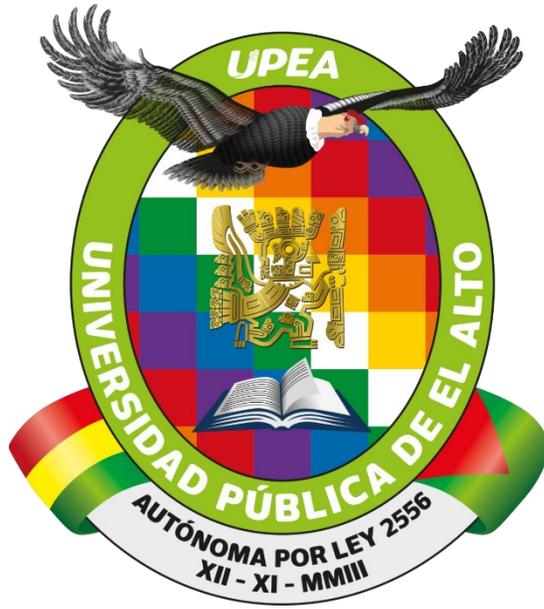


**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**EFFECTO DE DIFERENTES ESPECTROS DE LUZ LED EN LA PRODUCCIÓN DE
CEBADA (*Hordeum vulgare* L.) BAJO MANEJO HIDROPÓNICO EN AMBIENTE
ATEMPERADO DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE KALLUTACA.**

Por:

Ivan Omar Tarqui Quenta

EL ALTO – BOLIVIA

Agosto, 2025

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**EFFECTO DE DIFERENTES ESPECTROS DE LUZ LED EN LA PRODUCCIÓN DE
CEBADA (*Hordeum vulgare* L.) BAJO MANEJO HIDROPÓNICO EN AMBIENTE
ATEMPERADO DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE KALLUTACA.**

*Tesis de Grado presentado
como requisito para optar el Título de
Ingeniero Agrónomo*

Ivan Omar Tarqui Quenta

Asesores:

Ms. Lic. Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez

Tribunal Revisor:

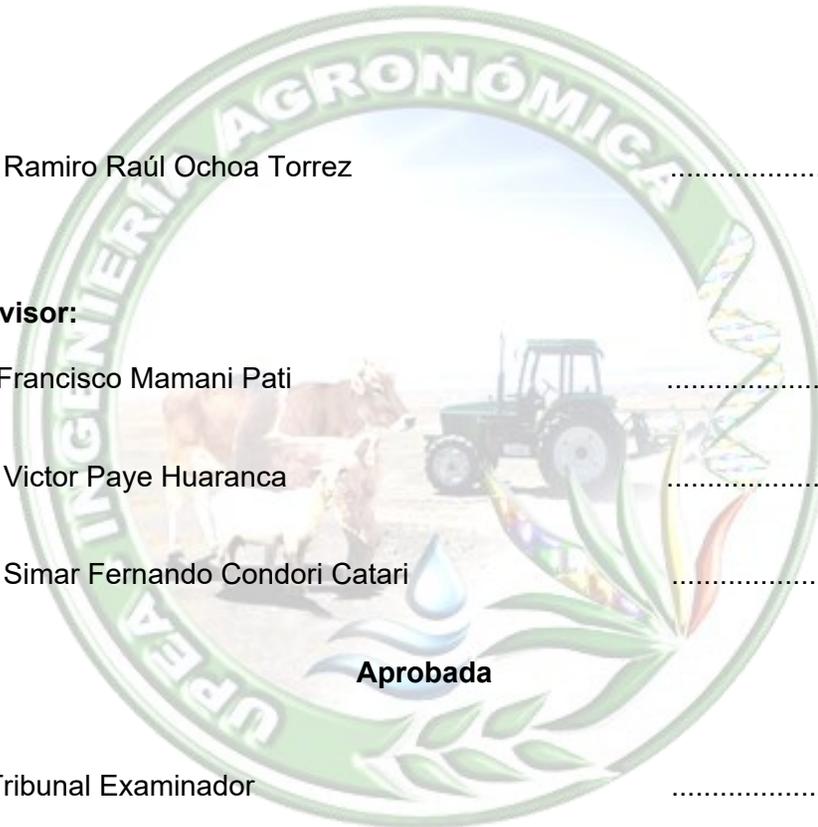
Dr. Lic. Ing. Francisco Mamani Pati

Ms. Lic. Ing. Victor Paye Huaranca

Ms. Lic. Ing. Simar Fernando Condori Catari

Aprobada

Presidente Tribunal Examinador



DEDICATORIA:

A Dios, fuente de sabiduría, fortaleza y guía en cada paso de mi vida. A Él dedico este trabajo, por haberme dado la oportunidad, la paciencia y la perseverancia para culminar esta etapa académica.

A mi madre Margarita Quenta Alejo (†), mi padre Santiago Tarqui Mamani (†) y mi abuelo Pedro Quenta Ramos (†) por tanto amor, cariño, comprensión, paciencia y ternura.

A mi hermana, mis hermanos y mi sobrino Thiago. quienes me inspiran fortaleza y perseverancia.

A mis familiares de parte de mi padre y de mi madre, por todo el cariño, motivación y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios en primer lugar, por haber cuidado y corregido mis pasos para poder llegar y haberme hecho concluir con mi estudio superior.

A esta casa de estudios, por permitirme formarme profesionalmente con una orientación adecuada a nuestro contexto de nuestro país, brindándome todo el conocimiento de mis docentes en la parte teórica y práctica.

A mi asesor de tesis MSN. Lic. Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez, por impartirme el conocimiento adquirido, las correcciones y el apoyo en esta presente investigación.

A mis tribunales evaluadores, por el apoyo recibido tanto en docencia y ahora como evaluadores de mi proceso de formación como ingeniero agrónomo.

