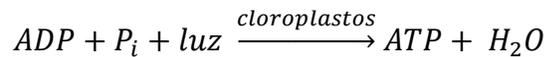
- a) Proporcionar cantidad suficiente de energía para la fotosíntesis.
- b) Proporcionar el espectro energético adecuado, es decir, la luz debe tener la composición espectral adecuada.
- c) Proporcionar energía durante el fotoperiodo, tanto si se aplica sobre plantas de día corto o largo.

La energía lumínica es transformada, en el cloroplasto, en energía química por medio de dos unidades funcionales diferentes denominados fotosistemas, impulsa la transferencia de electrones y también genera moción de protones para la síntesis de ATP (Bosque, 2010).

3.4.1. Función de la luz

Una de las dos funciones de la luz en la fotosíntesis consiste en impulsar a los electrones provenientes del H₂O para reducir el NADP⁺ a NADH; mientras que la otra función consiste en proporcionar energía para la formación de ATP a partir del ADP y Pi (Salisbury & Ross, 2000).

(Arnon, 1984, citado por (Salisbury & Ross, 2000) menciona que Arnon descubrió que el ATP se sintetiza en forma de cloroplastos aislados solo en presencia de la luz, lo que se llamó fosforilación fotosintética, o simplemente fotofosforilación. Este proceso de formación de ATP mediante este proceso se resume en la siguiente fórmula:



3.4.2. Luz visible

Representa solo una porción de energía radiante con longitudes de onda visibles para el ojo humano comprendidas aproximadamente entre 390 y 760 nanómetros, una región muy reducida en el espectro electromagnético (Salisbury & Ross, 2000).

3.5. Absorción de luz por vegetales

Las plantas requieren luz a través de toda su vida útil, desde la germinación hasta la floración y la producción de frutos y/o semillas. Así la luz es una onda electromagnética que viaja a través del espacio y existe como paquetes de energía discreta, llamada fotones (Ramos & Ramirez, 2016).

3.5.1. Energía

Ramos & Ramirez, (2016) señalan que la luz es una onda electromagnética que viaja a través del espacio y existe como paquetes de energía discreta, llamada fotones los cuales pueden ser medidos de distintas formas, cada fotón tiene una longitud de onda específica y un nivel de energía que describen una medición de luz son: Foot-candles, lux, watts, $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ y $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$. La fórmula se describe continuación:

$$E = (h * c) / \lambda$$

E= Energía de cada fotón expresada en J (Joul)

h = Constante de plank: $6,63 \times 10^{-34}$ J·s

c = Velocidad de la luz: $3,0 \times 10^8$ m/s

λ = longitud de onda, expresada en metros.

Cantidad de fotones en un μmol = $6,022 \times 10^{17}$, fuente: (Photosystem, 2020)

Las plantas asimilan la luz de manera diferente al del ojo humano, para ellas la luz es medida en cantidades de energía por unidad de superficie, mientras que para el ojo humano la luz es medida como iluminación por superficie.

Con ayuda de estos conceptos, cabe señalar que aunque midamos la luz como iluminación, no significa que se les de la energía adecuada a las plantas porque ellas la perciben de una manera muy diferente.

Con esta idea en mente, Garreta, Leandro, & Boyano, (2016) señalan que el Fotón Flux Fotosintético (PPF) es una unidad de medida que mide la cantidad de fotones de la luz fotosintéticamente activa en $\mu\text{mol/s}$ que es el equivalente al lumen para las plantas

Los mismos autores, también indican que la Densidad de Fotón Flux (PPFD) es una medida del número de fotones de luz fotosintéticamente activa que hay en una superficie determinada por segundo ($\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$)

Las medidas con el luxómetro son engañosas cuando sus unidades son diseñadas para el ojo humano

Garreta, Leandro, & Boyano, (2016) afirman que con 3 longitudes de onda se puede actuar sobre los principales fotorreceptores de la planta. El LED tiene la ventaja de que se puede escoger su longitud de onda con bastante exactitud; En las diferentes fases del crecimiento la planta, necesita diferentes longitudes de onda. (Ver figuras 8, 9 y 10 en anexos).

En ocasiones, determinadas longitudes de onda son “simplemente” marcadores necesarios para estimular los procesos biológicos de la planta: Actúan “indicando” a la planta qué tiene que hacer como crecer y florecer (Garreta, Leandro, & Boyano, 2016).

3.5.2. Fotosíntesis

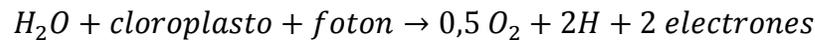
Maldonado, (2013) indica que es el único proceso en el planeta tierra, por el cual la energía es atrapada y almacenada. Por otra parte (Socorro & Cristobal, 2013) señalan que la fotosíntesis de carbohidratos es uno de los procesos más complejos que existe en la naturaleza, donde a partir de CO_2 y agua, se forman estas moléculas orgánicas con el desprendimiento de dióxígeno.

Es el proceso que permite tomar del aire aproximadamente 2000 millones de toneladas de carbono en forma de dióxido de carbono combinada con el agua para formar compuestos orgánicos. Se basa en la captación de energía lumínica del sol, que posteriormente es transformada en energía química y aprovechada para la producción de hidratos de carbono. Se lleva a cabo en los cloroplastos celulares debido a la presencia de pigmentos como la clorofila, carotenoides y xantofilas. El proceso de fotosíntesis se desarrolla en dos fases bien diferenciadas (Martul, 1987).

3.5.3. Fase luminosa

Bosque, (2010) señala que los procesos que dependen de la luz (reacciones de la luz, cuando un fotón es capturado por un pigmento fotosintético se produce la excitación de un electrón, el cual es elevado desde su estado basal respecto al núcleo a niveles de

energía superior pasando a un estado excitado. Después de una serie de reacciones de óxido – reducción, la energía del electrón se convierte en ATP y NADPH. En el proceso ocurre la fotólisis del agua, la que se descompone según la ecuación:

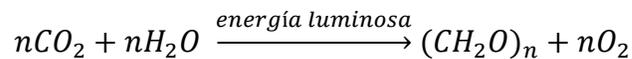


Para (Martul, crecimiento y nutrición en los vegetales, 1987) la primera etapa la luz solar es absorbida por pigmentos, produciéndose dos reacciones separadas, cada una llevada a cabo por un sistema de pigmentario distinto. Al final se produce un compuesto oxidante (NADPox) que oxida el agua a gas oxígeno, y otro compuesto reductor (NADPred); también se produce ATP (molécula “almacenadora” de energía) por el mecanismo denominado fosforilación oxidativa.

3.5.4. Fase oscura

El ATP y el NADPred formados durante la fase luminosa se utilizan para la reducción del anhídrido carbónico a hidratos de carbono. Esta reacción tiene lugar a través de un proceso cíclico en que el CO₂ procedente de la atmósfera es captado por un azúcar.

La reacción global con la que se puede formular todo el proceso es la siguiente:



Esta reacción implica la conversión de energía solar a energía química. Para ello, las plantas emplean dos complejos proteínicos localizados en las membranas tilacoides de las hojas: el mencionado Fotosistema II (PSII) y el Fotosistema I (PSI) (Arismendi, 2011).

3.5.5. Clorofila y pigmentos

Bosque, (2010) describe que un pigmento es cualquier sustancia que absorbe la luz. El color de un pigmento es el resultado de la longitud de onda reflejada (no absorbida). La clorofila, es el pigmento verde de todas las células fotosintéticas, absorbe todas las longitudes de onda de la luz visible excepto el verde, el cual es reflejado y percibido por nuestros ojos. Las sustancias coloreadas tienen su espectro de absorción característico, que es el patrón de absorción de un pigmento dado. La clorofila es una molécula compleja, formada por cuatro anillos pirrólicos, un átomo de magnesio y una cadena de fitol larga (C₂₀H₃₉OH).

La clorofila A se encuentra en todos los organismos fotosintéticos. Los pigmentos accesorios absorben energía que la clorofila es incapaz de absorber. Los pigmentos accesorios incluyen clorofila B, xantofila, y caroteno. La clorofila A absorbe las longitudes de ondas violetas, azul, anaranjado, rojo y pocas radiaciones de onda intermedias (verde, amarillo y anaranjado).

3.6. Iluminación artificial

(Tennessee, Singaas & Sharkey, 1994; Barta, Tibbits, Bula & Morrow, 1992, citados por Ramos & Ramirez, 2016) comparten que la iluminación LED ha tomado mucho más

fuerza que cualquier otra tecnología de luz artificial empleada para estimular el crecimiento de las plantas. Debido a que estos son elementos de estado sólido lo cual significa que no poseen partes móviles como filamentos que puedan deteriorarse por vibraciones, y a la baja o casi nula radiación de calor en forma de luz, los dispositivos pueden ser ubicados muy cerca de las plantas y pueden ser configurados para emitir un alto flujo de luz incluso a intensidades altas.

3.6.1. Ventajas

Zaragozá, (2018) da a conocer las principales ventajas como:

- la resistencia mecánica.
- luz parecida a la del día (mucho más adecuada al ojo humano).
- no queman ni contaminan y larga duración eléctrica (prácticamente toda la vida).

3.6.2. Iluminación LED

Un LED (*light emitting diode*) es un dispositivo semiconductor que emite luz casi monocromática cuando se polariza de forma directa y es atravesado por una corriente eléctrica.

Es un semiconductor unido a dos terminales (ánodo y cátodo) por la cual al circular corriente eléctrica produce un efecto llamado electroluminiscencia, fenómeno que transforma la energía eléctrica en radiación visible. Por lo tanto son fuentes de luz en estado sólido, es decir sin filamento o gas inerte que lo rodee, ni cápsula de vidrio que lo recubra como las tecnologías tradicionales.

Ramos & Ramirez, (2016) menciona los estudios realizados por (Caplow & Nelkin, 2007; Ahmad, Nurul, Robiah & Nurul, 2013; Tongxin et al., 2012), se han basado en varios fenómenos, tales como la influencia declarada del espectro y la intensidad de irradiación de la luz en el crecimiento de la masa de la planta o el rendimiento de longitud de onda (λ). Este proceso de irradiación artificial era antes difícil de realizar. Intentos ineficaces y costosos se llevaron a cabo con el uso de tungsteno y luego por medio de lámparas fluorescentes alimentadas por corriente alterna. Actualmente la tecnología de los dispositivos LED ha avanzado rápidamente en diversas áreas de las ciencias aplicadas ya que permiten la producción de luz brillante y de larga duración. Para los cultivos en interiores emiten sólo las longitudes de onda de luz correspondientes a valores propios y cercanos a los picos de absorción de los procesos fotoquímicos típicos de una planta que están entre 400 y 500 nanómetros (nm) y entre 600 y 700 nm, longitudes de onda que estimulan la germinación, crecimiento vegetativo, desarrollo y floración de las plantas por medio de sus pigmentos fotosensitivos (Winter Green Research, 2014 citado por Ramos & Ramirez, 2016). En comparación con otros tipos de luces de crecimiento, estos dispositivos para los cultivos en interiores son atractivos debido a que no requieren balastos y emiten mucho menos calor que cualquier sistema de iluminación concluye el autor.

Ramos & Ramirez, (2016) mencionan otro aspecto importante de las lámparas y/o dispositivos LED es que el ángulo de emisión de luz es menor a 180 grados, lo cual implica que toda la luz generada está enfocada hacia la parte frontal del dispositivo, lo que no ocurre con los otros sistemas de iluminación, los cuales generan luz en todas las direcciones, haciendo necesario el uso de superficies que reflejen la luz emitida y se focalicen hacia adelante ocasionando pérdidas por reflexión (Macías; Ramos & Ulianov 2012).

3.6.3. Intensidad luminosa

Para la luz visible que es sensible al ojo humano, (Eduardo, 2016) señala que la intensidad es la magnitud de la energía lumínica por unidad de superficie. Es máxima cerca de la bombilla y disminuye rápidamente a medida que se aleja de la fuente. La relación entre la luz emitida por una fuente (bombilla) y la distancia viene definida por la ley de la inversa del cuadrado.

$$I = \frac{L}{D^2} = \frac{\text{luz inicial}}{\text{distancia}^2} \frac{W}{m^2} (Cd)$$

Las plántulas, los esquejes y las plantas en fase de crecimiento vegetativo necesitan menos luz que las plantas en floración, porque sus requerimientos de cultivo son diferentes.

Pero esta luz no da ninguna información sobre lo que absorben las plantas en realidad, puesto que mide la intensidad de la luz en la zona media del espectro, no en la que es importante para la fotosíntesis (Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, 2018); sin embargo, los mismos autores indican que la radiación PAR se mide en W/m. Como lo que interesa es en el fondo el número de fotones que inciden sobre una superficie vegetal concreta, se suelen dar las medidas PPF (Densidad de flujo de fotones fotosintéticos) que se mide generalmente en $\mu\text{moles}/m^2s^2$.

Horticulturaled, (2020) complementa haciendo énfasis en que los PPF o densidad de flujo de fotones fotosintéticos mide la cantidad de PAR que le llega a la planta de manera real, el número de fotones fotosintéticamente activos que caen sobre una superficie dada cada segundo. PPF es una medición "spot" o directa de una ubicación específica en el punto más alto de la planta, y se mide en μmoles por metro cuadrado por segundo

3.6.4. Flujo luminoso

Flujo luminoso (en lúmenes) es una medida de la potencia luminosa total que emite una lámpara (cantidad percibida). La intensidad luminosa (en candelas) es una medida de cuanto brillo tiene el haz en una dirección particular. Equivalente a 1 candela por estereorradián (Eduardo, 2016).

El flujo luminoso es, por tanto, la suma ponderada de la potencia en todas las longitudes de onda del espectro visible.

$$\varphi = Cd \times Sr = lm$$

Para el flujo de fotones se utiliza $\mu\text{mol s}^{-1}$ para la luz fotosintéticamente activa muy utilizado para las plantas

3.6.5. Iluminancia

Se define como el flujo luminoso por unidad de superficie, se designa con el símbolo E y se mide en LUX (lumen/m²). Se mide con el luxómetro. (Harper, 2004) citado por Eduardo, (2016)

$$E = \frac{\text{flujo luminoso}}{\text{unidad de superficie}} = \frac{\varphi}{S} = \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2} = \text{lux}$$

Tabla 3: comparación de iluminancia Harper

Una noche sin luz	0,01 lux
Una noche con luna llena	0,2 lux
Una noche con alumbrado público en las calles	5 – 20 lux
Una oficina con buena iluminación	500 lux
Un aparador bien iluminado	3000 lux
Un día claro con cielo nebuloso	20000 lux

Fuente: (Eduardo, 2016)

La densidad de flujo de fotones se mide en $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y para la densidad de flujo radiante se mide en W m^{-2}

La densidad de flujo fotosintética es la cantidad total que potencialmente impulsa hacia la fotosíntesis, sus unidades de medida son el PAR (densidad de flujo de radiación fotosintéticamente activa) W m^{-2} y el PPF (flujo de fotón fotosintético) $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; no es aplicable para medir en luz visible

3.6.6. Características del LED

Según Sanz, (2016), las características a considerar en la compra de LED's son las siguientes:

a) Potencia

Es el principal parámetro, el que nos va a indicar cómo de potente es la bombilla.

En ocasiones puede aparecer la potencia equivalente con respecto a las bombillas tradicionales. Puede venir de las siguientes maneras:

8 W → 50 W incandescencia

7 W → 60 W equivalencia

b) Luminosidad:

O flujo luminoso. La luminosidad es un valor que nos va a venir en lúmenes y nos indica la intensidad de la luz que emite.

Para una misma potencia podemos encontrar variaciones en los lúmenes. Es un valor fundamental a la hora de elegir un LED.

c) Temperatura de color:

Dentro de las características de un LED la temperatura de color es una característica a observar siempre. Este dato indica el color de luz de la bombilla. (Ver figura 11 en anexos).

Es por eso que se toma en cuenta este valor, ya que puede haber grandes diferencias entre una y otra iluminación (Ver figura 12 en anexos).

d) Vida útil:

El número estimado de horas que el LED va a permanecer encendido en condiciones óptimas. Cuanto mayor sea este valor más tiempo tendremos para amortizar el precio de la bombilla.

e) Factor de mantenimiento del flujo luminoso:

Factor de mantenimiento de la luminosidad. Lo que nos facilita este dato es el flujo luminoso del LED a las 6.000 horas de uso en comparación con el flujo luminoso inicial. Debería ser mayor del 80 %.

Sin embargo este dato no suele venir y en su lugar puede aparecer "*Factor de mantenimiento del flujo luminoso al final de la vida útil nominal*". Cuando antes hablábamos de la vida útil el número de horas no es hasta que falla el LED, si no que se cuenta hasta que baja de un % de luminosidad. Para ello, la expresión que se debería seguir para hablar de la vida útil sería la siguiente:

L70 = 30.000 horas

Esto quiere decir que el LED aguantará 30.000 horas de uso hasta bajar de un 70% su luminosidad.

L80 = 20.000 horas

Y así sería un ejemplo de las horas de uso que aguantaría hasta bajar del 80 %.

En este aspecto debería haber más claridad dentro de las fichas técnicas. La vida útil nos aparece en horas sin especificar el flujo luminoso (debemos suponer que se refieren al 70 %) y el factor de mantenimiento ni nos aparece.

f) On / Off:

El número de ciclos de encendido y apagado, o ciclos de conmutación, es el número de veces que la bombilla podrá encenderse y apagarse antes de fallar.

En una bombilla que tiene un gran número de horas de vida útil, supongamos 30.000, pero sólo tiene 10.000 ciclos de encendido y apagado no nos interesará en un lugar de poco uso continuado. Si la usamos por ejemplo en un cuarto de baño llegará mucho antes a los 10.000 ciclos de encendido y apagado que a las 30.000 horas de uso. No la habremos aprovechado correctamente.

g) Tiempo de encendido:

El tiempo que tarda en encenderse el LED. Debe ser menor a 0,5 segundos.

h) Tiempo de calentamiento:

Suele venir como “*tiempo de calentamiento hasta el 60 % del flujo luminoso completo*” o “*tiempo de encendido hasta alcanzar el 60% de luz*”. Este tiempo debe ser inferior a 2 segundos.