Por último, a mis familiares, amigos, compañeros, docentes quienes gracias a Dios me aconsejaron, orientaron y motivaron en distintas etapas en el proceso de formarme profesionalmente.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TEMAS.....	i
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
ABREVIATURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii

ÍNDICE DE TEMAS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Hidroponía	4
2.1.1. Importancia de la hidroponía	4
2.2. Forraje verde hidropónico	5
2.2.1. Importancia del FVH.....	5
2.3. Ventajas y desventajas de FVH	6
2.3.1. Ventajas.....	6
2.3.2. Desventajas.....	6

2.4.	Factores que influyen en la producción.....	7
2.5.	Origen de la cebada	8
2.5.1.	Taxonomía de la cebada	8
2.5.2.	Descripción botánica de la cebada.....	8
2.5.3.	Importancia del cultivo.....	9
2.5.4.	Requerimiento de la cebada bajo un sistema hidropónico	10
2.5.5.	Valor nutricional.....	10
2.6.	Fotosíntesis	10
2.6.1.	Importancia de la fotosíntesis.....	11
2.7.	Fototropismo	11
2.8.	Fotoperiodicidad.....	11
2.8.1.	Importancia de la fotoperiodicidad.....	11
2.9.	Fotomorfogénesis.....	12
2.9.1.	Importancia de la fotomorfogénesis	12
2.10.	Producción bajo luz led	12
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1.	Localización.....	14
3.1.1.	Ubicación Geográfica	14
3.1.2.	Características Edafoclimáticas	15
3.1.2.1.	Clima	15
3.1.2.2.	Temperatura	15
3.1.2.3.	Suelo	15
3.1.2.4.	Flora	15
3.1.2.5.	Fauna	16
3.2.	Materiales.....	16
3.2.1.	Material de escritorio	16

3.2.2.	Material de campo	16
3.2.3.	Biológico	16
3.3.	Metodología.....	17
3.3.1.	Desarrollo del ensayo.....	17
3.3.1.1.	Adecuación y desinfección del ambiente atemperado	17
3.3.1.2.	Instalación de la investigación.....	17
3.3.1.3.	Preparación del estante para sistema FVH.....	17
3.3.1.4.	Preparación de las bandejas caseras	17
3.3.1.5.	Selección de Semilla	18
3.3.1.6.	Densidad de siembra.....	19
3.3.1.7.	Remojado de semilla	19
3.3.1.8.	Siembra	19
3.3.1.9.	Iluminación	19
3.3.1.10.	Riego	20
3.3.1.11.	Cosecha.....	20
3.3.2.	Diseño experimental.....	20
3.3.3.	Tratamientos de estudio	21
3.3.3.1.	Formulación de tratamientos	21
3.3.4.	Variables de respuesta.....	21
3.3.5.	Peso de materia verde (PMV)	21
3.3.6.	Rendimiento (RE).....	21
3.3.7.	Porcentaje de hoja fresca (%HJF).....	22
3.3.8.	Porcentaje de raíz fresca (%RZF).....	22
3.3.9.	Altura de planta (AP)	22
3.3.10.	Longitud de raíz (LR).....	22
3.3.11.	Peso de materia seca (PMS).....	22

3.3.12.	Porcentaje de hoja seca (%HJS).....	22
3.3.13.	Porcentaje de raíz seca (%RZS).....	23
3.3.14.	Porcentaje de humedad (%HMDA)	23
3.3.15.	Porcentaje de humedad total (%HMDA TTL)	23
3.3.16.	Proteína (PTN)	23
3.3.17.	Análisis económico.....	24
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1.	Temperatura de máximas y mínimas	25
4.2.	Peso de materia verde (g).....	26
4.3.	Rendimiento (kg/m ²).....	27
4.4.	Porcentaje de hoja fresca (%).....	28
4.5.	Porcentaje de raíz fresca (%).....	29
4.6.	Altura de planta (cm)	30
4.7.	Longitud de raíz (cm)	30
4.8.	Porcentaje de materia seca (%).....	31
4.9.	Porcentaje de hoja seca (%)	32
4.10.	Porcentaje de raíz seca (%).....	32
4.11.	Porcentaje de humedad (%).....	33
4.12.	Porcentaje de humedad total (%).....	34
4.13.	Proteína (gr/100gr).....	34
4.14.	Variables económicas	35
5.	CONCLUSIONES	38
6.	RECOMENDACIONES	40
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	41
8.	ANEXOS	45

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Valor nutricional de FVH.....	10
Cuadro 2.	Litros de agua para 16 bandejas	20
Cuadro 3.	Estadísticos del peso de materia verde.....	26
Cuadro 4.	ANVA de peso de materia verde	26
Cuadro 5.	ANOVA de rendimiento	27
Cuadro 6.	ANVA de rendimiento	27
Cuadro 7.	ANOVA de porcentaje de hoja fresca.....	28
Cuadro 8.	ANVA de porcentaje de hoja fresca	29
Cuadro 9.	ANOVA de porcentaje de raíz fresca	29
Cuadro 10.	ANVA de porcentaje de raíz fresca	29
Cuadro 11.	ANOVA de altura de planta	30
Cuadro 12.	ANVA de altura de planta	30
Cuadro 13.	ANOVA de longitud de raíz	30
Cuadro 14.	ANVA de longitud de raíz	31
Cuadro 15.	ANOVA de porcentaje de materia seca.....	31
Cuadro 16.	ANVA de porcentaje de materia seca	31
Cuadro 17.	Porcentaje de hoja seca	32
Cuadro 18.	ANVA, de porcentaje de hoja seca.....	32
Cuadro 19.	ANOVA de porcentaje de raíz seca.....	32
Cuadro 20.	ANVA de porcentaje de raíz seca	33
Cuadro 21.	ANOVA de porcentaje de humedad	33
Cuadro 22.	ANVA de porcentaje de humedad	33
Cuadro 23.	ANOVA de porcentaje de humedad total	34
Cuadro 24.	ANVA de porcentaje de humedad total	34
Cuadro 25.	B/C 16 bandejas bajo el mismo tratamiento.....	36

Cuadro 26.	Análisis de la de retorno marginal	37
Cuadro 27.	Análisis de dominancia.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de la ciudad de La Paz (Google, 2024).....	14
Figura 2.	Temperaturas máximas y mínimas registradas.....	25
Figura 3.	Duncan de peso de materia verde	27
Figura 4.	Duncan de rendimiento	28
Figura 5.	Proteína de FVH de cebada	35
Figura 6.	Relación entre costos variables y beneficios brutos.....	37

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Croquis de la investigación.....	46
Anexo 2.	Elaboración de las bandejas caseras.....	46
Anexo 3.	Acondicionamiento de ambiente atemperado.....	46
Anexo 4.	Armado e instalación del sistema de riego.....	47
Anexo 5.	Dimensionamiento y jumper de cintas de luz LED.....	47
Anexo 6.	Instalación del sistema de iluminación artificial.....	48
Anexo 7.	Prueba de germinación.....	49
Anexo 8.	Selección de impurezas.....	49
Anexo 9.	Lavado, desinfectado y remojo de semilla.....	49
Anexo 10.	Oxigenación de semilla.....	50
Anexo 11.	Siembra en bandejas.....	50
Anexo 12.	Ambiente oscuro.....	51
Anexo 13.	Cálculo de riego.....	51
Anexo 14.	Día 1 de desarrollo de FVH de cebada.....	51
Anexo 15.	Día 2-3 de desarrollo de FVH de cebada.....	52
Anexo 16.	Día 4, Presencia de coleóptilo y aplicación de luz LED.....	52
Anexo 17.	Día 5 de desarrollo de FVH de cebada.....	53
Anexo 18.	Día 6-7 de desarrollo de FVH de cebada.....	53
Anexo 19.	Día 8 – 9 de desarrollo de FVH de cebada.....	53
Anexo 20.	Día 10-11 de desarrollo de FVH de cebada.....	54
Anexo 21.	Día 12 – 13 de desarrollo de FVH de cebada.....	54
Anexo 22.	Día 14 de desarrollo de FVH de cebada.....	55
Anexo 23.	Día 15, final de ciclo de desarrollo de FVH de cebada.....	55
Anexo 24.	Cosecha y pesaje de FVH.....	56

Anexo 25.	Retirado de bordura.....	56
Anexo 26.	Llevado de muestra al INLASA.	57
Anexo 27.	Laboratorio, peso de materia seca	57
Anexo 28.	Porcentaje de hoja y raíz seca.	58
Anexo 29.	Costos fijos y variables de producción para T2, T3 y T4.....	58
Anexo 30.	Costos fijos y variables de T1.....	59
Anexo 31.	Resultado INLASA tratamiento T1	60
Anexo 32.	Resultado INLASA Tratamiento T2	61
Anexo 33.	Resultado INLASA tratamiento T3	62
Anexo 34.	Resultado INLASA Tratamiento T4	63
Anexo 35.	Promedios por tratamiento de rendimiento	64
Anexo 36.	Promedios por tratamiento de peso de materia verde	64
Anexo 37.	Promedio por tratamiento de porcentaje de hoja fresca.....	64
Anexo 38.	Promedio por tratamiento de porcentaje de raíz fresca	64
Anexo 39.	Promedio por tratamiento de porcentaje de hoja seca.....	64
Anexo 40.	Promedio por tratamiento de porcentaje de raíz seca.....	65
Anexo 41.	Promedio por tratamiento de altura de planta	65
Anexo 42.	Promedio por tratamiento de longitud de raíz	65
Anexo 43.	Promedio por tratamiento de porcentaje de materia seca.....	65
Anexo 44.	Promedio por tratamiento de porcentaje de humedad	65
Anexo 45.	Promedio por tratamiento de porcentaje de humedad total	66
Anexo 46.	Promedio por tratamiento de proteína.....	66

ABREVIATURAS

FVH	Forraje Verde Hidropónico
LED	Light emitting diode
cm	Centímetro
g	Gramos
PMV	Peso de materia verde
RE	Rendimiento
%HJF	Porcentaje de hoja fresca
%RZF	Porcentaje de raíz fresca
AP	Altura de planta
LR	Largo de raíz
%MS	Porcentaje de materia seca
%HJS	Porcentaje de hoja seca
%RZS	Porcentaje de raíz
%HMA	Porcentaje de humedad
PTN	Proteína
%HMATTL	Porcentaje de humedad total

RESUMEN

La investigación se llevó a cabo en el Centro Experimental de Kallutaca, ubicado en la región alto andina caracterizada por clima seco, heladas frecuentes y sequías prolongadas, condiciones que restringen la producción tradicional de forraje y afectan directamente la alimentación del ganado y la economía de los productores. Ante esta situación, se evaluó el efecto de distintos espectros de luz LED sobre el desarrollo agronómico y la calidad nutricional del forraje verde hidropónico (FVH) de cebada, planteado como una alternativa sostenible frente a las limitaciones climáticas.

Se implementaron cuatro tratamientos de iluminación: T1 (luz natural), T2 (luz LED blanca), T3 (LED rojo + azul) y T4 (LED magenta), evaluándose altura de planta, longitud de raíz, peso de materia verde, rendimiento por área, materia seca, humedad y contenido proteico. El diseño experimental fue completamente al azar con bloques.