Este valor podía ser interesante para las bombillas de bajo consumo, puesto que tardaban un tiempo en calentarse, pero para los LEDs vemos que es casi inmediato. Más que suficiente para un uso doméstico.

i) Rendimiento de color:

El índice de reproducción cromática (IRC, o CRI en inglés), es un valor que nos indica la variación de color que experimentan los objetos al ser iluminados con el LED en comparación con una fuente de luz natural. Cuanto más alto sea el valor, más fielmente se reproducirán los colores. (Ver figura 13 en anexos)

Lo normal es que este valor esté en 80. Menos que eso no sería recomendable.

3.7. Aplicación de los diodos LED

Tecnologías agrícolas innovadoras para proyectos de agricultura urbana para que las plantas crezcan en entornos de interior sin luz solar. Este proceso de cultivo se denomina agricultura urbana o cultivos verticales y es idónea para propagación de plantas jóvenes y producción integral de cultivos más sanos sin pesticidas. Maximiza la producción mediante el uso de tecnologías LED de nueva generación que permiten iluminar cultivos multicapa y obtener un rendimiento mayor en menos espacio (Philips, 2020).

3.7.1. Clasificación según la radiación emitida

Según Osram, (2019) se clasifican en:

a) LEDs Infrarrojos:

Emiten radiación con una longitud de onda superior a los 780nm. Se suelen usar en artefactos electrónicos y elementos de control.

b) LEDs ultravioletas:

Emiten radiación con una longitud de onda inferior a los 380nm.

c) LEDs de Colores:

Emiten radiación con una longitud de onda entre los 380nm y los 780nm. Se consigue la emisión de luz en una longitud de onda determinada del espectro según los materiales semiconductores usados. Principales colores usados: Azul, Verde, Amarillo y Rojo.

d) LEDs de Luz Blanca:

Se obtiene luz blanca mediante conversión por luminiscencia. Usando LEDs azules o ultravioletas combinados con fósforo de distintos colores.

e) LEDs RGB:

Combinación de tres chips de color rojo (Red), verde (Green) y azul (Blue) que pueden generar cualquier color del espectro al regular su luminosidad.

3.7.2. Cinta A LED 5050 – IP65

Información general según TBCin, (2018) se detallan en el tabla 3

Tabla 4: características de la cinta A LED 5050 IP-65

Características	valor
Dimensiones	5 x 0,1 [cm]
Angulo de iluminación	120°
Intensidad	14,4, W/m ²
Potencia	72 Wtts/rollo
Voltaje de entrada	12 v
Consumo de amperios	1,2 A x m
Lumens	20 LM/SMD máximo brillo
Alimentación	12 VDC
Cantidad de LEDs	60/metro
Tipo de LED	SMD 5050
Rollo	5 metros
Adhesivo	3 metros
Vida útil	50000 horas
Grado de protección	IP65 uso exterior

- Muy flexibles, adaptables a cualquier diseño.
- Alto rendimiento lumínico.
- Ahorro de energía.
- Se pueden fraccionar cada 3 led

3.8. Sistemas de producción

Según Japon, (1977), la lechuga se explota mediante dos sistemas sustancialmente diferentes: el extensivo y el tradicional.

Actualmente, el cultivo extensivo, con el fin de mecanizar al máximo las operaciones culturales, empieza a introducir diversas medidas técnicas (herbicidas, recolección mecánica, entre otros) que permitan reducir al mínimo el empleo de mano de obra.

Se entiende por cultivo tradicional el típico de carácter hortelano, donde las operaciones son absolutamente manuales, teniendo por objeto el suministro a los mercados, generalmente locales.

3.8.1. Producción al aire libre

Este es el sistema más común utilizado, el cual puede ser iniciado desde almácigo/trasplante o siembra directa. Según Saavedra, y otros, (2017) este último sistema aún no es muy empleado, puesto que requiere de bastante tecnología en preparación de suelo: máquina sembradora, semilla de calidad acondicionada osmóticamente y peletizada para facilitar su siembra, además de un manejo muy estricto del control de malezas.

3.8.2. Producción en ambiente protegido

La principal diferencia entre el cultivo al aire libre y un cultivo en ambiente protegido, es el control del ambiente que las plantas necesitan para obtener su máximo desarrollo (Yuste, 1997, citado por Álcazar, 2016).

Blanco et al., (1999), también citado por Álcazar, (2016), expone que las condiciones óptimas para el desarrollo de especies cultivables dentro de los ambientes protegidos, dependen principalmente de cuatro variables: temperatura, humedad, luminosidad y ventilación.

Veldez (1997) citado por Terrazas (2013) citado por Siñani, (2017), indica que existen diferentes tipos de construcciones como son los invernaderos, carpas solares aéreas y carpas solares subterráneas, esto con el fin de proteger las cosechas, así se consigue un adelanto o retraso en la cosecha; controlar riego, radiación y humedad. Los ambientes protegidos son cubiertas que evitan el descenso de temperatura a niveles críticos. La energía solar es la fuente para calentar estos ambientes, y son comunes en la región andina de Bolivia.

Hartman (1990) citado por Colodro, (2013), mencionó que los materiales en los ambientes protegidos son importantes y los más utilizados, pueden dosificarse en materiales de vidrio y material de plástico.

3.8.3. Agricultura en interiores

Según especialistas, se estima que en el año 2050, seremos 9 mil millones de personas en nuestro planeta, con más de un 80% de la población mundial viviendo en zonas urbanas. Además, nuestro planeta ya no tendrá suelos disponibles y seguros para cultivar plantas y hortalizas (Amazings®, 2016).

Se vislumbra como una solución a la creciente disminución de las zonas agrícolas producto de la contaminación, la desertificación, el cambio climático y el crecimiento

desproporcionado de las ciudades y áreas urbanas (Rodríguez, 2018), por lo tanto se podría emplear en estas zonas donde tenemos espacios reducidos.

El concepto de *granjas verticales* fue desarrollado por Dickson Despommier, microbiólogo, ecólogo y profesor de salud pública y medioambiental en la universidad de Columbia en Nueva York, que reporta respecto a las granjas verticales presentan la doble ventaja de ahorrar tierras agrícolas y de producir cerca de los consumidores. (Amazings®, 2016).

En AeroFarms creen que este puede ser el futuro de muchos mercados, y aseguran que pronto ofrecerán productos más sabrosos, frescos y baratos de producir que los de agricultores tradicionales (Pastor J. , 2016).

El mismo autor nos dice que el Departamento de Energía (DoE) de los Estados Unidos asegura que el precio de los LED ha caído un 90% desde 2010 y seguirá cayendo en los próximos años. Este es un factor muy importante, pero también lo es el hecho de que tanto la eficiencia (luz emitida por unidad de energía) como la autonomía (que en algunos modelos llega a las 36.000 horas) se han doblado.

3.9. Experiencia del empleo de luz LED en agricultura

Ramos & Ramirez, (2016) señalan que el concepto de granja vertical, también relacionada como Agricultura Integrada en Edificaciones del acrónimo BIA (Building Integrated Agriculture) es un nuevo enfoque de la producción basada en la idea de localizar sistemas de cultivo de alto rendimiento en edificaciones para producir alimentos al interior de estos, haciendo uso de fuentes renovables, locales de energía y agua.

Los mismos autores señalan que se les conoce como luces de crecimiento a los sistemas de iluminación empleados en los cultivos en interiores, hacen parte de este concepto y son una fuente de luz artificial. Estas funcionan de tres maneras diferentes:

- 1) proporcionan toda la luz que la planta necesita para crecer
- 2) complementan la luz natural, sobre todo en los meses de invierno, donde las horas de luz día son cortas y
- 3) aumentan el periodo de la luz día con el fin de disparar el crecimiento y la floración.

Los cultivos en el interior de edificios, alimentados con luz artificial, llevan años funcionando. El ecologista y profesor de microbiología de la Universidad de Columbia, Dickson Despommier, los predicaba desde los 90 como una solución para aumentar la producción agraria y paliar el hambre. Existen empresas especializadas en algunas partes del mundo, como Green Spirit Farms, que opera en Estados Unidos y cuenta con varios establecimientos de cultivos verticales, según Bejerano, (2014)

El mismo autor señala, que estos cultivos que se encuentran emplazados en el interior de las fábricas se basan en luz LED o fluorescente que simula la luz solar. Las compañías controlan mediante software la orientación que tienen las plantas respecto a la luz en

cada momento, para que todas reciban la misma cantidad. El agua se transmite mediante cañerías directamente para asegurar el flujo de nutrientes. (Ver figuras 16, 17 en anexos)

Este reto ha sido la inspiración de Shigeharu Shimamura, experto en fisiología vegetal, cuya compañía ha puesto en marcha una gran planta de cultivo interior que produce 10.000 lechugas diarias. La luz del sol se ha cambiado por bombillas LED y las condiciones de humedad y temperatura se controlan por software para crear el ambiente óptimo para el crecimiento de las lechugas (Bejerano, 2014).

La compañía Japonesa, fabricante de LEDs Nippon Keike Kagishima Works publicó en enero del 2007 el resultado de un estudio, la utilización de dos LEDs rojos de 75 W tenía el mismo efecto que 50 lámparas incandescentes de 75 W en un pequeño invernadero, lo cual dio como resultado la reducción del coste de la energía eléctrica consumida en 25 veces menor respecto a las lámparas incandescentes. (Martín, P. et al. citado por Jimenez C. , 1997).

En la ciudad de Newark (estado de New Jersey, EEUU), se construyó la granja vertical más grande del mundo. Con 6500 m² de superficie sin ningún contacto con el suelo o con el sol, la granja aeropónica de la empresa AeroFarms vio sus primeros resultados en el año 2016, después de un año de producción intensa (Amazings®, 2016)(ver figura 3 en anexos).

En septiembre del 2008 en la conferencia Copenmind`s Cleantech, colaboradores de la University of Southern Denmark y J.E. Ostergaard, comunicaron acerca de la utilización de LEDs azules y rojos obtuvo resultados más eficientes en invernaderos industriales que la iluminación fluorescente, llegando a la conclusión que los gastos de instalación resultan compensadas por las reducciones de coste de funcionamiento. (Martín, P. et al. citado por Jimenez C. , 1997).

En el cultivo de lechugas, se encuentran plantadas en jardineras que se colocan en 18 estanterías de 15 alturas cada una. En total es una especie de biblioteca de más de 2.300 metros cuadrados repleta de estantes abarrotados del cultivo. Las 10.000 lechugas que produce diariamente la planta dan idea de cómo este método se podría aplicar con éxito para incrementar la cantidad de alimento disponible a nivel regional (Bejerano, Blogthinkbig.com, 2014) (ver figura 2 en anexos).

Los laboratorios de Montecastelo, realizaron el experimento, cuyo valor principal de esta investigación sobre los efectos de la iluminación por LEDs en el desarrollo vegetal es que podría ayudar a aumentar la productividad de cultivos alimentarios en ciertas partes del mundo, una posibilidad muy esperanzadora ante el crecimiento demográfico del planeta y la necesidad de una mayor cantidad de comida con la que alimentar a esa humanidad, cada vez más numerosa (Arcas, 2014).

3.9.1. Aplicaciones

Según Philips, (2020) las técnicas de agricultura urbana varían mucho según el espacio, la tecnología o la inversión en tiempo y dinero que se requieren para ponerlas en marcha.

A continuación comparamos cuatro aplicaciones distintas como una idea de cuál podría ser la fórmula de cultivo adecuada a un determinado caso. No obstante, hay que recordar que la mano verde del agricultor siempre será fundamental para el éxito de cualquiera de estas aplicaciones (ver figura 18 en anexos).

3.9.2. Instalación agrícola

Esta técnica de producción a gran escala es ideal para cultivar en un entorno cerrado y personalizado de más de 2000 m². Las instalaciones agrícolas son entornos de alta tecnología muy automatizados e incluso robotizados. Además, cuentan con sistemas totalmente automáticos de riego, climatización y logística, con un proceso de crecimiento y una línea de producción adaptables a cada tipo de cultivo. Se requieren sensores y datos que ayuden a gestionar, dirigir y mejorar el proceso. Requiere de gran inversión, alto nivel de tecnología y gran espacio (ver figuras 19 y 20 en anexos)

3.9.3. Cámara climatizada

Las salas climatizadas están destinadas a una producción a pequeña escala. Se pueden usar para una parte concreta del proceso de cultivo; por ejemplo, para propagar plantas jóvenes o para investigar los efectos de la iluminación en los cultivos. Las cámaras estancas de entre 500 y 3000 m² se pueden integrar en edificios o pabellones existentes. El riego y la climatización están semiautomatizados y las fórmulas de iluminación se pueden medir mediante sensores. Al igual que el anterior requiere de gran inversión, alto nivel de tecnología y de un gran espacio (ver figuras 21 y 22 en anexos)

3.9.4. Nave agrícola

Una nave agrícola tiene menos de 1000 m², lo que permite integrarla en un edificio o pabellón existentes para obtener una producción a pequeña escala. En comparación con otras aplicaciones, requiere un nivel de inversión intermedio y resulta relativamente fácil de poner en marcha para alguien que tenga conocimientos sobre cultivos. Tan solo se necesitan bastidores estándar y un ordenador de climatización para comenzar a cultivar. Dado que no suele ser posible integrar robots o sistemas totalmente automatizados en construcciones existentes, el sistema es semiautomático. a diferencia de los anteriores, requiere de tamaño medio, nivel de medio de tecnología e inversión media (ver figuras 23 y 24 en anexos).

3.9.5. Contenedor

Diseñados para fines de investigación, los contenedores estándar y listos para usar tienen una superficie de cultivo de entre 20 y 30 m², son fáciles de poner en marcha y permiten obtener resultados pronto. Los contenedores son aptos para aplicaciones mono o multicapa. Se pueden colocar en un pabellón para propagar plantas jóvenes antes de transplantarlas a un invernadero. Solo son adecuados para proyectos a pequeña escala, porque las tandas de producción son limitadas. Existe tecnología básica de riego y climatización, pero sin automatización. Se requieren conocimientos técnicos sobre el sistema de producción en su conjunto para llevar a cabo investigaciones. Este es el mas

básico de las propuestas, no requiere de mucha inversión ni de alta tecnología y la inversión es casi económica (ver figuras 25 y 26 en anexos).

3.10. Análisis económico de experimentos agrícolas por presupuestos parciales

Se llama presupuestos parciales, porque con este enfoque solamente se toman en consideración los costos asociados con la decisión de usar o no un tratamiento; permiten diferenciar los costos de un tratamiento a otro, y se denominan “Costos que Varían” porque varían de un tratamiento a otro (Reyes, 2001).

El mismo autor señala que el enfoque de los presupuestos parciales surgen a medida que los tratamientos tienen medias de rendimiento que son significativamente diferentes, entonces muestran diferencias de costos, y en general presentan una relación directa entre costos y beneficios, es decir, en la medida que aumentan los costos aumentan los beneficios.

Con este objetivo Reyes, (2001) desarrolla los siguientes pasos:

- Identificación de los rubros de costos relevantes: Es identificar las fuentes de costos que varían.
- Estimación de los precios de campo de los insumos: El precio de campo de un insumo es aquel precio que alcanza puesto en el terreno donde se usará.
- Estimación de los costos que varían: Esto se logra multiplicando los precios de campo de los insumos relevantes por sus niveles de uso en cada tratamiento y luego sumando un total.
- Estimación de los precios de campo del producto: El precio del producto a nivel de campo es aquel a que el agricultor podría vender su producción antes de cosecharla.
- Estimación de los rendimientos ajustados: debido a que los experimentos se realizan para optimizar los rendimientos, además que pueden ser pequeños y ser sobreestimados que llevan a la exactitud en temas de cosecha y mayor eficiencia de cosechas en áreas pequeñas; se recomienda reducir los rendimientos experimentales de un 5 – 30 % para acercarse a valores reales que se pueden obtener en grandes extensiones.
- Estimación de los beneficios brutos de campo: Como beneficio bruto de campo se conoce el valor bruto de producción
- Estimación de los beneficios netos de campo: Estos se obtienen de sustraer de los beneficios brutos de campo
- Realización del análisis de dominancia: Este análisis se utiliza para seleccionar los tratamientos que en términos de ganancias ofrecen la posibilidad de ser escogidos para recomendarse a los agricultores.
- Cálculo de la tasa de retorno marginal (TRM): Con los tratamientos no dominados, siempre organizados de menor a mayor de acuerdo con sus costos que varían, se obtienen los incrementos de costos y beneficios netos que resultan

al cambiar de tratamiento. Luego, al dividir, el incremento de beneficios por su respectivo incremento de costos, se obtiene la tasa de retorno marginal.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

4.1.1. Materiales de estudio

- Luces Led de distintos espectros (blanca; azul y roja; blanca, azul y roja)
- Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa.L*) variedad Boston White

4.1.2. Materiales de trabajo

- Ambiente (laboratorio de fisiología vegetal)
- Estantes (como soporte del sistema)
- Timer SONOFF® 25irec wifi socket
- Aplicación Ewelink del playstore
- Solución hidropónica FAO
- Cables
- Extensores de energía eléctrica
- Interruptor
- Motor para el sistema hidropónico
- Semilla de lechuga
- Tanque de agua
- Nylon

4.1.3. Materiales de gabinete

- Cuaderno de notas
- Bolígrafos
- Hojas
- Computador
- Impresora
- Material de escritorio

4.2. Metodología

El enfoque cuantitativo (que representa un conjunto de procesos) es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos eludir pasos. El orden es riguroso, aunque

desde luego, podemos redefinir alguna fase, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica (Hernandez, Fernandez, & y Baptista, 2014).

4.2.1. Procedimiento experimental

El trabajo se desarrolló de acuerdo a las siguientes etapas: ver en anexos metodología

a) Construcción del sistema

- Se realizó la compra de diversos materiales como: fierros angulares de 1" pulgada de ancho y un grosor de 3 mm para elaborar los estantes y soportes; las dimensiones de los estantes fueron de 1m de largo por 0,5 m de ancho con una altura de 2 m.
- Los soportes y estantes fueron pintados de color blanco además de realizar agujeros con un taladro a cuatro de los fierros angulares cada 0,1 m para facilitar la instalación del sistema de luces y el sistema hidropónico
- Para el sistema hidropónico se adquirió tubos PVC de 3" pulgadas, mangueras y niples de ½" pulgada para su elaboración; la distancia preparada entre planta y planta fue de 16,6 cm, el interior del tubo estaba cubierto con nylon negro para evitar el crecimiento de microalgas.
- El soporte del sistema eléctrico fue elaborado con madera de trupan de 1m de largo por 0,5 m de ancho sobre el cual se apoyaba un listón de madera de 1cm de espesor por 1 m de longitud; debajo se disponían las cintas A-LED con una longitud de 0,9 m conectado por medio de cables a un convertidor de voltaje para LEDs de 220 a 12 V y de esta manera evitar sobrecargas y su deterioro.
- El sistema de iluminación estaba conectado al timer SONOFF® 26irec wifi socket que funciona con conexión en línea; este sistema estaba programado para 11 horas el cual se monitoreaba mediante el teléfono móvil.

b) Instalación del sistema

- Posteriormente se realizó la instalación de todos los sistemas el cual consiste en el armado de los tres estantes con cuatro niveles cada uno.
- La distancia entre niveles estaba separada por 0,3 m con tres tubos que tenían una capacidad para seis plantas por cada tubo.
- Posteriormente se prosiguió con la instalación del sistema eléctrico, el montaje de los soportes con las luces LED en sus diferentes tratamientos (luces blanca, violeta, y la combinación de azul y rojo) que tenían 0,9 m de largo dispuesto de manera paralela al cultivo por cada nivel las cuales iluminaran a las plantas.
- La iluminación con luz blanca como la violeta tenían seis cintas cada una respectivamente.
- La combinación de luces tenían tres rojas y tres azules dispuestas en forma alterna

- El control de tiempo de iluminación se lo realizó mediante el Timer SONOFF® 30irec wifi socket con ayuda de la aplicación Ewelink para un control desde un dispositivo móvil con conexión a internet, desde cualquier lugar y tiempo (Ver figuras 27, 28, 29, 30 y 31 en anexos).
- Se instaló el sistema hidropónico NFT; para ello se hizo el montaje de un tanque de abastecimiento periódico de agua con una capacidad de 20 L para los 4 niveles, en total se emplearon tres contenedores de agua con solución nutritiva de la FAO.
- Las soluciones hidropónicas empleadas fueron: solución A (fosfato mono amónico, nitrato de calcio y nitrato de potasio); solución B (sulfato de Magnesio, sulfato de manganeso, sulfato de cobre, sulfato de zinc, ácido bórico, molibdato de amonio y quelatos de hierro); se colocó en cada tratamiento en las siguientes dosis recomendadas:
- Durante las 2 primeras semanas después de que la planta tenga hojas verdaderas $\frac{2,5 \text{ cm}^3 \text{ sol A}}{47 \text{ l de agua}}$ y $\frac{1 \text{ cm}^3 \text{ sol B}}{47 \text{ l de agua}}$
- A partir de la 3ra semana hasta la cosecha $\frac{5 \text{ cm}^3 \text{ sol A}}{47 \text{ l de agua}}$ y $\frac{2 \text{ cm}^3 \text{ sol B}}{47 \text{ l de agua}}$
- Aplicamos la solución nutritiva una vez por semana oxigenando 2 veces al día por 30 segundos incrementando agua una vez por semana.

c) Investigación experimental

i. Siembra y toma de datos

- Previo a la siembra, se marcó una esponja en cuadrados de 3,5 x 3,5 cm, a la mitad se realizó un corte a poca profundidad para alojar las semillas; posteriormente se procedió a lavarlas con detergente de cocina, luego se enjuagó con abundante agua para eliminar impurezas.
- Procediendo con la siembra se colocaron dos semillas por cubo de esponja en un soporte plástico elaborado con vasos desechables, con siembra directa al sistema hidropónico con iluminación LED en sus diferentes combinaciones (Ver figuras 32 – 35 en anexos).
- Después de tres semanas, se realizó un refalle dejando solamente a una planta por hoyo en el sistema hidropónico.
- Como número de muestras se tomaron seis plantas por nivel de iluminación.
- Desde la germinación en el sistema se realizó el respectivo seguimiento en las variables físicas de estudio sometido al cultivo en iluminación artificial (luz blanca, combinación roja/azul y luz violeta), tomando como variables agronómicas el N° de hojas, altura de planta, días de cosecha (ver figuras 36 – 52 en anexos), obteniendo datos medidos cada siete días.
- La densidad de flujo de fotones se obtuvo mediante lecturas del luxómetro de la marca apogee instruments quantum flux configurado para cuantificar fotones fotosintéticos para luz artificial $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$

- En cuanto a las variables químicas como el contenido de clorofila, % de materia seca, se realizó las mediciones únicamente en la cosecha.

ii. Cosecha y análisis en laboratorio

- La cosecha se llevó a cabo después de 16 semanas desde la germinación de las plantas.
- Las muestras se llevaron a laboratorio para el análisis de cualidades físicas como peso de planta, peso de hoja, cantidad de clorofila.
- Una parte de las muestras se colocó en una mufla por 48 horas para el análisis de materia seca.
- La otra parte fue llevada al laboratorio del instituto industrial Pedro Domingo Murillo para el análisis de nitrógeno, fosforo, potasio y boro en porcentajes.

4.2.2. Diseño experimental

El presente trabajo de investigación es un diseño completamente al azar con un factor, tres tratamientos y cuatro repeticiones.

Ochoa, (2009) expresa que si se tiene una investigación con varias unidades experimentales y diferentes tratamientos, lo que se evaluará estará en función al modelo, será medir la variación de los tratamientos más el error experimental.

$$\text{La observación} = \text{tratamientos} + \text{error experimental}$$

El análisis de varianza con un factor es el modelo lineal en la que la variable analizada depende de un solo factor de tal manera que las causas de su variabilidad son englobadas en un componente aleatorio que se denomina error experimental.

El modelo lineal aditivo está dado con la fórmula según Yana, (2019).

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

$$i = 1, 2, \dots, t \quad j = 1, 2, \dots, r$$

Dónde:

- y_{ij} es el valor observado en la j -ésima unidad experimental donde se aplica el i -ésimo tratamiento.
- μ es la media general.
- τ_i es el efecto del tratamiento, el efecto de la iluminación.
- ϵ_{ij} es el efecto aleatorio del error experimental.

4.2.3. Tratamientos

Los tratamientos fueron, la exposición del cultivo a la luz LED en diferentes combinaciones:

- a) Luz blanca con un rango de 500 – 700nm (T1).

b) Luz Violeta con un rango de 415nm (T2).

c) Luz azul de 470nm y luz roja de 700nm como combinación (T3).

4.2.4. Análisis estadístico

- Se calcularon las variables de respuesta para el sistema de crecimiento de plantas con luz artificial con sistema hidropónico, además de realizar factores de conversión para algunas de las variables.
- Se realizaron análisis de laboratorio para otras variables (ver figura 55 en anexos)
- Parte de los análisis de datos se trabajó con el programa Statistical Analysis System (SAS) versión 9.4 cuyo procedimiento empleado fue el de GLM.
- Los resultados del trabajo de investigación son presentados en el capítulo de resultados y discusiones.

4.2.5. Croquis experimental

El presente trabajo se realizó con la distribución de los tratamientos con iluminación por niveles en los estantes cuyas dimensiones fueron 2 m de alto por 1 m de largo y 0,5 m de espesor; la separación entre niveles fue de 30 cm, cada estante tenía su propio tanque de agua de 20 litros.

Las medidas de los niveles fueron de 1 m de largo por 0,5 m de ancho, la distribución de las cintas y la distribución de los tubos se observan en las figuras 1, 2, 3 y 4.

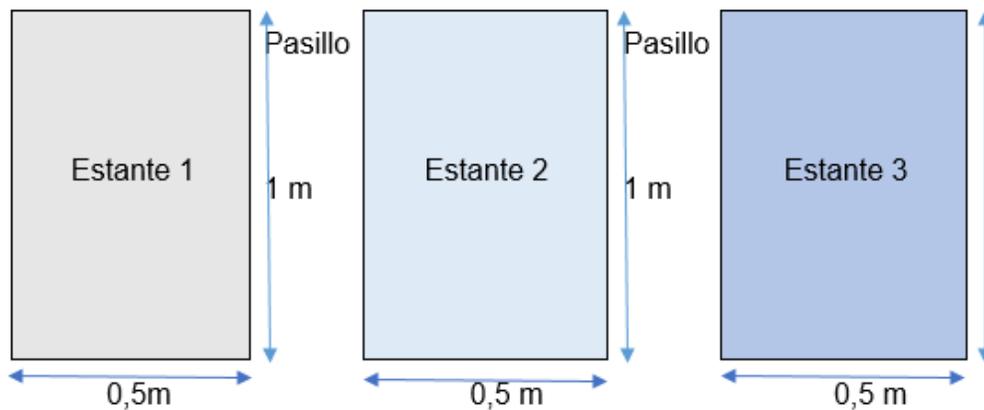


Figura 1: Vista de planta del croquis experimental.

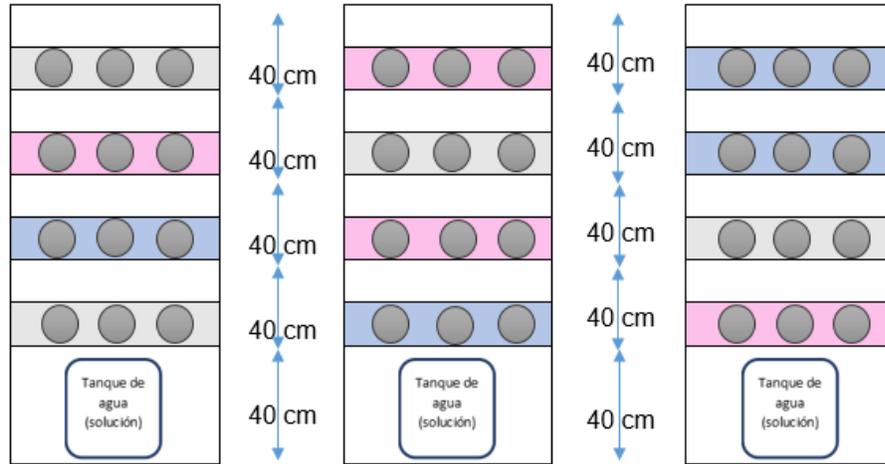


Figura 2: Vista frontal del croquis experimental.

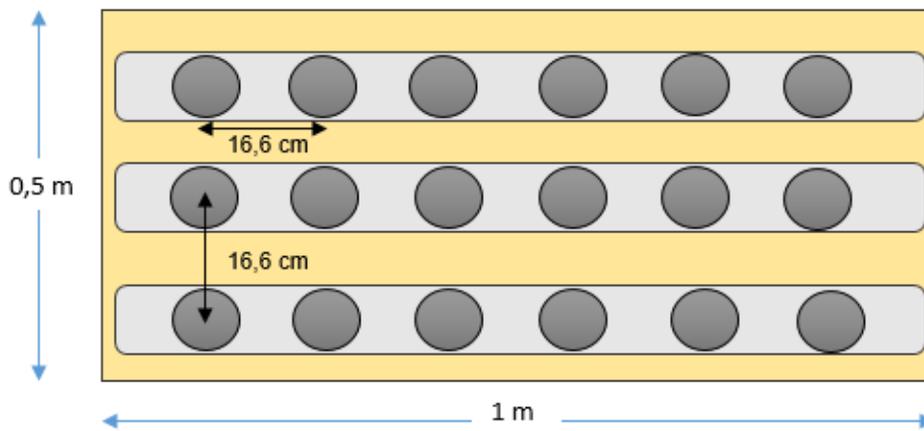


Figura 3: Vista inferior de nivel con el marco de plantación del cultivo.

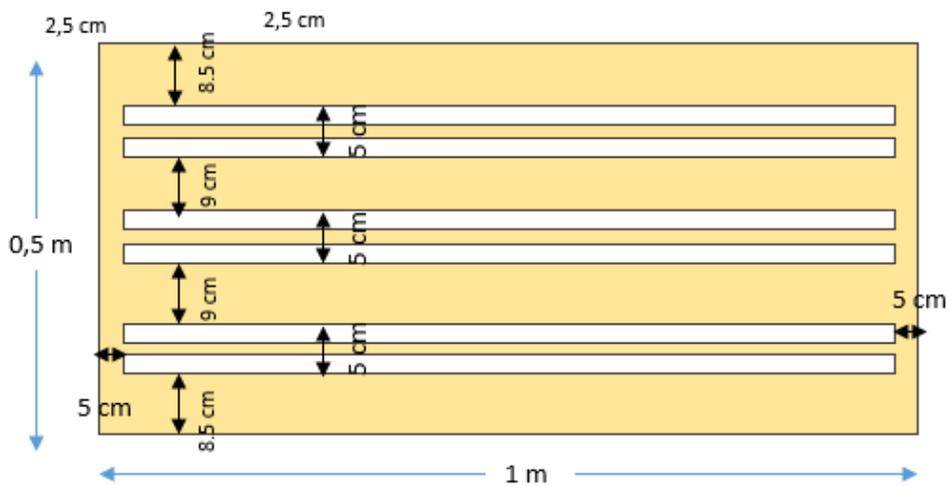


Figura 4: Vista superior de nivel con la distancia entre luces LED.

4.3. Variables de estudio

4.3.1. Intensidad lumínica

La intensidad lumínica obtenida mediante el sensor MQ-100 de apogee instruments® calibrado para iluminación artificial eficiente para la planta fue de:

Luz Blanca: $11 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$

Luz Violeta: $38 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$

Combinación LED Rojo – Azul: $24 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$

4.3.2. Tiempo de iluminación

El tiempo de iluminación al cual el cultivo fue sometido fue de 11 horas, programando el Timmer SONOFF® encenderse a las 8:00 am y apagarse a las 8:00 pm todos los días del crecimiento del cultivo hasta la cosecha.

4.3.3. Temperatura

La variable temperatura fue obtenida por el sensor de humedad y temperatura DHT11 cuyos valores medios fueron de 8 a 10 °C variando en la noche y el día respectivamente durante todo el tiempo del desarrollo del cultivo.

4.3.4. Humedad relativa

La variable de humedad relativa fue obtenida por el sensor de humedad y temperatura DHT11, los valores obtenidos tuvieron una variación de 56 y 63 % durante las 24 horas en todo el tiempo que se desarrolló el cultivo.

4.3.5. Desarrollo del cultivo

El desarrollo del cultivo desde la siembra hasta la cosecha fueron de 120 días, los días recomendados para este cultivo son entre 90 a 100 días, no obstante, debido a problemas epidemiológicos que se presentaron en el año 2020, el cultivo estuvo 120 días para realizar los análisis de laboratorio y demás pruebas correspondientemente.

4.4. Variables de respuesta

4.4.1. Energía del sistema:

a) Energía suministrada:

Para esta variable, se empleó la ecuación sugerida por Ramos & Ramirez, (2016)

$E = (h * c)/\lambda$ cuyas variables son:

E= Energía de cada fotón expresada en J (Joul).

h = Constante de plank: $6,63 \times 10^{-34}$ J·s; es un valor constante.

c = Velocidad de la luz: $3,0 \times 10^8$ m/s; es un valor constante.

λ = longitud de onda, expresada en metros; obtenida mediante valores de longitud de onda del espectro luminoso como: 4,15E-07 m para luz violeta, 6,56E-07 m para luz roja, 4,70E-07 para luz roja.

Entonces el resultado obtenido está expresado en Joules; sin embargo, las plantas tienen unidades de medida propias expresadas en μmol , por lo tanto, se empleó un factor de conversión con el valor $6,022 \times 10^{17}$ μmol según (Photosystem, 2020).

b) Eficiencia fotosintética

Esta variable se calculó mediante el luxómetro de la marca apogee instruments quantum flux, el cual estuvo configurado para medir luz artificial cuyas unidades son expresadas en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, este instrumento mide la densidad de flujo de fotones; a este valor lo divide la energía suministrada, el valor más alto es el más eficiente, la ecuación sería la siguiente:

$$EF = PPf / E^{\circ}$$

4.4.2. Variables agronómicas

a) Contenido de clorofila a la cosecha

Esta variable fue medida con un dispositivo portátil CCM-200plus de la marca optisciences en unidades SPAD cuyos datos son obtenidos mediante la onda de absorbancia de luz, este instrumento permite estimar la concentración de nitrógeno en la planta con una medición rápida y simple

b) Crecimiento de planta

Para la determinación del crecimiento se midió el crecimiento con una regla dos veces por semana durante 120 días desde la aparición del vástago de la planta hasta el día de la cosecha; las unidades empleadas se encuentran en centímetros.

c) Longitud de hoja

Esta variable fue medida con una regla desde la aparición de la primera hoja verdadera hasta la cosecha a los 120 días, los datos obtenidos son en centímetros; las mediciones se realizaron dos veces por semana.

d) Número de hojas

Para evaluar esta variable (Hojas /Planta) se contaron el número de hojas por planta en la etapa de cosecha, a los 120 días después de la siembra, tomando en cuenta que esta variable de datos discretos, fue necesario para el análisis estadístico transformarlos a datos continuos, para ello se emplea la raíz cuadrada, para la precisión en los resultados (Little, 1976 mencionado por Rodriguez, (2018).

4.4.3. Eficiencia del uso de superficie

Para esta variable se calculó el número de plantas producidas en un metro cuadrado y multiplicarlo por el número de niveles a emplear para completar a una hectárea (10000 m²), los valores se encuentran en g/m² y plantas/ha.

4.4.4. Características físico químicas

a) Contenido de nutrientes

Esta variable fue obtenida mediante análisis químico en laboratorio de la Escuela Industrial Superior Pedro Domingo Murillo; para el nitrógeno, se empleó el método de absorción atómica a llama de horno de grafito; para el Fosforo, el método de absorción atómica con lámpara de fosforo; para el Potasio, el método de absorción atómica con lámpara de potasio; para el Boro de igual manera se empleó el método de absorción atómica con lámpara de boro; los valores obtenidos se encuentran en porcentajes.

b) Contenido de materia seca

Para determinar esta variable, se realizó el pesaje de las plantas en una balanza analítica en gramos, posteriormente fueron llevadas a la mufla por 48 horas, y nuevamente fueron pesadas, con los pesos obtenidos finalmente se determinó el porcentaje de peso fresco de cada planta en promedio.

c) Contenido de humedad

Se realizó con el procedimiento del contenido de materia seca, es la diferencia entre el peso de la planta y el peso seco de la planta; se utilizó una balanza analítica.

4.4.5. Rendimiento

a) Peso de planta completa

En la evaluación de la variable peso de materia verde en fresco, se pesaron las muestras de cada tratamiento utilizando la balanza analítica. Los valores obtenidos de cada planta se expresaron en (g/planta) después de la cosecha.

b) Peso de órgano cosechado

Esta variable se obtuvo con la diferencia entre el peso de la planta con el peso de las hojas; para esta medición se cortaron las hojas de la planta y se pesaron en una balanza analítica.