Los resultados revelaron diferencias significativas en peso de materia verde ($p = 0.0176$), destacando T2 con 2000 g, seguido por T3 (1965 g) y T4 (1962.5 g), todos superiores al control T1 (1723.75 g). En rendimiento por metro cuadrado, T2 alcanzó 26.35 kg/m² frente a 22.71 kg/m² de T1 ($p = 0.0189$). La altura (14.23 – 14.67 cm) y la longitud de raíz (11.97–13.95 cm) no mostraron diferencias ($p = 0.7986$ y $p = 0.1411$), aunque T4 presentó tendencia favorable.

En materia seca no hubo diferencias ($p = 0.1539$), siendo mayor T1 (15.18%). La humedad osciló entre 84.82% y 87.71% ($p = 0.5090$). En proteína, T4 destacó con 2.04 g/100g, seguido de T1 (1.89 g), superando a T2 (1.62 g) y T3 (1.68 g).

Respecto a costos, T2 registró la mayor inversión (Bs. 130.27), pero también la mayor rentabilidad, con una tasa marginal de retorno del 63.90%, frente a T1 (Bs. 107.47). En conclusión, la luz LED blanca potencia el rendimiento y la rentabilidad, mientras que la magenta incrementa el valor proteico, constituyendo ambas opciones viables para el altiplano boliviano.

ABSTRACT

The research was carried out at the Kallutaca Experimental Center, located in the high Andean region characterized by a dry climate, frequent frosts, and prolonged droughts conditions that limit traditional forage production and directly affect livestock feeding as well as farmers' economy. In this context, the effect of different LED light spectra on the agronomic development and nutritional quality of hydroponic green forage (HGF) barley was evaluated, proposed as a sustainable alternative under climatic limitations.

Four lighting treatments were implemented: T1 (natural light), T2 (white LED light), T3 (red + blue LED), and T4 (magenta LED), evaluating plant height, root length, fresh biomass weight, yield per area, dry matter, moisture, and protein content. The experimental design was completely randomized with blocks.

The results revealed significant differences in fresh biomass weight ($p = 0.0176$), with T2 being the highest at 2000 g, followed by T3 (1965 g) and T4 (1962.5 g), all superior to the control T1 (1723.75 g). Regarding yield per square meter, T2 reached 26.35 kg/m² compared to 22.71 kg/m² for T1 ($p = 0.0189$). Plant height (14.23 – 14.67 cm) and root length (11.97–13.95 cm) showed no significant differences ($p = 0.7986$ and $p = 0.1411$, respectively), although T4 showed a slight favorable trend.

For dry matter, no significant differences were found ($p = 0.1539$), with the highest value in T1 (15.18%). Moisture ranged from 84.82% to 87.71% ($p = 0.5090$). In protein content, T4 stood out with 2.04 g/100g of HGF, followed by T1 (1.89 g), surpassing T2 (1.62 g) and T3 (1.68 g).

In terms of costs, T2 recorded the highest investment (Bs. 130.27) but also the greatest profitability, with a marginal return rate of 63.90%, compared to T1 (Bs. 107.47). In conclusion, white LED light enhances yield and profitability, while magenta light increases protein content, making both technologies viable alternatives for the Bolivian highlands.

1. INTRODUCCIÓN

La pobreza en Bolivia se concentra en zonas rurales del país, particularmente en el occidente altiplánico por la escasez de tierra, el deterioro creciente de recursos naturales, la falta de nuevas tecnologías y otros factores que ayuda a explicar la migración en la zona del altiplano boliviano.

Las praderas nativas se constituyen en la mayor base alimentaria del ganado, a esto se suma las condiciones climáticas adversas como sequías y heladas que limitan la producción de forraje a campo abierto. La producción de forraje en la región altiplánica mayormente es de manera preventiva para épocas de estiaje y se complementa con forraje de cebada, avena, alfalfa y otros que una vez cosechados son almacenados comúnmente en parvas y puedan así contrarrestar la desnutrición del ganado. Desnutrición que es un gran problema y se traduce en la disminución de la productividad de leche, carne, reducción en la fertilidad, mayor susceptibilidad a enfermedades y en casos extremos mortalidad, en situaciones de emergencias lleva al productor a comprar alimentos adicionales generando un impacto económico negativo en su economía.

A problemas ya mencionados hacen que el productor tenga que buscar la manera de poder encontrar alternativas de producción, una fuente de producción de forraje con alto contenido proteico, fresca, abundante durante todo el año, sin importar las condiciones climáticas. Entre las especies forrajeras más cultivados en la región está la cebada (*Hordeum vulgare* L.) forrajera que es difundida por su gran adaptación al clima de esa región y también por su importante valor nutritivo. Es así que el establecimiento de estos cultivos en un sistema de Forraje Verde Hidropónico (FVH), de manera artificial ha tenido buena aceptación por parte de los productores, siendo una buena alternativa para poder brindar y garantizar alimento a su ganado, no obstante, la producción en un sistema de FVH es libre de uso de productos inorgánicos, es amigable, palatable y aceptable para el ganado y volviendo en cierta forma dóciles al mismo (Condori, 2015).

1.1. Antecedentes

Fabián (2017), en su investigación donde evaluó el efecto de la intensidad lumínica de diodos emisores de luz (LED) y del fotoperiodo, señala relación en el consumo de agua y en la producción de biomasa en FVH de maíz y recomienda la utilización de diferentes colores en la producción de FVH.

Espinal (2021), en la evaluación del efecto de la iluminación LED en un sistema vertical de producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.), concluye que la eficiencia fotosintética está relacionada directamente con la energía brindada por el color de la luz LED y que la de color violeta fue el que obtuvo mejores resultados.

Rivero (2022), determinó que el efecto del color de la luz LED en la producción de (*Brassica oleracea* L.) tiene alta significancia en la altura de planta como también en el peso fresco.

Por otra parte Ticona (2022), en su ensayo con distintas frecuencias de exposición con luz LED en el cultivo de menta (*Mentha piperita* L.) obtuvo mejores resultados agronómicos exponiendo por 12 horas con luz LED al cultivo.

Yang (2024), evaluó que las intensidades de luz afectan al crecimiento, la fotosíntesis y el valor nutricional del FVH de cebada, los resultados mostraron que el aumento de la intensidad lumínica mejora el desarrollo, recomienda y concluye no sobre pasar los 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ e implementar otros colores y en distintas especies.

1.2. Planteamiento del problema

En el altiplano boliviano, región caracterizada por su clima seco, de heladas frecuentes y largos periodos de sequía, la producción de forraje de manera tradicional a campo abierto se ve afectada y limitada, afectando directamente en la alimentación del ganado y en consecuencia, la economía de las pequeñas familias productoras. Esta escasez forrajera genera pérdidas en peso vivo, producción de leche e incluso en la reproducción del ganado, lo cual compromete la seguridad alimentaria y los ingresos de las familias productoras de zonas rurales.

1.3. Justificación

Actualmente, existen tecnologías de bajo costo y bajo consumo energético como los sistemas de iluminación LED que están siendo adoptadas no solo en áreas urbanas, sino que también en zonas periurbanas y comunidades alejadas por su eficiencia y la facilidad de poder implementar. En ese contexto se vuelve necesario el introducir alternativas sostenibles como el FVH que permite cultivar forraje en ambientes atemperados, reduciendo la incidencia de las condiciones climáticas y nutricional del FVH aún no sido estudiado en condiciones altoandinas (Altiplano boliviano, paceño). Esto plantea la necesidad de investigar y adaptar sistemas de producción eficientes que optimicen la

calidad del forraje mediante el uso adecuado del espectro de luz, contribuyendo así a la mejora de la producción ganadera y de la calidad de vida de las familias productoras del altiplano.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto de diferentes espectros de luz LED en la producción de cebada (*Hordeum vulgare* L.) bajo un sistema de producción hidropónico en ambiente atemperado de la Estación Experimental de Kallutaca.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar la altura de planta y la longitud de raíz del FVH de cebada bajo distintos espectros de luz LED
- Comparar el rendimiento productivo de peso de materia verde, rendimiento y el contenido proteico del FVH de cebada bajo distintos espectros de luz LED.
- Determinar la rentabilidad económica y el beneficio/costo parcial del FVH de cebada bajo distintos espectros de luz LED

1.5. Hipótesis

H₀: La aplicación de distintos espectros de luz LED no tiene ningún efecto significativo en el proceso de producción de forraje verde hidropónico de cebada.

H_a: La aplicación de distintos espectros de luz LED genera un efecto significativo en la producción de forraje verde hidropónico de cebada.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Hidroponía

La hidroponía es un sistema de cultivo de plantas, prescindiendo de la utilización de suelo uno de los factores fundamental en la agricultura tradicional, el vocablo hidroponía se deriva de las palabras griegas hydro (agua) y ponos (trabajo) que en conjunto significa “trabajar en agua” para el crecimiento, desarrollo y producción de una gran variedad de plantas de buena calidad (Ibarra, 2010).

Delgado (2016), refiere a la hidroponía como la ciencia del crecimiento de las plantas, sin utilizar el suelo en su lugar utiliza un medio inerte, como arena, turba, grava, piedra, aserrín, a los cuales se añade una solución que de función a la parte radicular para el crecimiento y desarrollo del vástago. Puesto que muchos de estos métodos hidropónicos emplean algún tipo de medio de cultivo, se los denomina a menudo “cultivo sin suelo”, mientras que el cultivo solamente en agua sería el verdadero hidropónico.

Abad (1994), citado por Huiza (2015), cuando las raíces de la planta se sumergen solo en agua, presenciamos la hidroponía pura, uno de los primeros métodos empleados, posteriormente evoluciona con la implementacion y variación, pero con el mismo principio: una solución entra en contacto con las raíces y ningún otro sustrato.

Según FAO (2001), la hidroponía es una técnica que permite cultivar en pequeña o gran escala, sin necesidad de suelo como sustrato y que la planta pueda crecer a través de un riego efectivo para el cultivo.

2.1.1. Importancia de la hidroponía

La FAO (2001), destaca a la hidroponía como una práctica agrícola, ideal para enfrentar la escasez de agua, tierra cultivable y cambios climáticos. Permite ahorrar hasta un 90% de agua respecto a métodos tradicionales, producir durante todo el año en espacios reducidos, y mejorar la producción de la cadena alimentaria, su implementación favorece sistemas sostenibles, eficientes y adaptables a diferentes contextos.

2.2. Forraje verde hidropónico

El FVH es un forraje vivo para alimento de los animales de engorde para producción de carne o leche, se produce bajo la técnica del cultivo sin suelo en ambientes protegidos que permiten el control de gasto de agua y de elementos de microclima para poder producir aún en condiciones adversas de clima, sirve para producir cereales y gramíneas que pueden sustituir en gran parte o por completo el alimento procesado para animales vacuno, porcino, caprino, equino, cunícola y una gran cantidad de animales domésticos con excelentes resultados además de ser económico y fácil de producir (Santander, 2006).

Según Navarrete (2008), el FVH es una tecnología de producción de biomasa vegetal obtenida a partir del crecimiento inicial de las plantas en los estados de germinación y de crecimiento temprano.

El FVH es un sistema de producción de biomasa vegetal de alta sanidad y calidad nutricional producido muy rápidamente, generalmente de 9 a 15 días, en cualquier época del año y en cualquier localidad geográfica, siempre y cuando se establezcan las condiciones mínimas necesarias para ello (Sánchez, 2005).