4.4.6. Análisis económico

Se realizó por medio del análisis de presupuestos parciales, que permiten diferenciar los costos; aparte que es un método recomendado para realizarlo en investigaciones de diversos tipos debido a que selecciona la mejor opción para compartir con el agricultor.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Energía del sistema

5.1.1. Energía suministrada

De acuerdo a la ecuación planteada por Ramos & Ramirez, (2016) en la página 16, la energía que es suministrada por cada fotón desde un sistema de iluminación artificial LED particular a las plantas en la tabla 5.

Tabla 5: Energía suministrada por colores.

Color	Longitud de onda	Joules	µmoles
Blanco	400 – 700	$3,62 \times 10^{-19}$	0,22
Violeta	415	$4,79 \times 10^{-19}$	0,29
Azul	470	$2,84 \times 10^{-19}$	0,25
Rojo	656	$3,03 \times 10^{-19}$	0,18
Combinación Rojo/Azul	563	$7,26 \times 10^{-19}$	0,44

De acuerdo a resultados obtenidos en µmoles y Joules, la iluminación LED del tratamiento 2 (violeta), brinda más energía que el resto de los tratamientos con un valor de 0,29 µmoles de energía; en cuanto al LED de color azul, tiene alta energía a comparación del color rojo; sin embargo, la sumatoria de energía formado por la combinación de colores rojo y azul, como tratamiento 3, es mayor funcionando en conjunto con un valor de 0,44 µmoles de energía para la planta; a diferencia de los otros tratamientos, la energía proporcionada por los LEDs blancos es menor al resto con un valor de 0,22 µmoles.

Se sabe que la radiación ultravioleta B (UV-B) puede ocasionar la reducción de la longitud del tallo, debido a un mecanismo de oxidación de fitohormonas indica Mark y Tevini, (1996) mencionado por Almansa, (2011).

Chen et al (2004) citado por Paniagua, (2014) indican que biólogos han aislado tres tipos de fotorreceptores en las plantas: los fitocromos, que son más sensibles a la región roja e infra roja del espectro de luz visible; y los criptocromos y fitotropinas, los cuales son dos tipos de fotorreceptores sensibles a la luz UV-A y azul; las plantas sometidas a la iluminación rojo y azul, obtuvieron un mejor crecimiento el cual se produjo por la estimulación de estos fotorreceptores, con esto, se puede concordar con los autores mencionados anteriormente

El crecimiento La luz UV-B es captada por el fotorreceptor UVR8. Este tipo de luz es perjudicial para las plantas a grandes dosis, debido a su capacidad degradativa del ADN. En cuanto, a pequeñas dosis, la UV-B y la UV-A incrementan la tolerancia al estrés de las plantas. Por lo general, las plantas cultivadas bajo luz ultravioleta tienen hojas gruesas y también poseen tallos y entrenudos cortos señalan Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, (2018).

La luz azul está relacionada con aspectos fotomorfogénicos de crecimiento y desarrollo de la planta, (Sundström, 2000 citado por Almansa, (2011) los criptocromos regulan muchas respuestas fotomorfogénicas, tales como la inhibición del alargamiento del tallo.

La luz roja lejana causa la floración prematura de muchas especies, y la elongación de tallo y pecíolos mencionan Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, (2018); como el tratamiento T3 llevado a cabo fue de luz azul y roja al 50% las plantas que crecieron con esta combinación de colores no presentaron elongación del tallo, esto se debe a que la luz azul contrarrestó a la luz roja y entre ambos mantuvieron la distancia entre los nudos y el tamaño del tallo.

La luz roja es percibida por los fitocromos que la absorben como la roja lejana, y convierte los fitocromos a su estado inactivo, Pr, que tiene un pico de absorción a 660 nm. La forma Pr del fitocromo se sintetiza en la oscuridad o en condiciones de luz roja lejana. Cuando el Pr absorbe la luz roja, se convierte en la forma de absorción del rojo lejano, Pfr, que tiene el pico de absorción a 730 nm. La conversión de Pr a Pfr puede revertirse con la aplicación de luz roja lejana y oscuridad según Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, (2018).

5.1.2. Eficiencia fotosintética

Mediante el luxómetro empleado se obtuvo los siguientes valores de densidad de flujo de fotones o PPF obtenidos en el experimento se presenta en la tabla 6.

Tabla 6: Eficiencia fotosintética.

Tratamiento	$\mu\text{mol/s}$
T1 (blanco 400-700 nm)	11
T2 (violeta 415 nm)	29
T3 (rojo/azul 470-656 nm)	38

Como indica Horticulturaled, (2020) con los valores mencionados anteriormente se puede calcular la eficiencia de fotones para verificar la eficiencia de un sistema de iluminación de horticultura en la conversión de energía eléctrica en fotones de PAR. Como recordatorio, la unidad para PPF es $\mu\text{mol/s}$, y la unidad para medir vatios es Joule por segundo (J/s), por lo tanto, los segundos en el numerador y el denominador se anulan y la unidad se convierte en $\mu\text{mol/J}$ como se observa en la tabla 7.

Tabla 7: Unidades de energía en $\mu\text{mol/J}$.

Tratamiento	$\mu\text{mol/J}$
T1 (blanco 400-700 nm)	$3,04 \times 10^{19}$
T2 (violeta 415 nm)	$6,05 \times 10^{19}$
T3 (rojo/azul 470-656 nm)	$5,23 \times 10^{19}$

En el cuadro anterior se pueden observar los resultados obtenidos para la eficiencia fotosintética de los cuales el tratamiento 1 obtuvo un valor de $3,04 \times 10^{19} \mu\text{mol/J}$, el resultado

del tratamiento 2 fue de $6,05 \times 10^{19}$ $\mu\text{mol}/\text{J}$ siendo el de más alto valor en cuanto a eficiencia fotosintética, finalmente el tratamiento 3 obtuvo $5,23 \times 10^{19}$ $\mu\text{mol}/\text{J}$.

Cabe recordar que cuanto más alto sea este número, más eficiente será un sistema de iluminación para convertir energía eléctrica en fotones dentro del PAR; en este caso es el tratamiento 2, iluminación con color violeta.

Horticulturaled, (2020) informa que el uso de tecnología LED respecto al resto de técnicas tradicionales como las lámparas de alta presión de sodio ha permitido reducir considerablemente la temperatura en los espacios de cultivo, ya que es una fuente de luz que no emite infrarrojo (IR) y permite mantener la distancia y la intensidad de la fuente de luz mucho más cerca de nuestras plantas sin dañarlas ni sin que sufran estrés, en crecimiento a 40 cm y en floración de 20 a 30 cm.

Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, (2018) indican que regulando la cantidad de luz ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) y el espectro se pueden obtener, diferentes características del cultivo que satisfacen las necesidades del agricultor para cada tipo de instalación y producto como la floración y el crecimiento vegetativo, lo cual en la Variedad White Boston, el espectro violeta, brindó mejores rendimientos en cuanto a variables agronómicas y las características físicas de las plantas.

Mi competencia principal es la tecnología de cultivo mediante el control eficaz de la fotorrespiración y la fotosíntesis; no sólo controlamos la noche y el día, sino que también proporcionamos un mejor ambiente “durmiente” para el crecimiento de las verduras y aumentamos la efectividad de la luz (Shimamura, 2014)².

5.2. Variables agronómicas

5.2.1. Contenido de clorofila a la cosecha

La síntesis de clorofila requiere nitrógeno ya que parte de ésta molécula está involucrado en el proceso de la fotosíntesis (Rincón & Liarreto, 2010). El análisis de varianza se muestra en la tabla 8.

Tabla 8: análisis de varianza del contenido de clorofila con $\alpha=0,05$.

<i>Fuente</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado de la media</i>	<i>F-Valor</i>	<i>Pr > F</i>
<i>Tratamiento</i>	2	912811761	456405881	6.47	0.0124*
<i>Error</i>	12	847029512	70585793		
<i>Total corregido</i>	14	1759841273			
$R^2 = 0.519$		$CV=11.90 \%$	$Media = 70550.60 \text{ SPAD}$		

² Texto traducido al inglés del japonés, versión en inglés en anexos como TEXTO 2

Con este resultado, la iluminación artificial si tuvo efecto en la cantidad de clorofila al momento de la cosecha en las plantas; el Coeficiente de Variabilidad, indica que la cantidad de clorofila encontrada en las muestras presenta una baja variabilidad.

Debido a los resultados obtenidos anteriormente, se realizó una prueba Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos que se observa en la tabla 9.

Tabla 9: Prueba Duncan del contenido de clorofila con $\alpha=0,05$.

Tratamiento	Media (SPAD)	Duncan (5%)
T3 (luz azul/roja 470-700 nm)	76241	A
T1(luz blanca 500-700 nm)	75891	A
T2(luz violeta 415 nm)	59520	B

Por consiguiente, las plantas con iluminación de color azul y rojo obtuvieron unos mejores resultados en el contenido de clorofila en relación a los demás tratamientos; el que menor clorofila obtuvo es el tratamiento con luz violeta teniendo un valor mucho menor en comparación del resto de tratamientos.

El contenido de clorofila fue mayor en la luz roja y verde, la luz azul fue diferente incluso del testigo según el experimento de Ortiz, (2017); en el trabajo presente el tratamiento T3, la combinación de colores, obtuvo mejores resultados de manera general con 76240,5 SPAD; en cambio el T2 con iluminación violeta obtuvo 59520,3 SPAD quedando muy por debajo del tratamiento 1 con luz blanca que obtuvo 75891 SPAD.

Messiel et al (2011) referido por Ortiz, (2017), reconocen que la luz azul provoca carencia de clorofila, puede que incide en las lecturas más bajas en plantas sometidas a luz azul; esta información llega a ser contradictoria, debido que en el tratamiento de combinación de colores se obtuvo una gran cantidad de clorofila y casi de manera uniforme en las repeticiones del experimento, esto puede deberse a que la clorofila absorbe luz violeta, azul y roja, los carotenoides absorben luz azul y verde y las ficocianinas absorben luz verde y amarilla según Horticulturaled, (2020).

Mencionando a Villar (2016) las plantas perciben cambios en la proporción rojo y rojo lejano que se encuentra en las principales bandas del espectro fotosintéticamente activo además que tiene mejor eficiencia el transformación de energía lumínica a química esta es una respuesta a un alto contenido de clorofila citado por Ortiz, (2017), debido a este fenómeno, el tratamiento con combinación de colores obtuvo mejor cantidad de clorofila.

5.2.2. Crecimiento de la planta

El crecimiento promedio de la plantas de lechuga muestreadas fue paulatino por cerca de 120 días; se muestran en las figuras 5, 6 y 7.

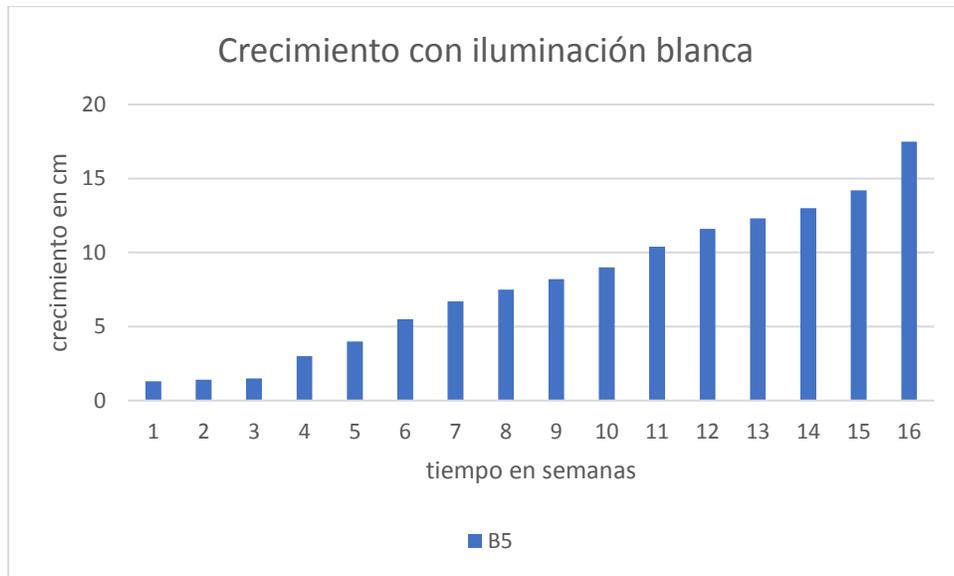


Figura 5: Crecimiento promedio con luz blanca.

En la figura anterior se puede apreciar el crecimiento de las plantas del cual el mejor fue el blanco muestra 5 (B5) con 17,5 cm de longitud de hoja, en cuanto al menor de ellos están blanco 1 y 3 con 14 cm.

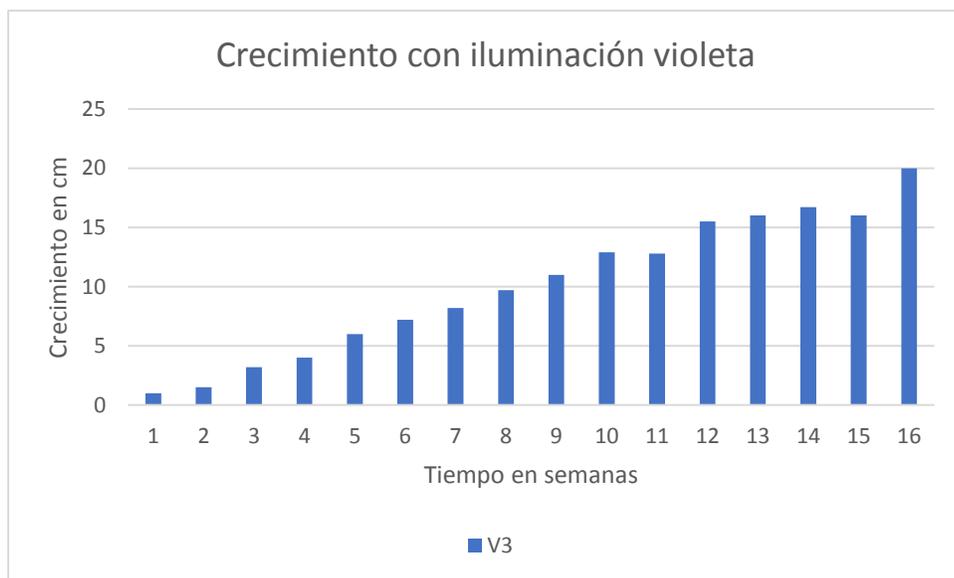


Figura 6: Crecimiento con luz violeta.

En la figura se puede observar el crecimiento de las plantas con iluminación violeta del cual los mejores fueron violeta 3 y 4 (V3, V4) con 20 cm de longitud de hoja, en cuanto al menor de ellos se encuentra violeta 1 con 18 cm.

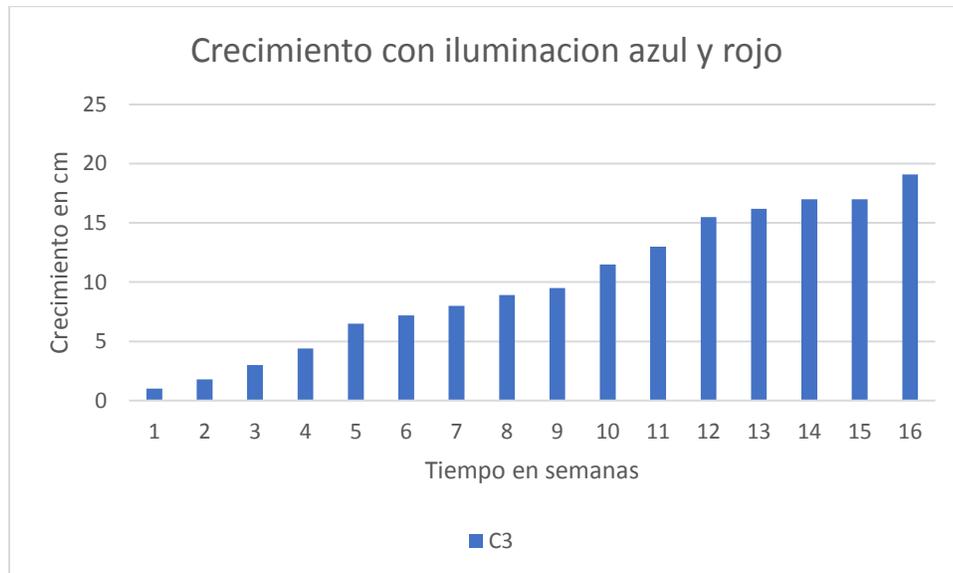


Figura 7: Crecimiento promedio con combinación azul y rojo.

En la figura anterior se puede ver el crecimiento de las plantas con iluminación combinada de azul y rojo del cual el mejor fue el color 3 con 19,1 cm de longitud de hoja, en cuanto al menor de ellos está color 1 con 15,1 cm.

Con la iluminación bicolor y violeta se obtuvo mayor crecimiento en longitud de las plantas, estos resultados podrían deberse a la cantidad de energía liberada del emisor de luz, 0,44 μmol en el caso bicolor y 0,29 en el caso de iluminación con LED violeta. Mark y Tevini, 1996 mencionado por Almansa, (2011) infieren que la radiación ultravioleta B (UV-B) puede ocasionar la reducción de la longitud del tallo, debido a un mecanismo de oxidación de fitohormonas; en este caso las hojas tuvieron un mejor crecimiento con luz violeta 415 nm, en el caso del tallo no se observaron características anormales en una planta de lechuga.

Las plantas sometidas a la luz violeta tuvieron un desarrollo uniforme en el crecimiento y desarrollo. El ácido indol-3-acético puede causar cambios en el tamaño celular que es probable que sea alterado por los rayos UV-B afirma Mark y Tevini, (1996) mencionado por Almansa, (2011), tomando en cuenta esta mención, las plantas sometidas a la luz violeta, no tuvieron cambios físicos notorios a simple vista, pero si cambios en sus componentes químicos.

Navas, Castro, Durán, Martín, & Martín, (2010) en su ensayo en cultivo de azafrán indican que el crecimiento en altura los cormos del Ensayo 2 con irradiación en el espectro azul presentaron mayor crecimiento, seguidos por los cormos del Ensayo 1 con irradiación en el espectro del rojo cercano y por último los cormos del Ensayo control con irradiación solar; en el presente trabajo se obtuvieron mejores valores de crecimiento en el tratamiento T2, con esto es debido a la diferencia de cultivos de lechuga y azafrán.