El sistema FVH da una situación restrictiva para el desarrollo de cultivos y representa una alternativa de producción de forraje no convencional. Sin embargo, no existe información disponible de evaluación de parámetros de productivos y nutritivos en otras condiciones. El sistema de FVH llega a ser una tecnología de producción de biomasa vegetal a partir de plántulas en estado de germinación y de crecimiento temprano, las especies comúnmente utilizadas en esta modalidad son cebada, avena, maíz, trigo y arroz (Fuentes, 2011).

2.2.1. Importancia del FVH

Según Rodríguez (2003), indica que una forma de reducir la variabilidad es manteniendo condiciones climáticas uniformes en áreas donde se desarrolle el forraje de manera continua logrando así alimentar animales en forma constante conforme a sus requerimientos nutricionales para que estos tengan una producción menos variable, además de obtener una producción animal menos variable al utilizar la producción de forraje hidropónico, se ha reportado que también produce un beneficio económico en la producción, originado por las ventajas que ofrece.

El Forraje Verde Hidropónico brinda vitaminas A, E y C. Las cuales se encuentran libres y solubles en el forraje. La vitamina E es completamente asimilable y está en libre circulación por toda la planta. En análisis realizado en la Universidad de Colombia, se comprobó que en los excrementos de animales alimentados con FVH no existía vitamina E, lo cual demuestra su completa asimilación. En cuanto al nivel de proteína del FVH es muy similar al de la alfalfa (forraje requerido por su alto nivel de proteína). Los análisis químicos indican que los niveles de proteína del FVH de trigo de 20 a 22 %, son superiores al de la cebada con 16 a 20 % de proteína cruda (Samperio, 2007).

2.3. Ventajas y desventajas de FVH

Nina (2017), menciona las siguientes ventajas y desventajas:

2.3.1. Ventajas

- **Ahorro de agua:** No se registran pérdidas considerables por evapotranspiración, escurrimiento o infiltración debido al sistema en el que se desarrolla.
- **Uso eficiente del espacio:** Dada la disposición de las estanterías o módulos, se ahorra el espacio al estar ubicados de forma vertical (por pisos).
- **Tiempo de producción:** El forraje puede estar disponible a partir de los 10 a 12 días. Pudiéndose anticipar o prolongar 9 a 15 días, respectivamente.
- **Calidad de forraje:** El FVH constituye un pienso de alta digestibilidad, excelente palatabilidad y que contiene alto valor nutritivo para las especies pecuarias.
- **Inocuidad:** Constituye un alimento limpio libre de enfermedades e insectos.
- **Costos de producción:** Los costos fijos en la producción de FVH son bajos ya que no requiere de maquinaria para la preparación de suelos en cada siembra, como el método tradicional.

2.3.2. Desventajas

- **Desinformación y sobrevaloración de la tecnología:** Es de vital importancia tener un conocimiento básico sobre cómo funciona el sistema, comportamiento y

requerimiento de la especie forrajera utilizada, plagas y enfermedades, así como cuidados exigentes y permanentes, debido a la fragilidad de las plantas.

- **Costo de instalación elevado:** Dado a que se debe implementar una infraestructura y equipos implica un costo inicial considerable.

2.4. Factores que influyen en la producción

Según la FAO (2001), entre los factores que condicionan el éxito o fracaso de la producción de los FVH podemos mencionar:

- **Calidad de la semilla:** La semilla a utilizarse en la producción de los FVH está ligada al precio de la misma, sin embargo, esto no reemplaza la importancia de utilizar un material con un porcentaje de germinación no menor al 75 %.
- **Iluminación:** La radiación solar es básica para el crecimiento vegetal, a la vez que es promotora de varios procesos fisiológicos.
- **Calidad del agua de riego:** Otro factor singular en la producción de los FVH es la condición de que el agua a ser usada debe tener una característica de potabilidad.
- **pH:** El pH del agua de riego debe oscilar en rangos entre 5,2 y 7.
- **Temperatura:** El rango óptimo para la producción de los FVH es de 18 a 26 °C. Cada especie presenta requerimientos de temperatura óptimos.
- **Humedad:** La humedad relativa que debe existir dentro del invernadero no puede ser inferior al 90 %. Humedades más altas provoca problemas sanitarios, mientras que humedades más bajas puede provocar el desecamiento del ambiente y deshidratación del forraje con su respectiva disminución en la producción.
- **Concentración de CO₂:** El tener un control de la concentración de CO₂ ofrece una oportunidad de elevar la producción de los FVH, ya que se incentiva a una mayor actividad fotosintética.

2.5. Origen de la cebada

La cebada es originaria del sudoeste de Asia y África Septentrional es una especie de las primeras domésticas al comienzo de la historia de la agricultura y registra uso en la elaboración de pan antiguamente y para la alimentación de ganado (Trujillano, 2016).

Colque (2005) citado por Perez (2017), la cebada (*Hordeum vulgare* L.), es una planta monocotiledónea anual perteneciente a la familia de las poáceas (gramíneas), a su vez es un cereal de gran importancia tanto para animales como para humanos y actualmente el quinto cereal más cultivado en el mundo (53 millones de hectáreas).

2.5.1. Taxonomía de la cebada

Según Rojas (2002), la taxonomía de la cebada es la siguiente:

- Reino: Plantae.
- Orden: Cyperales.
- Familia: Poaceae.
- Género: Hordeum.
- Especie: vulgare.
- N. Científico: *Hordeum vulgare* L.
- N. Común: Cebada.

2.5.2. Descripción botánica de la cebada

Se tiene la siguiente descripción botánica:

a) Raíz

La raíz en cultivos en el suelo además de la función de absorción de agua, minerales y de dar soporte a la planta, en un contexto de un sistema de cultivo hidropónico donde el medio de cultivo es de manera artificial, la raíz se convierte no solo en el soporte de fijación y el encargado del desarrollo vegetativo, sino que se convierte en un indicador clave del sistema fisiológico en el sistema de producción (Parsons, 2009).

b) Tallo

El tallo es cilíndrico y recto con nudos y entrenudos basales cortos y en el ápice más largos gradualmente más grueso en la parte basal o cuello (Parsons, 1999).

c) Hoja

Es lanceolada con una longitud aproximadamente de 22 a 30 cm y un ancho de 1 a 1.5 cm de color verde claro, cuenta con una vaina que nace desde los nudos del tallo y termina en la lígula que es el inicio de la hoja (FAO, 2001).

d) Flores

Las flores tienen tres estambres, un pistilo y dos estigmas, es autógama, es decir que las flores se abren después de haber fecundado importante para la conservación genética, la inflorescencia es espiga en tres hileras compuestas por lema, palea y arista (Johan, 1999).

e) Inflorescencia

Las espiguillas están compuestas por 2 a 6 flores, reunidas en número de tres en cada diente del eje, de forma articulada (Johan, 1999).

f) Fruto

El fruto es una carióspside con las glumillas adheridas, existe un surco capilar en la cara ventral y se distingue por la temperancia el hilo que es el lugar de unión de carpelo y semilla (Casas, 2022).

2.5.3. Importancia del cultivo

La cebada ocupa un lugar muy importante en los sistemas agrícolas, en la alimentación del ganado, rotación de cultivos, obtención de subproductos, industrialización y en la alimentación humana según (Colque, 2005).

Mendoza (2009), menciona que en la actualidad ocupa el cuarto lugar en volumen de producción de cereales, después del arroz, el maíz y el trigo, la cebada ocupa un lugar muy importante en los sistemas agrícolas, en la alimentación del ganado, rotación de cultivos, obtención de subproductos, industrialización y en la alimentación humana.

2.5.4. Requerimiento de la cebada bajo un sistema hidropónico

Izquierdo (2002), en el inicio del ciclo de producción de FVH, la presencia de luz durante la germinación de las semillas no es deseable, una exposición directa a la luz del sol puede traer consecuencias negativas, el pH debe oscilar entre 5.2 y 7.

No es conveniente prolongar el periodo de cultivo más allá de los 15 días porque se comprobó que la pérdida de fitomasa resulta inevitable a medida que pasa el tiempo aunque se recurra a prácticas de fertilización (Perez, 2017).

2.5.5. Valor nutricional

Eficiencia en el tiempo de producción de FVH apto para alimentación animal tiene un ciclo de 10 a 12 días. En ciertos casos, por estrategia de manejo interno de los establecimientos, la cosecha se realiza a los 14 o 15 días, a pesar que el óptimo definido por varios estudios científicos, no puede extenderse más allá del día 12, a partir de ese día se inicia un marcado descenso en el valor nutricional del FVH (Corona, 2011).

El FVH, es un forraje de alta calidad superior a otros, el cual se suministra al ganado en forma completa (hojas, tallos, raíces y restos de semilla), constituyéndose en un alimento nutricional de excelente calidad en proteína, aminoácidos carbohidratos suficientes, contiene vitaminas y minerales. Estimula el sistema inmunológico para evitar todo tipo de enfermedades en los animales (Aquino, 2010).

Cuadro 1. Valor nutricional de FVH

Parámetro	Valor promedio (FAO, 2001)
Materia seca (%)	12 – 14
Proteína bruta (%)	15 – 20
Fibra cruda (%)	14 – 18

Fuente: Izquierdo (2002).

2.6. Fotosíntesis

Se define la fotosíntesis como un proceso físico-químico en el cual las algas, las plantas y las bacterias fotosintéticas utilizan energía solar para sintetizar compuestos orgánicos. La luz juega un papel significativo en la fotosíntesis, solo las longitudes de onda desde 400 nm a 700 nm son útiles para la fotosíntesis debido a que los demás son nocivos para los seres vivos, este proceso, inicia por la absorción de la energía lumínica y su transformación en

adensin trifostato (ATP) y nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADPH) en las membranas en el interior de los cloroplastos, Específicamente en el estroma con la ayuda de varias enzimas. Son varios factores los cuales perjudican la fotosíntesis e intervienen en la intensidad de la luz (Ticona, 2022).

2.6.1. Importancia de la fotosíntesis

Se encarga del proceso bioquímico mediante el cual las plantas, algas y algunas bacterias pueden convertir la energía solar en compuestos orgánicos, liberando oxígeno y fijando dióxido de carbono para generar biomasa, según Ticona (2022), se resaltan dos fases críticas:

- Separación del agua: Para generar ATP y NADPH
- Fijación del CO₂ (dióxido de carbono) en azúcares mediante energía química, la etapa que consume mayor energía química que la producida en la primera.

2.7. Fototropismo

Se conoce al desarrollo diferencial que muestran las plantas en dirección a una fuente luminosa contigua principalmente luz de color azul, es denominado fototropismo (Pérez, 2003).

2.8. Fotoperiodicidad

Se denomina a la capacidad de las plantas que poseen para medir la longitud del día en su entorno, lo que les permite determinar la estación del año en la que se encuentran y adaptar sus variables fisiológicas para que se pueda ejecutar adaptaciones a nivel fisiológicos (Salvetti, 2002).

2.8.1. Importancia de la fotoperiodicidad

Según Roeber (2022), es una señal ambiental esencial que permite a las plantas sincronizar procesos vitales, además actúa como mecanismo anticipatorio frente a condiciones adversas activando rutas genéticas que regulan las respuestas al estrés.