La luz tiene un rol muy importante en la fotosíntesis, crecimiento y morfogénesis de las plantas que dependen de la longitud de onda, además de ser una de las variables que afectan la concentración de fitoquímicos en ellas; por este motivo los sistemas de

iluminación empleados para cultivos de ambientes controlados son un factor muy importante porque determinan el costo y la calidad nutricional de hortalizas de invernadero y de esta manera puedan surgir los avances tecnológicos en esta valiosa área (Paniagua, 2014).

El enfoque para el uso de Leds rojos y azules viene de la idea que el suministro de luz roja y azul monocromática de acuerdo con la curva de absorción de la clorofila se traduciría en un crecimiento máximo señalan Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, (2018) al cual el trabajo presentado obtuvo resultados similares en el tratamiento T2.

Sin embargo, como las plantas tienen también pigmentos que absorben longitudes de onda distintas de rojo y azul y como también las longitudes de onda más allá de la zona PAR pueden afectar significativamente a la morfología y el metabolismo de las plantas (Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, 2018), tomando en cuenta esta información, los cambios fisiológicos en crecimiento se pudieron notar en el tratamiento T2; por lo tanto, en el cultivo de lechuga las longitudes de onda diferentes al PAR (luz violeta) si afectó al desarrollo del cultivo, sin embargo, en algunos parámetros los resultados obtenidos fueron mejores.

5.2.3. Longitud de hoja

Desde el punto de vista agronómico la altura de planta, número y tamaño de hojas son indicadores de crecimiento en sistemas orgánicos (Fennech, y otros, 2009).

El análisis de varianza para esta variable se aprecia en la tabla 10.

Tabla 10: Análisis de varianza de la variable longitud de hoja con $\alpha=0,05$.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
<i>Tratamiento</i>	2	32.10	16.05	8.24	0.0056**
<i>Error</i>	12	23.38	1.95		
<i>Total corregido</i>	14	55.49			

$R^2 = 0.58$
 $CV=8.02 \%$
 $Media = 17.41 \text{ cm}$

Con el resultado obtenido mediante análisis estadístico, se indica que la iluminación artificial con cinta A-LED 5050 – IP65 si tuvo efecto altamente significativo en la longitud de hoja de las plantas al momento de la cosecha; el Coeficiente de Variabilidad, indica que la longitud registrada de las muestras presenta una baja variabilidad y el promedio registrado fue de 17,41 cm para esta variable.

Debido a los resultados obtenidos, se realizó una prueba Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos que se encuentran en la tabla 11.

Tabla 11: Prueba Duncan de la variable longitud de hoja.

Tratamiento	Media (cm)	Duncan (5%)
T2 (luz violeta 415 nm)	18.90	A
T3 (luz azul/roja 470-700 nm)	17.90	A
T1 (luz blanca 500 – 700 nm)	15.42	B

En cuanto a la diferencia entre tratamientos, las plantas sometidas a luz violeta se produjeron con mayor longitud de hoja que los demás tratamientos. Existió diferencia significativa en la longitud debido al color de luz y el flujo luminoso. Los tratamientos con iluminación violeta, T2, presentaron hojas más largas (18,9 cm, en promedio), que las plantas en el tratamiento T1 (15,4 cm, en promedio); el T3 presento también buenos resultados con una media de 17,9 cm.

Jimenez L. , (2016) obtuvo con 8.90 cm de la variedad Saladbowl que presento el mayor promedio, mientras que la variedad Winterhaven obtuvo 6.03 cm fue la que presenta menor valor; en el caso de la variedad White Boston la mayor longitud lo obtuvieron las repeticiones 3 y 4 del tratamiento T2 con un promedio de 20 cm de longitud para ambos casos.

Las plantas que crecen bajo una irradiación con elevada luz azul tienen entrenudos corto y alto contenido de materia seca indican (Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, 2018) cuyo comportamiento se observó en la longitud de las hojas de lechuga en el trabajo presente concordando cuyo tratamiento 3 y repetición 1 obtuvo 15,5, cm de largo (Almansa, 2011)

Jimenez L. , (2016) indica que referente a la interacción lámparas x variedades, en respuesta el mejor fue de la lámpara LED de 150 W con espectro de luz azul y rojo. Los resultados obtenidos con esta variable permite afirmar que esta Lámpara, tiene más eficiencia para el desarrollo de altura de planta en lechuga en el cultivar SaladBowl; contrariamente a lo mencionado, el tratamiento T2 con luz violeta tuvo mejor efecto en la variedad White Boston, de modo que la energía emitida por la fuente de luz cercana al UV debió inferir en el crecimiento de la hoja.

5.2.4. Número de Hojas

Los resultados del análisis de varianza se observan en los datos de la tabla 12.

Tabla 12: Análisis de varianza de la variable número de hojas a la cosecha con $\alpha=0,05$.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	2	8,53	4,27	2,46	0,13
Error	12	20,8	1,73		
Total corregido	14	29,33			
$R^2 = 0.29$		CV=7.90 %	Media = 16 hojas		

Con el análisis estadístico se afirma que el efecto de la iluminación de la cinta LED 5050 – IP65 no tuvo un efecto en el número de hojas, el coeficiente de variabilidad indica que se presentó una baja variabilidad y el promedio para esta variable fue de 16 hojas.

El color de la luz LEDs roja en la variedad Trionfo d' estate presentó un mejor comportamiento agronómico, esta variedad obtuvo el mayor número de hojas (9,63) con respecto a Lollo Bionda. Este resultado es superior a lo reportado por Jimenez L. , (2016) que en la investigación denominada *Efecto de la intensidad lumínica de lámparas LEDs en la producción de lechuga (Lactuca sativa)* sólo obtuvo un promedio de 5,23 hojas a los 16 días en que tomó esta variable indica Bustamante, (2012); tomando en cuenta lo mencionado anteriormente los tratamientos T2 y T3 obtuvieron un promedio de 17,2 hojas a la cosecha, cabe recalcar que las variables de temperatura y humedad relativa, las cuales se encontraron en valores constantes, tuvieron influencia en el crecimiento debido a la baja temperatura registrada por los sensores.

5.3. Eficiencia del uso de superficie

Tomando en cuenta del uso eficiente del espacio disponible en un ambiente y empleando 4 niveles por estante se tendrían 4 metros cuadrados en vertical, los cuales se describen en la tabla 13.

Tabla 13: Cantidad de superficie en relación al número de estantes.

N° de estantes	N° de niveles	Cantidad de superficie
1 estante	4 niveles	4 m2
2 estantes	4 niveles	8 m2
25 estantes	4 niveles	100 m2
250 estantes	4 niveles	1000 m2
2500 estantes	4 niveles	10000 m2

Entonces, para 8 niveles por estante se llegaría a 8 metros cuadrados en vertical sobre 1 metro cuadrado de superficie real; con estos datos en mente se obtiene 1250 estantes de 8 niveles representando a una hectárea.

Distribuidos los 1250 estantes se pueden distribuir en una superficie de 50 x 25 y si el 8% del espacio está destinado para pasillos y espacios extra en un sistema intensivo de producción se emplearía 1562 metros cuadrados equivalentes a 1 hectárea en vertical representando el 15,62% de la superficie real de una hectárea.

Con lechos de cultivo más delgados ahora, podemos aumentar los niveles de 5 a 8, y por lo tanto aumentar la producción. Si la cultura de campo abierto fuera 1, esto sería 100. Por relación de área, por 100 (Kimura, 2014)³.

³ Texto traducido al inglés del japonés, versión en inglés en anexos como TEXTO 3

Entonces, para lograr un establecimiento uniforme, todas las plantas deben recibir la misma cantidad de luz, pero las plántulas que emerjen 2 o 3 días después no pueden capturar la misma cantidad de luz que sus vecinas más grandes; por lo tanto, su tamaño al momento de la cosecha será inferior. Un método para evitar esta competencia, tanto en siembra directa como en preparación de almácigos, es el uso de semillas acondicionadas. El trabajo presentado por Saavedra, et al, (2017), tenía iluminación por niveles; por lo tanto las plantas de lechuga, recibieron la misma cantidad de luz.

Se pudo demostrar que el sistema NFT Vertical nos permite utilizar un menor espacio de suelo y producir más por metro cuadrado, coincidiendo con lo expuesto por Hydroenvironment (2007). Citado por (Bustamante, (2012); aplicando este sistema con la iluminación artificial se puede igualar a una hectárea con 8 niveles de 1m² sobre una superficie de 50 x 25 m².

Mark Thomann, el consejero delegado de FarmedHere, otra de las compañías punteras en el sector de los cultivos de interior, señalaba en declaraciones a International Business Time que su empresa podía cultivar un 200% más de alimento por metro cuadrado que la agricultura tradicional y sin utilizar fertilizantes químicos. Dejando a un lado la cifra contenida en esta afirmación lo cierto es que los cultivos no están sujetos a la variación del clima. Los gestores de la antigua fábrica de Sony también son optimistas. Señalan que monitorizando la fotosíntesis de las lechugas, estas pueden crecer dos veces y media más rápido que en el exterior. También apuntan que el producto que se desperdicia se reduce en un 40%. Bejerano, (2014); con la experiencia adquirida al realizar el trabajo, es posible generar 18 plantas en una superficie de 1 x 0,5 m, con 8 niveles se obtendrían 144 plantas sobre la misma superficie, optimizando así, el espacio de producción.

5.4. Características físico – químicas

La luz que las plantas reciben no sólo sirve para estimular el desarrollo de las plantas, sino que también impulsa la acumulación de compuestos químicos en los cultivos, que pueden o no tener relevancia en la salud humana (Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, 2018).

5.4.1. Contenido de nutrientes

a) Porcentaje de Nitrógeno

Mediante el análisis de varianza se obtuvieron los resultados de la tabla 14.

Tabla 14: análisis de varianza de la variable porcentaje de nitrógeno con $\alpha=0,05$.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	2	0.054	0.027	4.13	0.0432*
Error	12	0.079	0.006		
Total corregido	14	0.134			

$R^2 = 0.41$

$CV = 62.47\%$

$Media = 0.13\% \text{ Nitrógeno}$

Este resultado indica que la iluminación artificial si tuvo efecto significativo en la cantidad de proteína en las plantas al momento de la cosecha; el Coeficiente de Variabilidad, indica que la cantidad de proteína encontrada en las muestras presenta una alta variabilidad y que el promedio obtenido para esta variable fue de 0,13%.

Ninguno de los cultivares de lechuga sobrepasó el contenido máximo estipulado por la Comisión Europea y tampoco existieron diferencias consistentes entre ellas. (En este estudio se determinaron los contenidos de nitrato de lechugas cultivadas en el sistema hidropónico NFT vertical con dos cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.) fueron evaluados “Lollo bionda” y “Tironfo d’ estate” el contenido de nitrato foliar fluctuó entre 3,23 a 3,38 mg/kg donde nos dio como resultado que son aptas para el consumo humano (Bustamante, 2012).

Debido a los resultados obtenidos anteriormente, se realizó una prueba Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos que se observan en la tabla 15.

Tabla 15: Prueba Duncan del porcentaje de nitrógeno.

Tratamiento	Media (%/planta)	Duncan (5%)
T2 (luz violeta 415 nm)	0.21	A
T3 (luz azul/roja 470-700 nm)	0.09	B
T1 (luz blanca 500 – 700 nm)	0.08	B

Por consiguiente, las plantas sometidas a luz violeta obtuvieron una mejor porcentaje de nitrógeno en relación a los demás tratamientos. Existe una diferencia altamente significativa con relación a los demás tratamientos debido al color de luz y el flujo luminoso. Los tratamientos con iluminación violeta, T2, tuvieron un mejor resultado con 0,215 %; el T1 resultó con 0,081 % y el T3 presento también bajas lecturas con 0,094 %.

Otro ejemplo es el contenido de nitratos, que en la actualidad se ha convertido en un compuesto preocupante para la Organización Mundial de la Salud (OMS). La OMS ha fijado límites de consumo diario de nitratos, que los podemos encontrar principalmente en hortalizas como lechuga, brócoli, espinaca, acelga, y otras plantas de fácil acumulación de estos compuestos; por lo tanto, al ser productos que se incluyen en la dieta básica de las personas, la preocupación está justificada. El contenido de nitratos puede regularse también mediante la iluminación con lámparas LEDs de espectros concretos (Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, 2018).

La Comisión Europea indica que las plantas de lechuga cultivadas en invernadero en período invernal deberían contener una concentración de nitrato foliar menor a 4.500 mg/kg (peso fresco). En el estudio de contenido de nitratos en lechugas cultivadas en sistemas hidropónicos realizado por Carrasco, Tapia, Urrestarazu (2006).

b) Contenido de fósforo

Del análisis de varianza se obtuvieron los datos de la tabla 16.

Tabla 16: Análisis de varianza del contenido de fosforo con $\alpha=0,05$.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	2	7.95	3.97	0.39	0.68
Error	12	121.55	10.13		
Total corregido	14	129.50			

$R^2 = 0.06$ $CV=83.05 \%$ *Media = 3.83 % Fósforo*

Con el análisis estadístico se afirma que el efecto de la iluminación de la cinta LED 5050 – IP65 no tuvo un efecto en el contenido de fósforo; en esta variable, el coeficiente de variabilidad indica que presenta una alta variabilidad y que el promedio obtenido fue de 3,83 % de fósforo.

Las plantas sometidas a luz blanca obtuvieron un mejor promedio en cuanto a la asimilación de fosforo en relación a los demás tratamientos. El tratamiento con iluminación violeta 3,81% de contenido de fosforo, el tratamiento con colores azul y rojo obtuvo un 3,065% siendo el valor mas bajo en la variable consumo de fosforo.

c) Porcentaje de Potasio

Con el análisis de varianza se obtuvieron los resultados de la tabla 17.

Tabla 17: análisis de varianza del contenido de potasio $\alpha=0,05$.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	2	4.06	2.01	27.49	<.0001**
Error	12	0.88	0.07		
Total corregido	14	4.89			

$R^2 = 0.82$ $CV=35.26 \%$ *Media = 0.77 % Potasio*

Con el resultado obtenido mediante análisis estadístico, se indica que la iluminación artificial con cinta A-LED 5050 – IP65 si tuvo efecto altamente significativo en el contenido de potasio al momento de la cosecha de las plantas; el Coeficiente de Variabilidad, indica que la longitud registrada de las muestras presenta una alta variabilidad y que el promedio en esta variable fue de 0,77 %.

Debido a los resultados obtenidos anteriormente, se realizó una prueba Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos en la tabla 18.

Tabla 18: Prueba Duncan del contenido de potasio.

Tratamiento	Media (%/planta)	Duncan (5%)
T1 (luz blanca 500 – 700 nm)	1.39	A
T2 (luz violeta 415 nm)	0.79	B
T3 (luz azul/roja 470-700 nm)	0.12	C

Por consiguiente, el tratamiento con iluminación blanca, T1, obtuvo un mejor resultado con 1,39 g/planta en relación a los demás tratamientos; el T2 resultó con 0,79 g/planta y el T3 presentó también bajas lecturas con una media de 0,12 g/planta.

Se considera que niveles de K disponible entre 100 y 150 ppm son suficientes para el cultivo.

El potasio (K) presenta también una movilidad menor a la del N. El contenido de K en el tejido vegetal al momento de cosecha en plantas hidropónicas (sin restricciones) generalmente es de un 3%. Con esto, la extracción calculada de este nutriente por el cultivo es menor.

Las hortalizas de hoja por lo general presentan niveles de P en el tejido de 0,6% (base materia seca). Si con esta información se calculase la extracción mediante una ecuación similar a aquella presentada para el N, se tendría que la extracción por ciclo productivo es de 15 kg P/ha o 30 kg P/ha (Saavedra, y otros, 2017).

d) Contenido de Boro

El análisis de varianza para esta variable se presenta en la tabla 19.

Tabla 19: análisis de varianza de la variable contenido de boro $\alpha=0,05$.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F – valor	Pr > F
Tratamiento	2	0.31	0.15	3.37	0.069*
Error	12	0.55	0.04		
Total corregido	14	0.86			

$R^2 = 0.36$ $CV = 102.93 \%$ $Media = 0.21 \%$ Boro

El resultado obtenido mediante análisis estadístico, señala que la iluminación artificial con cinta A-LED 5050 – IP65, tuvo un efecto significativo en el contenido de Boro (en %) al momento de la cosecha de las plantas; el Coeficiente de Variabilidad, indica que el porcentaje de Boro en las muestras presenta una alta variabilidad y la media obtenida fue de 0,21 %.

Debido a los resultados obtenidos anteriormente, se realizó una prueba Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos que se observan en la tabla 20.

Tabla 20: Prueba Duncan del contenido de boro.

Tratamiento	Media (%/planta)	Duncan (5%)	
T2 (luz violeta 415 nm)	0.4019	A	
T1 (luz blanca 500 – 700 nm)	0.1598	A	B
T3 (luz azul/roja 470-700 nm)	0.0611		B

Por consiguiente, las plantas sometidas a luz violeta obtuvieron un mejor resultado en cuanto a contenido de boro en relación a los demás tratamientos con un valor de 0,4 %. El tratamiento con iluminación blanca, obtuvo un resultado de 0,16 % y el T3 resultó con 0,06 % siendo el resultado más bajo en esta variable.

A pesar de ser un micronutriente, el cultivo de la lechuga presenta altos niveles de extracción de zinc (Zn) en comparación con otros micronutrientes, presentando concentraciones en el tejido de 80 mg/kg (sobre la base de materia seca). Según Almansa, (2011) el Boro aumenta el rendimiento o mejora la calidad de las frutas, verduras y forrajes, está relacionado con la asimilación del calcio y con la transferencia del azúcar dentro de las plantas. Es importante para la buena calidad de las semillas de las especies leguminosas.

La alta radiación y el corto fotoperiodo (HISP) $225 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^2$ produjo la disminución de la absorción de N-P-K después de ocho semanas desde el trasplante. Esta iluminación disminuyó significativamente la concentración de N en la planta debido a que la luz estimula la producción de materia seca y causa escasez de N. la relación N:K se redujo con la iluminación suplementaria, siguiendo probablemente un efecto depresivo de la planta en la región apical debido al efecto que la iluminación afecta la absorción de N. sin embargo el efecto de los tratamientos de luz sobre el contenido de P en los brotes no fue significativo (Almansa, 2011).

5.4.2. Materia Seca

El análisis estadístico para esta variable, detectó una diferencia significativa con respecto al empleo de luz artificial cinta LED 5050 – IP65 expresada en la tabla 21.

Tabla 21: análisis de varianza de la variable materia seca $\alpha=0,05$.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	2	154.72	77.36	2.87	0.096*
Error	12	323.02	26.92		
Total corregido	14	477.75			
$R^2 = 0.32$		$CV = 26.58 \%$	$Media = 19.52 \text{ g}$		

La iluminación artificial si tuvo efecto en la cantidad de materia seca al momento de la cosecha en las plantas; el Coeficiente de Variabilidad, indica que el contenido de materia seca encontrado en las muestras presenta una alta variabilidad y que la media en para esta variable fue de 19,52 g.

Debido a los resultados obtenidos anteriormente, se realizó una prueba Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos que se observa en la tabla 22.

Tabla 22: prueba Duncan de la variable materia seca

Tratamiento	Media (g)	Duncan (5%)	
<i>T1 (luz blanca 500 – 700 nm)</i>	23.79	A	
<i>T3 (luz azul/roja 470-700 nm)</i>	18.73	A	B
<i>T2 (luz violeta 415 nm)</i>	16.04		B

Por consiguiente, las plantas sometidas a luz blanca obtuvieron un mejor resultado en cuanto a contenido de materia seca con 23,79 g seguido de T3 con una media de 18,73 g y finalmente el T2 obtuvo un valor de 16,04 g siendo el resultado más bajo en esta variable.

Las plantulas que crecieron bajo la iluminacion LED azul, presentó un mayor contenido de peso seco que fue diferente estadisticamente al testigo, el menor contenido de peso seco se encontro en el tratamiento con luz verde (Almansa, 2011); a comparacion de su trabajo, las plantas iluminadas con luz violeta obtuvieron mayor valor en materia seca, la razón que incide en este comportamiento deberia ser la longitud de onda cercana una de otra empleada (470 – 415 nm), cabe recalcar que la intensidad luminica y el flujo luminoso de ambos trabajos se realizaron en condiciones diferentes, pongamos por caso emplear emisores de luz de alta intensidad con otros de baja intensidad, los resultados serán completamente diferentes.

Por otro lado, las plantas del tratamiento T1 obtuvieron un menor valor en contenido de materia seca, de manera que la energia generada por la luz es diferente para cada planta tal como indican Casierra y Rojas (2009) mencionado por Ortiz, (2017) que se obtuvo el menor valor con el tratamiento de luz azul en plantulas de brocoli; por otra parte Villar (2016), citado por el mismo autor, demostró que se incremento la biomasa en plantulas de tomate con color azul tanto en peso fresco como en peso seco.

No obstante lo señalado por Bures, Urrestarazu, & Kotiranta, (2018) que las plantas que crecen bajo una irradiación con elevada luz azul tienen alto contenido de materia seca, no concuerda con los resultados obtenidos, el contenido de materia seca es menor en referencia a las plantas que crecieron con luz blanca con 23,79% y 18,73% respectivamente.

Casierra y Pinto (2011) mencionado por Ortiz, (2017), demostraron que las plantas cubiertas con luz roja obtienen mejor peso en comparación de la cobertura azul que no coincide con los resultados. Tampoco coincide con el trabajo de Casierra y Rojas (2009) en plantas de brocoli con cobertura roja que obtuvo mayor porcentaje de materia seca, este resultado se

obtuvo por cobertura y no por iluminación LED, debido a ese punto se variaron los resultados.

5.4.3. Contenido de humedad

El análisis de varianza para esta variable, brinda los resultados de la tabla 23.

Tabla 23: análisis de varianza de la variable del contenido de humedad $\alpha=0,05$.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
<i>Tratamiento</i>	2	154.72	77.36	2.87	0.0956*
<i>Error</i>	12	323.03	26.92		
<i>Total corregido</i>	14	477.75			

$$R^2 = 0.32$$

$$CV=6.45 \%$$

$$Media = 80.48 \% \text{ humedad}$$

Con este resultado, se señala que la iluminación artificial si tuvo efecto en el contenido de humedad al momento de la cosecha de las plantas; el Coeficiente de Variabilidad, indica que para esta variable, las muestras presentan una baja variabilidad y un promedio de 80.48% siendo este valor muy alto.

Debido a los resultados obtenidos anteriormente, se realizó una prueba Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos que se ven en la tabla 24.

Tabla 24: prueba Duncan del contenido de humedad.

Tratamiento	Media (%)	Duncan (5%)	
<i>T2 (luz violeta 415 nm)</i>	83.960	A	
<i>T3 (luz azul/roja 470-700 nm)</i>	81.266	A	B
<i>T1 (luz blanca 500 – 700 nm)</i>	76.212		B

La tabla anterior indica que las plantas sometidas a luz violeta obtuvieron un mejor resultado en cuanto a contenido de humedad en relación a los demás tratamientos con un valor de 83,96 %; El tratamiento con iluminación de color azul/rojo, obtuvo un resultado de 81,27 % y el T1 de color blanco resultó con 76,21 % siendo el resultado más bajo en esta variable.

Las plantas están formadas en más del 95% por agua, por eso este elemento es tan necesario para su desarrollo. El agua es clave en la fotosíntesis, en el enfriamiento de los órganos o equilibrio homeostático, transporte de nutrientes a través de la planta; en fin, participa en casi todos los procesos metabólicos de la planta. Sin agua, no hay crecimiento ni desarrollo de las hortalizas ni de ningún vegetal (Saavedra, y otros, 2017).

Las fototropinas son activadas por la radiación azul e inducen a la apertura de los estomas con un aumento de la transpiración generando así, pérdidas del agua. Por otro lado, cuando

la NIR se incrementa, la energía se convierte en calor para mantener la temperatura se produce la transpiración de la hoja a través de la pérdida de agua (Almansa, 2011).

El mayor peso húmedo en las plántulas se obtuvo con la luz azul, el menor resultado fue de luz roja Villar, 2009 mencionado por Ortiz, (2017) indican que el aumento de biomasa en peso húmedo fue con luz azul en plantas de tomate, no obstante Casierra y Pinto (2011), citados por el mismo autor, indican que el mayor peso se obtuvo con las plantas sometidas a luz roja, el experimento de ambos autores es diferente debido a que uno trabajo con plantas y el otro con plántulas de maíz; el mayor dato obtenido en este trabajo es del tratamiento T1 con luz blanca con 23,79 % a diferencia de las plantas iluminadas con luces azul y rojo con 18,73 % que por la interacción de ambas luces neutralizaron sus efectos en las plantas o también pudo ser debido al material vegetal con el que se trabajó.

5.5. Rendimiento

5.5.1. Peso de planta completa

Con respecto al peso de planta completa, del análisis de varianza, se obtuvieron los resultados de la tabla 25.

Tabla 25: análisis de varianza de la variable peso de planta $\alpha=0,05$.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
<i>Tratamiento</i>	2	1499.93	749.96	4.16	0.0424*
<i>Error</i>	12	2163.51	180.29		
<i>Total corregido</i>	14	3663.43			
$R^2 = 0.409$		$CV=35.119 \%$	$Media = 38.233 g$		

Este resultado, señala que la iluminación artificial si tuvo efecto significativo en el peso de las plantas al momento de la cosecha; el Coeficiente de Variabilidad, indica que el peso de la planta completa registrado en las muestras presenta una alta variabilidad y que el promedio para esta variable fue de 38,233 g.

Debido a los resultados se realizó una prueba Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos en la tabla 26.

Tabla 26: prueba Duncan de la variable peso de planta.

Tratamiento	Media (g)	Duncan (5%)	
T2 (luz violeta 415 nm)	48.820	A	
T3 (luz azul/roja 470-700 nm)	41.060	A	B
T1 (luz blanca 500 – 700 nm)	24.820	B	

Hay que hacer notar que las plantas sometidas a luz violeta se produjeron con mayor peso de planta que los demás tratamientos. Existe una diferencia significativa en el peso debido al color de luz y el flujo luminoso. Los tratamientos con iluminación violeta, T2, tuvieron un mayor peso de planta completa con 48,820 g en promedio, en relación a las plantas en el tratamiento T1 (24,820 g en promedio). El T3 presento también buenos resultados con una media de 41,060 g.

De acuerdo a los resultados, la energía aportada por los LEDs tuvo un papel muy importante en el crecimiento y desarrollo del cultivo tal como señala Rodriguez, (2018), la densidad o distancia de trasplante de una planta implica la intervención, principal de la luz, la adecuada cantidad absorbida de luz determina que una planta tenga un desarrollo normal en cuanto a tamaño y cantidad de hojas, este proceso fisiológico incide directamente en el rendimiento.

5.5.2. Peso de órgano cosechado

El análisis de varianza para esta variable dio los siguientes resultados que se observan en la tabla 27.

Tabla 27: análisis de varianza de la variable peso de hojas $\alpha=0,05$

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	2	537.35	268.67	5.34	0.0219*
Error	12	603.43	50.29		
Total corregido	14	1140.78			
$R^2 = 0.47$		CV=27.98 %	Media = 25.35 g		

Con este resultado, se señala que la iluminación artificial si tuvo efecto significativo en el peso del órgano cosechado; el Coeficiente de Variabilidad, indica que el peso de la hoja registrado en las muestras presenta una alta variabilidad cuyo promedio fue de 25,35 g para esta variable.

Debido a los resultados se realizó una prueba Duncan para conocer las diferencias entre tratamientos en la tabla 28.

Tabla 28: prueba Duncan de la variable peso de hojas

Tratamiento	Media (g)	Duncan (5%)
T2 (luz violeta 415 nm)	31.460	A
T3 (luz azul/roja 470-700 nm)	27.360	A
T1 (luz blanca 500 – 700 nm)	17.220	B

Por consiguiente, las plantas sometidas a luz violeta se produjeron con mayor peso de órgano cosechado que los demás tratamientos (tabla 2). Existe una diferencia significativa en el peso debido al color de luz y el flujo luminoso. Los tratamientos con iluminación violeta, T2, tuvieron un mayor peso (31,46 g en promedio), en relación a las plantas en el tratamiento T1 (17,22 g en promedio). El T3 presento también buenos resultados con una media de 27,36 g.

Con lo mencionado anteriormente, la iluminación violeta brindó mejores resultados en cuanto a rendimiento del cultivo de lechuga variedad Boston White siendo así, el rendimiento en g/m² sería 619,92 g/m².

5.6. Análisis de costos parciales

Realizando un análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales tomando en cuenta los siguientes datos, se obtuvieron los resultados de la tabla 29.

Tabla 29: análisis de costos parciales mediante análisis económico de experimentos agrícolas

ITEM	Blanco	Violeta	Color (Azul/rojo)
<i>Rendimiento medio (g/m2)</i>	2066,40	3775,20	3283,20
<i>Rendimiento ajustado (g/m2)</i>	1859,76	3397,68	2954,88
<i>Beneficios brutos (\$/m2)</i>	37,20	67,95	59,10
<i>Costos del LED blanco</i>	45,00	0,00	0,00
<i>Costos del LED violeta</i>	0,00	50,00	0,00
<i>Costos del LED azul</i>	0,00	0,00	50,00
<i>Costos del Led rojo</i>	0,00	0,00	50,00
<i>Total de costos variables</i>	45,00	50,00	100,00
<i>Beneficios netos (\$/m2)</i>	-7,80	17,95	-40,90
<i>Tasa de retorno marginal (%)</i>	-14,42	70,17	48,62

Los resultados obtenidos reflejan que el sistema de producción con luces led para 1m² con 4 niveles de producción de lechuga tiene un retorno marginal por debajo del 95%, ello indica

que por cada boliviano invertido, el retorno es de menos de un boliviano. Cabe tomar en cuenta que el precio de las luces cinta A LED 5050 – IP65 es el mismo para diferentes colores que se quiera emplear, además es bueno recordar que el costo inicial es altísimo debido a que esta tecnología aun es nueva y de campo exploratorio en nuestro medio, hay que tomar muy en cuenta la superficie empleada para realizar la inversión, los valores cambiarán según se empleen mas niveles, para el experimento se emplearon cuatro niveles.

En base a los resultados obtenidos, se realizó un análisis de dominancia para comprobar cuál de los tratamientos es el más efectivo de manera económica que se encuentran en la tabla 30.

Tabla 30: análisis de dominancia

	Tratamiento	Costos variables	Beneficio neto	Observación del cambio de tratamiento	Conclusión de la observación
T1	Luz blanca	45	-7,80		<i>no dominado</i>
T2	luz violeta	50	17,95	T1 a T2	no dominado
T3	Luz azul/rojo	100	-40,90	T2 a T3	<i>dominado</i>

El cuadro anterior el tratamiento de mayor eficiencia es de iluminación violeta debido a que presenta mayor beneficio neto a comparación del tratamiento 1; el tratamiento 3, con luces azul y roja, se encuentran fuera de este análisis por que el beneficio neto desciende en lugar de ascender, por lo tanto, el mejor tratamiento es el T2 con iluminación violeta 415 nm.

Bustamante, (2012) obtuvo beneficios netos los saldos son negativos, es decir que, si tomamos en cuenta el costo de mano de obra en los valores de cada uno de los sistemas, estos no se pagan con la primera cosecha ni con la segunda; no obstante, a partir del tercer ciclo de siembra se empiezan a generar ganancias netas en cada uno de los módulos.

Bustamante, (2012) también cotizó el precio de la lechuga en USD 0,79/kg del cual el mayor beneficio bruto lo alcanzó el tratamiento (Trionfo d'estate con el tipo de luz LEDs rojo con USD 22,9653/módulo.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados para este trabajo de investigación, las conclusiones a las que se llega son:

En cuanto la energía y eficiencia de la luz LED:

- La energía emitida por el LED violeta de 29 μmol , fue el que obtuvo mejores resultados en gran parte de las variables de respuesta, esto se debe a la eficiencia fotosintética brindada al cultivo con 11 $\mu\text{mol/s}$; se concluye que la eficiencia fotosintética está relacionada directamente con la energía brindada por el color del LED.

En cuanto a variables agronómicas:

- La variable contenido de clorofila, el efecto de la luz LED fue significativo del cual el mejor tratamiento fue la combinación de luz LED azul y rojo seguido de la luz Blanca.
- Para la longitud de hoja, la luz LED tuvo un efecto altamente significativo presentando una media de 18,9 cm con Luz violeta; demostrando así que la luz de este color tiene influencia en esta variable.
- En cuanto al crecimiento del cultivo, al color violeta también presento los mejores resultados.
- En la variable número de hojas, no se presentaron efectos significativos.
- El sistema planteado es altamente eficiente en cuanto al uso eficiente de superficie, es decir que se puede incrementar la producción en superficies pequeñas.

En cuanto a las características físico – químicas del cultivo:

- La variable porcentaje de nitrógeno presento significancia donde los emisores LED de los cuales el color violeta fue el que presento los mejores resultados con 0,21% como promedio del contenido de nitrógeno.
- En la variable contenido de fosforo, no había significancia en los resultados.
- La variable contenido de potasio el efecto de la iluminación artificial, con LED, evaluado fue altamente significativo presentando al color blanco como como el valor ms alto con 0,168%.
- Para el contenido de boro en la planta, el resultado fue significativo presentando una media de 0,40% con el tratamiento con luz violeta.
- En la variable de materia seca se encontró significancia, el tratamiento con iluminación blanca obtuvo los mejores resultados presentando un 23,79 g como promedio.
- Con la variable contenido de humedad, tuvo significancia, s decir que las plantas iluminadas con luz artificial tienen mayor porcentaje de agua siendo el tratamiento con luz violeta el que presento mayor contenido de humedad con 83,96% de humedad promedio.

En cuanto a los rendimientos:

- Los resultados atribuibles al tipo de iluminación suministrada fueron significativos, observándose que el mayor valor se obtuvo al aplicar luz violeta con 31,46 g/hojas, seguido por el tratamiento con luz bicolor las cuales obtuvieron un valor de 27,46 g/hojas; el menor rendimiento se obtuvo con luz blanca con 17,22 g/hojas.
- Un comportamiento similar se observa en el rendimiento con planta completa presentando como mejor tratamiento al violeta 48,82 g/planta.

En cuanto al análisis de costos parciales de producción:

- El análisis de costos parciales indica que la recuperación de la inversión para este sistema, es mínimo, menor a 50 ctv.; no obstante, para trabajar con este sistema, este análisis recomienda a la luz violeta.

El efecto de la luz artificial en el cultivo de lechuga variedad Boston white, es posible debido a las características de los LED, los cuales proporcionan la cantidad de luz necesaria para que la planta pueda crecer, haciendo uso efectivo de la energía tanto en plantas, lechuga en este caso, como en la eléctrica siendo amigable con el medio ambiente.

7. RECOMENDACIONES

Con todo lo anteriormente indicado las recomendaciones son las siguientes:

Se podría realizar un análisis bromatológico para obtener las características y el valor nutricional que puede brindar este cultivo en beneficio del consumo humano, que se desarrolla bajo este sistema.

También se podría probar con otras longitudes de onda (color) en otras variedades de lechuga, tomando en cuenta la energía liberada por la longitud de onda del color que se implemente.

Se podría variar en la marca del LED a emplear, la iluminación es diferente en intensidad alta, media y baja además de ser diferente en luces blancas frías y calientes.

Otra opción es probar el sistema con sustrato y una hortaliza de raíz con fertirrigación, para obtener resultados en este tipo de hortalizas bajo crecimiento con luz artificial.

Se debe intentar calcular el rendimiento con diferente fotoperiodo.

También se puede combinar longitudes de onda como blanco/violeta, rojo/azul estimulando al fitocromo simulando efectos como el día y la noche durante 12 horas para cada uno.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Agroactiva. (3 de Agosto de 2020). *Agroactiva.com*. Obtenido de <https://agroactivocol.com/producto/material-vegetal/semillas/hortalizas/lechuga-white-boston/>
- Almansa, E. (2011). *Sistema híbrido de iluminación para el desarrollo de las plantas*. Granada: Universidad de Granada.
- Amazings®. (16 de Agosto de 2016). *noticiasdelaciencia.com*. Obtenido de <http://noticiasdelaciencia.com/not/20776/-granja-vertical-alternativa-sostenible-a-la-agricultura-tradicional-/>
- Arcas, J. (31 de octubre de 2014). *Montecastelopost*. Obtenido de <http://colegiomontecastelo.com/2014/10/31/cultivo-de-lechugas-con-leds/>
- Arismendi, G. (2011). Fotosistema II y fotosíntesis artificial: buscando una nueva alternativa energética. *Revista Química PUCP*, 26 - 28 .
- Bejerano, P. (15 de julio de 2014). *Blogthinkbig.com*. Obtenido de <https://blogthinkbig.com/industrializacion-de-la-agricultura>
- Bejerano, P. (24 de Noviembre de 2014). *Diario Turing*. Obtenido de <https://diarioturing.com/las-tecnologias-se-pasan-a-la-agricultura-con-luz-artificial>
- Bosque, H. (2010). *Flisiología Vegetal*. La Paz: Facultad de Agronomía - UMSA.
- Bures, S., Urrestarazu, M., & Kotiranta, S. (Enero de 2018). *biblioteca horticultura*. Obtenido de Iluminación artificial en la agricultura [on line]: <http://publicaciones.poscosecha.com/es/cultivo/395-iluminacion-artificial-enagricultura.html#>
- Bustamante, M. (Junio de 2012). Estudio de los efectos de la luz LEDs en dos variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un sistema hidróponico NFT vertical. *trabajo de titulacion*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad de Guayaquil, Facultad de ciencias agrarias.
- Casaca, A. (Abril de 2015). Guías tecnológicas de frutas y vegetales. *Cultivo de lechuga*. Costa Rica: PROMONSTA.
- Cordova, R. (2005). *Evaluación técnica y económica de la producción de lechugas hidropónicas bajo la comuna de Calbuco, X región*. Valdivia - Chile: Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Agronomía.
- Eduardo, J. (noviembre de 2016). Sistema de medición y monitoreo para el estudio del efecto de la radiación PAR en las plantas. *proyecto curricular de ingeniería electrónica*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Fennech, L., Troyo, E., Trasviña, M., Ruiz, F., Beltrán, A., Murillo, B., . . . Zamora, S. (2009). Relación entre un método no destructivo y uno de extracción destructivo, para medir el contenido de clorofila en las hojas de plántula de albahaca (*Ocinim basilicum*. L). *Universidad de Ciencia Tropical Húmeda*, 25.

- García, O. (14 de diciembre de 2010). *Agricultura Urbana: La hora de las granjas verticales*. Obtenido de agronoticias plus - sustentabilidad agropecuaria.
- Garreta, J., Leandro, J., & Boyano, L. (2016). Iluminación LED Para Horticultura. *XLII Simposium nacional de alumbrado*. Donostia - San Sebastian.
- Google maps. (11 de Septiembre de 2018). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/dir/-16.5063496,-68.1328049/facultad+de+agronomia+umsa/@-16.5063359,-68.1331891,19.01z/data=!4m10!4m9!1m1!4e1!1m5!1m1!1s0x915f207b3e1b91c9:0xa81673dc96a0e87e!2m2!1d-68.1326815!2d-16.5061682!3e2>
- Hernandez, R., Fernandez, L., & y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico: McGraw - Hill.
- Horticulturaled. (Marzo de 2020). *luz LED y plantas: Horticulturaled*. Obtenido de horticulturaled.com: <https://horticulturaled.com/pages/luz-led-y-plantas>
- Intipampa, A. (2014). *Evaluación del comportamiento agronómico de tres cultivares de lechuga (Lactuca sativa L.) en dos comunidades del municipio de Caranavi de La Paz*. La Paz: Tesis de grado - UMSA. Facultad de Agronomía.
- Japón, J. (Octubre de 1977). Hojas Divulgadoras del Ministerio de Agricultura. *La Lechuga*. Madrid, España: Extensión Agraria, Neografics.S L.
- Jimenez, C. (1997). *Luminotecnia: Luz, lámpara y luminarias*. Barcelona: CEAC.
- Jimenez, L. (2016). *Efecto de la intensidad lumínica de lámparas LED en la producción de lechuga (Lactuca sativa)*. Guayaquil, Ecuador: Facultad de Educación Técnica Para el Desarrollo - Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Kimura, T. (2014). A new industry born the disaster - LED indoor farming. (L. -I. MIRAI. CO., Entrevistador)
- Lastra, F. (20 de Marzo de 2015). *eldefinido.cl*. Obtenido de <https://eldefinido.cl/actualidad/mundo/4887/La-granja-vertical-mas-grande-del-mundo-sera-75-veces-mas-productiva-que-una-tradicional/>
- Maldonado, F. (2013). *Botánica general - Organografía*. La Paz - Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés - Facultad de agronomía.
- Mannise, R. (24 de enero de 2016). *Ecocosas.com*. Obtenido de <https://ecocosas.com/agroecologia/japon-crean-granja-vertical-que-produce-3000-lechugas-por-dia/>
- Martul, C. (1986). Ecología y medio ambiente. En C. Martul, *Biblioteca práctica del estudiante, ciencias naturales, zoología y ecología* (págs. 108 - 109). Madrid: INGELEK.
- Martul, C. (1987). crecimiento y nutrición en los vegetales. En C. Martul, *Biblioteca practica del estudiante, ciencias naturales, botánica* (págs. 52 - 53). Madrid: INGELEK.

- Navas, L., Castro, M., Durán, J., Martín, P., & Martín, J. (2010). Idoneidad de la iluminación con LED y OLED de estado sólido para el cultivo de Azafrán (*Crocus sativus* L.) en invernaderos. *IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010*. Vitoria.
- Ochoa, R. (2009). Diseños experimentales. La Paz.
- Ortiz, E. (Diciembre de 2017). Efecto con la irradiación LED con diferentes longitudes de onda sobre la germinación de semillas de maíz (*Zea mays*). *Tesis*. Torreon, Coahuila: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Osram. (2019). LED: soluciones innovadoras de iluminación.
- Paniagua, G. (Julio de 2014). Luz LED de alta intensidad en procesos fisiológicos de lechuga (*Lactuca sativa*) enfoque sistémico transdisciplinario. Mexico D.F, Mexico: Instituto Politécnico Nacional.
- Pastor, J. (18 de Junio de 2016). *Quartz*. Obtenido de xataka.com: <https://www.xataka.com/investigacion/la-caida-de-precios-en-leds-podria-revolucionar-la-agricultura-de-interiores>
- Pastor, J. (octubre de 2020). *Agro pro*. Obtenido de necesidades nutricionales de la lechuga: <https://www.agropro.com/post/necesidades-nutricionales-de-la-lechuga-5f7762275b8a551acc79b9a2>
- Philips. (5 de Agosto de 2020). *lighting.philips*. Obtenido de <://www.lighting.philips.es/productos/iluminacion-led-horticultura/agricultura-urbana>
- Photosystem. (21 de septiembre de 2020). *Micromoles de fotones, la medida de la luz para las plantas: photosystem*. Obtenido de [photosystem.es: https://photosystem.es/micromoles-de-fotones-la-medida-de-luz-para-las-plantas/](https://photosystem.es/micromoles-de-fotones-la-medida-de-luz-para-las-plantas/)
- Quispe, L. (2015). *Evaluación de seis variedades de lechuga, (Lactuca sativa. L) cultivadas con el sistema hidropónico recirculante NFT en el centro experimental de Cota Cota*. La Paz: Facultad de Agronomía - UMSA.
- Ramos, Y., & Ramirez, E. (22 de Diciembre de 2016). Informador técnico. *Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - vertical farming (VF)*. Colombia.
- Reyes, M. (Junio de 2001). *Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales: Reenseñado el uso de este enfoque*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/334655730>
- Rincón, A., & Liarreto, G. (2010). Relación entre el nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el pie de monte. *Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11.
- Rodríguez, R. (2018). *Comparación de dos técnicas hidropónicas, flujo laminar de nutrientes y raíz flotante para la producción de lechuga (Lactuca sativa.L) en el centro experimental de Cota Cota*. La Paz, Bolivia: Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés.

- Rojo, C. (15 de noviembre de 2018). *Una fabrica de vegetales en Nueva Jersey sin tierra, luz natural, ni riego con agua*. Obtenido de https://www.google.com/amp/s/www.eldiario.es/ballenablanca/365_dias/fabrica-vegetales-nueva-jersey-natural_1_1837553.amp.html
- Saavedra, G., Corradini, F., Antunez, A., Felner, S., Estay, P., & Sepúlveda, P. (2017). Manual de producción de lechuga. *Boletín INIA*.
- Salisbury, F., & Ross, C. W. (2000). *Fisiología de las Plantas*. Madrid: Paraninfo.
- Sanz, D. (25 de diciembre de 2016). *Actitud Ecológica*. Obtenido de Características de un LED: Valores a tener en cuenta: <https://actitudecologica.com/caracteristicas-de-un-led/>
- Shimamura, S. (2014). A new industry born the disaster - LED indoor farming. (L. -I. MIRAI CO., Entrevistador)
- Siñani, L. (2017). *Evaluación agronomica de dos variedades de berro (Nasturtium officinale R. Br. Y Lepidium sativum) en cultivo sin suelo en el centro experimental de Cota – Cota*. La Paz - Bolivia: Facultad de Agronomía - UMSA.
- Sipan.inta. (3 de Agosto de 2020). sipan.inta.gov.ar. Obtenido de http://sipan.inta.gov.ar/productos/ssd/vc/neuquen/ap/lechuga_descripcion.htm
- Socorro, A., & Cristobal, R. (2013). Fotosíntesis artificial. Comparación con el mecanismo natural. *Revista Cubana De Física*, 9 - 13.
- Suzuki, M. (2014). A new industry born the disaster - LED in door farming. (L. -I. MIRAI CO., Entrevistador)
- TBCin. (2018). *Cintas A LED*. Obtenido de www.tbcin.com.ar
- Theodoracopoulos, M., Lardizabal, R., & Arias, S. (Febrero de 2009). entrenamiento y desarrollo de agricultores. *manual de producción, producción de lechuga*. La Lima, Cortes, Honduras: FINTRAC.
- Yana, E. (2019). Colegio de Ingenieros Agrónomos de Bolivia, filial LA Paz. *curso practico de analisis estadístico con el software SAS aplicado a las ciencias agropecuarias*, (pág. 8). La Paz - Bolivia.
- Zaragozá, R. (2018). *Iluminacion con LEDs blancos*.

9. ANEXOS

TEXTO 1 (texto del video en audio japonés traducido al inglés en la entrevista al equipo de la corporación MIRAI CO., LTD en TOKIO – JAPON)

Our initial approach was to first accurately identify needs and then create something for a brighter future. We did suffer damages, but we decided to learn and make improvement on the past experience. The existing problem the food shortage renewed understanding of the importance of foodstuffs. (Suzuki, 2014)

TEXTO 2 (texto del video en audio japonés traducido al inglés en la entrevista al equipo de la corporación MIRAI CO., LTD en TOKIO – JAPON)

My core competence is cultivation technology by effectively controlling photorespiration and photosynthesis. We not only control night and day, but also provide a better “sleeping” environment for vegetable’s growth and increase the effectiveness of light. (Shimamura, 2014)

TEXTO 3 (texto del video en audio japonés traducido al inglés en la entrevista al equipo de la corporación MIRAI CO., LTD en TOKIO – JAPON)

With thinner cultivation beds now, we can increase the tiers from 5 to 8, and thus increase production. If open field culture was 1, this would be 100. By area ratio, times 100. (Kimura, 2014)

9.1. Cálculos de la energía con la ecuación según Ramos & Ramirez, (2016)

Tratamiento	h	c	Conv. a μmol	λ	moles	Joul	μmol	ppf
T1 (luz blanca)	6,63E-34	3,00E+08	6,02E+17	5,50E-07	2,18E-01	3,62E-19	0,22	11,00
T2 (luz violeta)	6,63E-34	3,00E+08	6,02E+17	4,15E-07	2,89E-01	4,79E-19	0,29	29,00
luz roja	6,63E-34	3,00E+08	6,02E+17	6,56E-07	1,83E-01	3,03E-19	0,18	-----
luz azul	6,63E-34	3,00E+08	6,02E+17	4,70E-07	2,55E-01	4,23E-19	0,25	-----
T3 (Combinación)					4,37E-01	7,26E-19	0,44	38,00

9.2. Análisis de costos parciales (5 bs/250 g)

Tratamiento	rdto 0,5 m2 (g)	1 nivel (g/m2)	4 niveles (g/m2)	Rdto ajust. (-1%)	Benef. Bruto (\$/m2)
T1 (luz blanca)	17,22	516,6	2066,4	1859,76	37,20
T2 (luz violeta)	31,46	943,8	3775,2	3397,68	67,95
T3 (luz roja y azul)	27,36	820,8	3283,2	2954,88	59,10

9.3. Comandos empleados en el programa SAS

```
DATA DCA_VAR;  
INPUT TRĀ $ OBS;  
DATALINES;  
T1 33  
T2 54.3  
T3 42.1  
T1 17.6  
T2 36.2  
T3 70.1  
T1 27.5  
T2 33.6  
T3 38.7  
T1 23.7  
T2 57  
T3 34.5  
T1 22.3  
T2 63  
T3 19.9  
;  
TITLE 'ANVA peso completo';  
PROC GLM;  
CLASS TRĀ;  
MODEL OBS=TRĀ;  
MEANS TRĀ/DUNCAN ALPHA=0.05;  
RUN;
```

```
DATA DCA_VAR;  
INPUT TRĀ $ OBS;  
DATALINES;  
T1 0.1265  
T2 0.0941  
T3 0.0023  
T1 0.1721  
T2 0.0151  
T3 0.0052  
T1 0.1890  
T2 0.0765  
T3 0.0084  
T1 0.1621  
T2 0.0743  
T3 0.0022  
T1 0.1921  
T2 0.0663  
T3 0.0672  
;  
TITLE 'ANVA contenido de K';  
PROC GLM;  
CLASS TRĀ;  
MODEL OBS=TRĀ;  
MEANS TRĀ/DUNCAN ALPHA=0.05;  
RUN;
```

9.4. Tabla promedio de datos

Tipo de iluminación	Tratamiento	Contenido de clorofila	Longitud de hoja	N° de hojas	% de Nitrógeno	% de Fosforo	% de Potasio	% de Boro	% de materia seca	% de humedad	Peso de planta completa	Peso de órgano cosechado
	B1	87762	14	14	0,0342	0,9832	0,1265	0,1562	19,40	80,60	33	20,4
	B2	81409,5	16,2	16	0,0534	0,3271	0,1721	0,1342	25,74	74,26	17,6	10,8
Blanco	B3	85662	14	18	0,0892	0,5423	0,1890	0,1872	22,51	77,49	27,5	20
	B4	61924,5	15,4	16	0,0345	0,6521	0,1621	0,1283	25,25	74,75	23,7	18,4
	B5	62697	17,5	14	0,1934	0,2312	0,1921	0,1932	26,04	73,96	22,3	16,5
	V1	57244,5	18	16	0,1871	0,3211	0,0941	0,2730	13,88	86,12	54,3	39,2
	V2	56356,5	18,5	16	0,2543	0,4592	0,0151	0,9320	18,82	81,18	36,2	25,3
Violeta	V3	66318	20	18	0,3654	0,2483	0,0765	0,6220	22,94	77,06	33,6	25,4
	V4	65857,5	20	18	0,1670	0,3210	0,0743	0,0843	11,08	88,92	57	21,2
	V5	51825	18	18	0,1002	0,1983	0,0663	0,0982	13,48	86,52	63	46,2
	C1	71107,5	15,5	16	0,0504	0,0322	0,0023	0,120	16,36	83,64	42,1	31,2
Combinación azul y rojo (color)	C2	78568,5	17	18	0,2093	0,0732	0,0052	0,0652	9,72	90,28	70,1	29,9
	C3	78703,5	19,1	18	0,0567	0,9832	0,0084	0,0412	19,50	80,50	38,7	27,3
	C4	78898,5	19	18	0,0342	0,1820	0,0022	0,0562	18,75	81,25	34,5	28,9
	C5	73924,5	18,9	16	0,1201	0,3242	0,0672	0,0231	29,34	70,66	19,9	19,5

9.4. Glosario

$\mu\text{mol/s}$	(Micromol segundo) es el equivalente al lumen para las plantas.
ANVA	Conocido como análisis de varianza, es un modelo estadístico en el cual la varianza esta particionada a ciertos componentes debido a diferentes variables explicativas.
Antocianina	Dícese de cualquiera de los pigmentos que comunican coloración roja, violeta o azul a las flores, frutos, cortezas y raíces.
ADP	(Adenosin Di Fosfato) es un nucleótido difosfato compuesto por un nucleosido y dos radicales fosfato unidos entre sí.
ATP	(Adenosin Tri Fosfato) es un nucleótido fundamental en la obtención de energía celular.
Clorofila	Materia colorante verde contenida en las hojas, tallos tiernos, etc. en las plantas responsables de llevar acabo la fotosíntesis.
Cloroplastos	Plastidio en el que se contiene la clorofila y por consiguiente de color verde franco o más o menos enmascarado por otros pigmentos en diversos grupos de algas.
Criptocromos	Actúan como fotoreceptores de luz UV-A y azul (320 – 500 nm) afectando a la morfogénesis y crecimiento de las plantas, pertenece a la familia de las flavoproteínas.
Cromático	Muy intensamente colorado, con mucho color.
Densidad de Fotón Flux (PPFD)	es una medida del número de fotones de luz fotosintéticamente activa que hay en una superficie determinada por segundo: $\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$
Espectro	Conjunto de ondas electromagnéticas ordenadas según su frecuencia.
Fase luminosa	Llamada también fase fotoquímica, depende de la energía lumínica para obtener energía en forma de ATP y NADPHa partir de la disociación de moléculas de agua.
Fase oscura	Llamada también biosintetica, son un conjunto de reacciones independientes de la luz que convierten dióxido de carbono y otros compuestos en glucosa.
Fluorescencia	Propiedad de reflejar la mayor longitud de onda que la recibida cuando están expuestas a ciertos rayos del espectro.
Fitocromo	Actúan como un sensor de calidad de luz, haciendo un balance de luz roja e infrarroja (600 – 750 nm), son los responsables de

procesos fisiológicos como: la germinación, apertura de estomas y la evitación de sombra.

Fosforilación	Es la adición de un grupo fosfato a cualquier otra molécula.
Fosforilacion oxidativa	Proceso bioquímico celular, es el proceso metabólico final de la respiración celular que ocurre después de la glucólisis y el ciclo del ácido cítrico.
Fotofosforilacion	Es un proceso de síntesis de ATP a partir de ADP y fosfato llevado a cabo en el tilacoide del cloroplasto.
Fotolisis	Dispersión de los cloroplastos como consecuencia de la dirección de la luz, si partimos de un cierto orden de los mismos en el interior de la célula, y variamos las condiciones de intensidad o dirección de la luz se producirá una especie de desorden por que se deshará el primitivo arreglo. Así es como hay que interpretar el significado etimológico de este término.
Fotomorfogenesis	Es el crecimiento y desarrollo vegetal que está directamente controlado por la luz, en especial por la luz azul.
Fotón	Es la partícula que porta todas la formas de radiación electromagnética que incluye rayos gamma, rayos X, luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja, microondas y ondas de radio
Fotón Flux Fotosintético (PPF)	Es una unidad de medida que mide la cantidad de fotones de la luz fotosintéticamente activa.
Fotoperiodicidad	En las plantas superiores la duración del fotoperiodo regula, en muchos casos, la marcha de algunas de las funciones vitales de mayor importancia (floración, fructificación, crecimiento vegetativo, etc).
Fotoperiodo	Termino para designar la duración del tiempo diario en que los organismos están expuestos a la acción de la luz.
Fotoperiodismo	Que depende de la relación entre el color rojo y el rojo lejano y que es la respuesta a la longitud del día en las diferentes estaciones del año.
Fotoquímica	Es el estudio de los efectos químicos de la luz y de la producción de radiación mediante las transformaciones químicas.
Fotosensibilidad	Sensibilidad de las plantas o los órganos vegetales a la acción de la luz. La fototaxis y el fototropismo se deben a la fotosensibilidad de las plantas.

Fotosíntesis	Síntesis de los hidratos de carbono realizada con el concurso de la luz como manantial de energía.
Fototropinas	Son sensibles a la luz UV-A y azul, regulan el movimiento de la planta como respuesta a la luz.
Fototropismo	I: Fenómenos trópicos en el que el factor estimulante es la luz. II: Son los movimientos hacia la luz y que dependen principalmente de la luz azul.
Granja vertical	También relacionada como Agricultura Integrada en Edificaciones del acrónimo BIA (Building Integrated Agriculture) es un nuevo enfoque de la producción basada en la idea de localizar sistemas de cultivo de alto rendimiento en edificaciones para producir alimentos al interior de estos, haciendo uso de fuentes renovables, locales de energía y agua.
Hidroponía	Método industrial de cultivo empleando soluciones nutritivas disueltas en sustratos y/o agua para el crecimiento y desarrollo de las plantas.
Incandescente	Cuerpo de luz que adquiere colores rojos o blancos debido al sometimiento de altas temperaturas.
LED	Es un diodo emisor de luz donde en su interior hay un semiconductor atravesado por tensión continua el cual hace que emita luz, a este fenómeno se conoce como electroluminiscencia.
Longitud de onda	Es la distancia que recorre una perturbación (onda) en un determinado periodo de tiempo.
Luminiscencia	Fenómeno relativo a la producción de luz de débil intensidad por parte de ciertas plantas.
Luminiscente	Que da luz sin estar incandescente, como si empezara a dar luz.
Luz	Es parte de la radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano.
Microbiología	Biología de los microorganismos, más concretamente bacteriología.
Microclima	El clima a que están sometidos en realidad los vegetales difiere frecuentemente de un modo considerable clima general de la región.
NADH	Es una coenzima que se halla en las células vivas cuya función principal es el intercambio de electrones e hidrogeniones en la producción de energía de las células.

Nanómetro	Es la medida de longitud que equivale a la millonésima parte del metro.
NIR	Luz del infrarrojo cercano, es el campo espectral de la radiación solar desde los 700 hasta 2500 nanómetros para generar calor.
PAR	La luz usada por los vegetales desde los 400nm hasta los 700 nm para la fotosíntesis (conocida como radiación PAR, radiación fotosintéticamente activa -Photosynthetic Active Radiación- o luz de crecimiento), variando el efecto de la longitud de onda según las horas del día y los estadios de crecimiento de la planta.
Pi	Es un fosfato inorgánico, forma corta del HPO_4^{-2} .
Potencia	En <i>biología</i> , es el poder de una célula o de un grupo de células en cuanto son capaces de promover y ordenar el desarrollo de un individuo o de un órgano o de una parte orgánica conforme a un plan de caracteres preconcebidos, Esta potencia puede ser actual, si está en trance de manifestarse, o bien permanecer en estado latente.
Pr	Proteína soluble del fitocromo y se encarga de la absorción de la luz roja, es la forma inactiva del fitocromo alojado en el citoplasma de la célula.
Pfr	Proteína soluble del fitocromo que se encarga de la absorción de la radiación roja lejana y se considera la forma biológicamente activa del fitocromo localizado en el núcleo celular.
Solución hidropónica	Es la solución nutritiva donde se encuentran disueltos los nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas.
Tilacoides	Son compartimientos en el interior del cloroplasto donde se lleva a cabo la fase lumínica de la fotosíntesis.

9.5. Figuras



Figura 8: Shigeharu Shimamura, la mente maestra tras la tecnología del uso de luces LED para los cultivos in door en Japón. Fuente: (Bejerano, Blogthinkbig.com, 2014); (Shimamura, 2014).



Figura 9: Mirai.co fábrica de plantas a cargo de Shimamura.



Figura 10: Fábrica de plantas en Nueva Jersey, (Rojo, 2018) 15 de noviembre de 2018 15:50 h.



Figura 11: Lechuga Romama casaca.



Figura 12: Lechuga acogollada.



Figura 13: Lechuga de hoja suelta.



Figura 14: Lechuga esparrago.

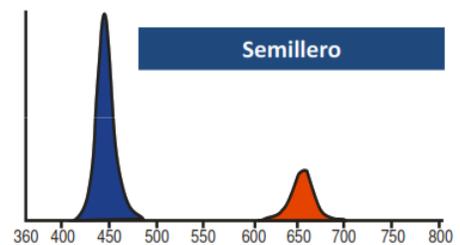


Figura 15: Longitud de onda en fase semillero; fuente: (Garreta, Leandro, & Boyano, ILUMINACION LED PARA HORTICULTURA, 2016).

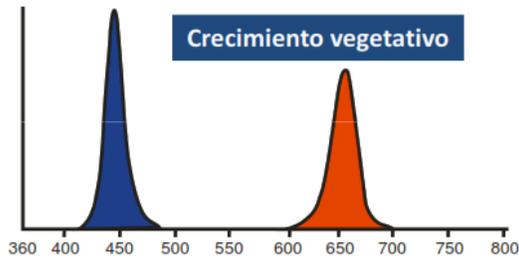


Figura 16: Longitud de onda en fase de crecimiento vegetativo; fuente: (Garreta, Leandro, & Boyano, ILUMINACION LED PARA HORTICULTURA, 2016).

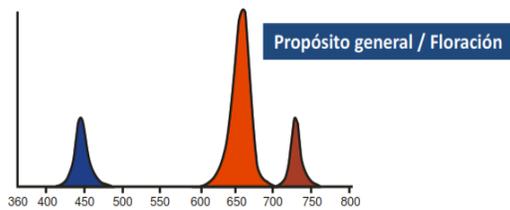


Figura 17: Longitud de onda en fase floración; fuente: (Garreta, Leandro, & Boyano, ILUMINACION LED PARA HORTICULTURA, 2016).

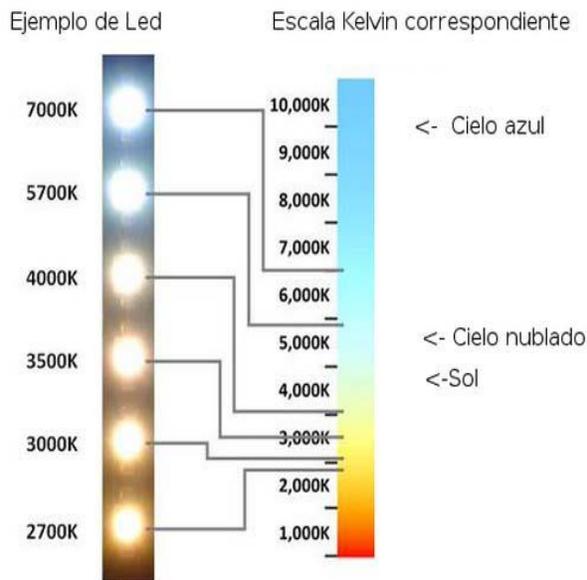


Figura 18: Color según la temperatura de la luz (temperatura de color); Imagen: Smart Lighting.

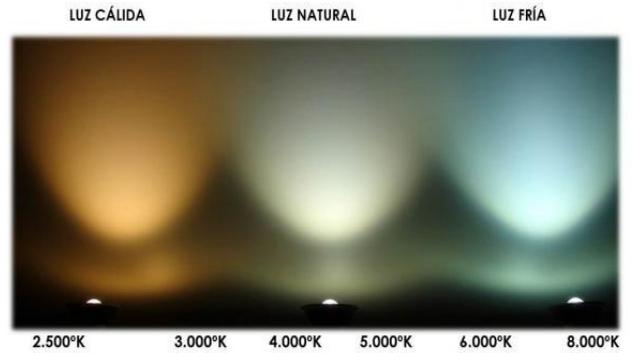


Figura 19: Diferencia de luz blanca según la temperatura; Imagen: Quality LEDs.

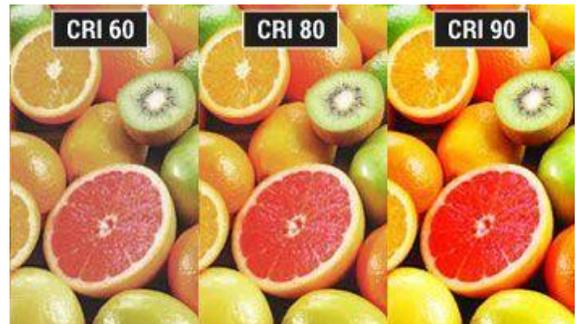


Figura 20: Rendimiento de color de la iluminación LED, mientras más alto mejor; Fuente: Barcelona LED.



Figura 21: Panasonic y cultivos en su planta de Singapur; Fuente: (Bejano, Diario Turing, 2014).



Figura 22: Fábrica en Kyoto, Japón, la empresa invirtió en un sistema de alta tecnología capaz de producir 30.000 cabezas de lechuga al día. Ecocosas.



Figura 23: Philips leds apoya a la producción con luz artificial; fuente: (PHILIPS, 2020).



Figura 24: Instalación agrícola con la marca Philips terminad.



Figura 25: Proyecto innovatus de la marca Philips, cámara climatizada terminada.



Figura 26: Nave agrícola, marca Phillips.



Figura 27: Contenedor de plantas del proyecto Ecobain, marca Phillips.

9.6. Anexos, metodología



Figura 28: Instalación de luces, de iluminación la cinta ALED 5050 – IP65.



Figura 29: Soldado de luces con los cables, se realizó una soldadura para conectar los cables de cinta led a cinta led.



Figura 30: Timer SONOFF® irec wifi socket.

Acción	Hora,	Activado por
ENCENDIDO	2020-03-02 08:00:01	Dispositivo
APAGADO	2020-03-01 16:00:01	Dispositivo
ENCENDIDO	2020-03-01 08:00:05	Dispositivo
APAGADO	2020-02-29 16:00:00	Dispositivo
ENCENDIDO	2020-02-29 08:00:05	Dispositivo
APAGADO	2020-02-28 16:00:12	Dispositivo
ENCENDIDO	2020-02-28 08:46:22	Dispositivo
APAGADO	2020-02-27 16:00:27	Dispositivo
ENCENDIDO	2020-02-27 11:36:46	Dispositivo
	2020-02-26	

Figura 31: Aplicación Ewelink, registro de estado del dispositivo.

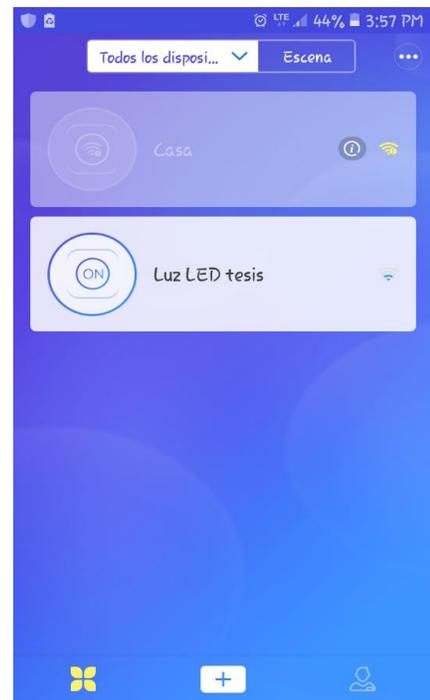


Figura 32: Aplicación Ewelink, control de encendido y apagado del dispositivo.



Figura 33: Germinación de las plantas de lechuga, se observan los cotiledones.



Figura 34: Crecimiento de las plantas de lechuga bajo luz blanca, se puede apreciar 1 hoja verdadera y sus dos cotiledones.



Figura 35: Crecimiento de lechuga con luz violeta, se pueden distinguir las hojas verdaderas.



Figura 36: Crecimiento de lechuga con luz bicolor (rojo y azul), se puede observar el crecimiento en longitud de las hojas verdaderas.



Figura 37: Tratamiento T1 con iluminación blanca, a los 25 días después de la siembra.



Figura 38: Medición de planta, con iluminación violeta.



Figura 39: Tratamiento T2 con iluminación violeta, a los 25 días después de la siembra.



Figura 42: Planta de lechuga con iluminación blanca.



Figura 40: Tratamiento T3 con iluminación bicolor, a los 25 días después de la siembra.



Figura 43: Iluminación blanca a los 100 días, planta de lechuga iluminada con luz artificial.



Figura 41: Medición de la planta con iluminación violeta.



Figura 44: Iluminación violeta a los 100 días, planta de lechuga iluminada con luz artificial.



Figura 45: Iluminación bicolor (Azul y Roja), planta de lechuga iluminada con luz artificial.



Figura 48: Pesado de muestra iluminado con luz bicolor (Azul y Rojo).



Figura 46: Pesado de muestra iluminado con luz blanca.



Figura 49: Contenido de clorofila en luz blanca mediante equipo OPTI-SCIENCES en planta.



Figura 47: Pesado de muestra iluminado con luz violeta.



Figura 50: Contenido de clorofila en luz violeta, mediante equipo OPTI-SCIENCES en planta.



Figura 51: Contenido de clorofila en iluminación azul y rojo, mediante equipo OPTI-SCIENCES en planta.



Figura 52: Peso de muestras secas.



Figura 53: Plantas con luz LED blanca.



Figura 54: Plantas con luz LED combinación azul y rojo.



Figura 55: Plantas con luz LED violeta.



ESCUELA INDUSTRIAL SUPERIOR " PEDRO DOMINGO MURILLO"
Resolución suprema de creación -10 de febrero de 1942
Resolución suprema N°150876 - 27 de abril 1069
Condecoración CONDOR DE LOS ANDES grado oficial
R.S N°211445- 7 DE OCTUBRE 1992

CARRERA DE QUIMICA Y PROCESOS

ANALISIS QUIMICO

MUESTRA	CODIGO	ANÁLISIS (%)			
1	VIOLETA 6, V6	N :0,2432	P :0,2441	K :0,0341	B :0,1841
2	VIOLETA 5 ,V5	N : 0,1002	P :0,1983	K :0,0663	B :0,0982
3	VIOLETA 4, V4	N :0,1670	P :0,3210	K :0,0743	B :0,0843
4	VIOLETA 3 ,V3	N :0,3654	P :0,2483	K : 0,0765	B :0,6220
5	VIOLETA 2, V2	N :0,2543	P :0,4592	K :0,0151	B :0,9320
6	VIOLETA 1, V1	N :0,1871	P :0,3211	K :0,0941	B :0,2730
7	ROJO/AZUL ,C1	N :0,0504	P :0,0322	K :0,0023	B :0,1200
8	ROJO/AZUL ,C2	N :0,2093	P :0,0732	K :0,0052	B :0,0652
9	ROJO/AZUL, C3	N :0,0567	P :0,9832	K :0,0084	B :0,0412
10	ROJO/AZUL, C4	N :0,0342	P :0,182	K :0,0022	B :0,0562
11	ROJO/AZUL,C5	N :0,1201	P :0,3242	K :0,0672	B :0,0231
12	ROJO/AZUL, C6	N :0,0762	P :0,11	K :0,0032	B :0,056
13	BLANCO 1, B1	N : 0,0342	P :0,9832	K :0,1265	B :0,1562
14	BLANCO 2, B2	N :0,0534	P :0,7231	K :0,1721	B :0,1342
15	BLANCO 3, B3	N :0,0892	P :0,5423	K :0,1890	B :0,1872
16	BLANCO 4, B4	N :0,0345	P :0,6521	K :0,1621	B :0,1283
17	BLANCO 5, B5	N :0,1934	P :0,2312	K :0,1921	B :0,1932
18	REFERENCIA 1 ,R1	N :0,0193	P :0,0033	K :0,1340	B :0,0862
19	REFERENCIA 2 ,R2	N :0,0065	P :0,0023	K :0,2376	B :0,0623
20	REFERENCIA 3 ,R3	N :0,0068	P :0,062	K :0,1821	B :0,0652
21	REFERENCIA 4 ,R4	N :0,0891	P :0,078	K :0,1570	B :0,0621
22	REFERENCIA 5, R5	N :0,0325	P :0,056	K :0,1562	B :0,0653
23	REFERENCIA 6, R6	N :0,0451	P :0,029	K :0,1825	B :0,0832

*N: ABSORCIÓN ATOMICA A LA LLAMA HORNO DE GRAFITO , N2O 3 %ACETILENO 0,13 % ; P ABSORCION ATOMICA, LAMPARA DE P,ABS 1,2 ;K ABSOCION ATOMICA ,LAMPARA DE POTASIO O,OO2 ;B:ABSOLCION ATOMICA ,LAMPARA BORO 3.

*MUESTRA LIQUIDA, ATAQUE ACIDO ACETICO 4,5 N, ALICUOTAS DE 1ML. TEMP 18 °C, PRESION ATOMOSFERICA 457,3mmHg

ING. QMC EDELMA RONQUILLO
DOCENTE ANALISIS INSTRUMENTAL I
ENCARGADA DE LABORATORIO

AV.Chacaltaya1001-telf (591-2)-2305533-2306553 FAX(591-2)-2306521
www.industriamurillo.edu.bo eispdmm.edu.bo
La Paz- Bolivia

Figura 56: Resultados del análisis de laboratorio.