2.9. Fotomorfogénesis

Se denomina al control de la morfogénesis por la luz es decir los efectos que se provocan por los cambios en la cantidad y composición espectral de la luz en la inducción en el crecimiento como en el desarrollo de órganos, es un proceso separado de la fotosíntesis donde distintos patrones de crecimiento responden la espectro de luz (Ticona, 2022).

2.9.1. Importancia de la fotomorfogénesis

Es el proceso mediante el cual la luz actúa como señal ambiental (no energética), para regular el crecimiento y desarrollo de las plantas, A través de receptores como fitocromos, criptocromos, fototropinas y UVR8, las plantas ajustan morfología, inicio de germinación, apertura estomática, expansión foliar y transición a floración según la calidad, cantidad y dirección de la luz. Es un mecanismo importante porque optimiza la arquitectura vegetal desarrollando hojas, tallos de forma ideal, también activa defensa y mecanismo de protección mejorando la resistencia al estrés ambiental y por último no menos importante nos permite realizar manipulaciones agronómicas para influir en el desarrollo de la planta según (Albrechtová, 2017).

2.10. Producción bajo luz led

Espinal (2021) citado por Ticona (2022), señala que la iluminación artificial en la agricultura se clasifica en diversas tecnologías según su costo, eficacia y productividad, además de las lámparas incandescentes y fluorescentes tradicionales, los LED han ganado terreno por su capacidad de combinar tonalidades y emitir longitudes de onda específicas para distintos cultivos. Por ejemplo, la luz roja, que abarca aproximadamente de 630 a 660 nm, resulta crucial para el desarrollo de tallos y la expansión foliar, mientras que la luz azul, en el rango de 400 a 520 nm, favorece la producción de clorofila y el engrosamiento de las hojas. Asimismo, al ser regulables, los LED permiten ajustar la intensidad de la luz, optimizando la fotosíntesis y evitando que el exceso se convierta en calor, lo que podría afectar negativamente el proceso fotosintético.

En nuestra actualidad existen tecnologías agrícolas innovadoras para proyectos de agricultura urbana para que las plantas crezcan en entornos de interior sin luz solar. Este proceso de cultivo 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 y obtener un rendimiento mayor en menos espacio (Philips, 2020).

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).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización

3.1.1. Ubicación Geográfica

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en los predios del Centro Experimental de Kallutaca, de la Universidad Pública de El Alto, ubicado a 20 km de la ciudad de La Paz, en la provincia Los Andes, municipio de Laja, encontrándose en posiciones geográficas, entre los paralelos de $16^{\circ}31'24.80''$ de latitud sur y $68^{\circ}18'33.73''$ de longitud oeste elevación de 3902 m.s.n.m.

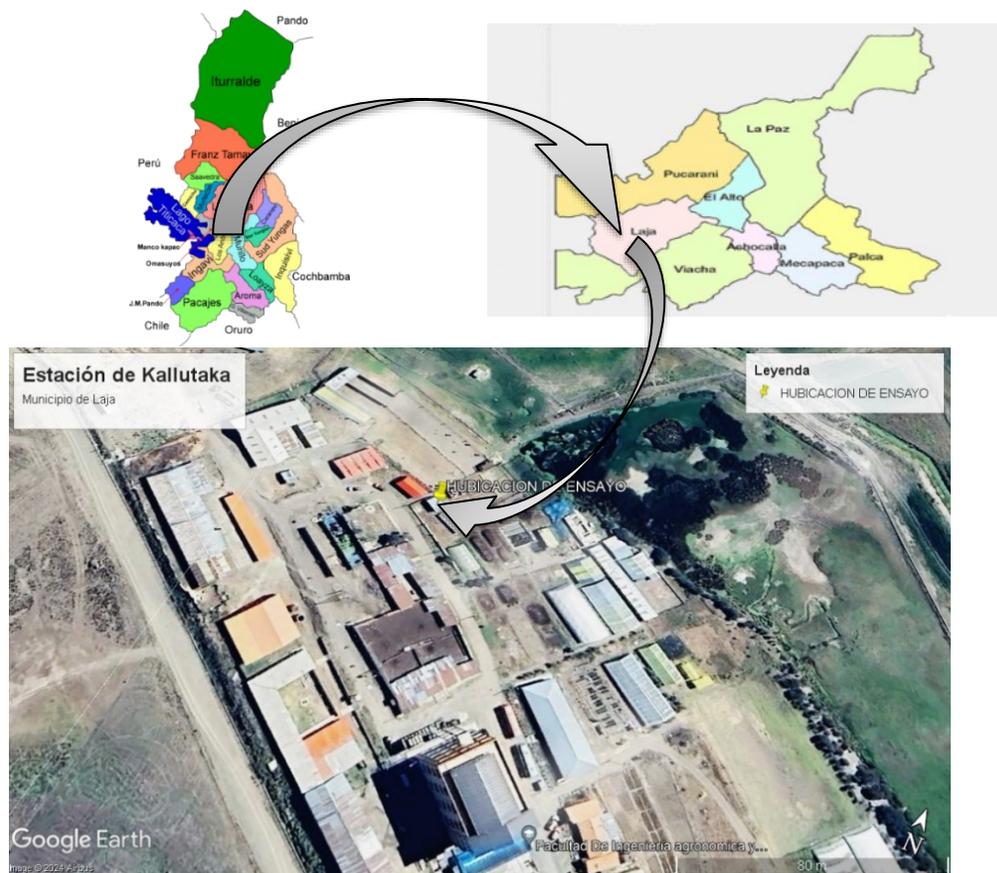


Figura 1. Mapa de la ciudad de La Paz (Google, 2024).

3.1.2. Características Edafoclimáticas

3.1.2.1. Clima

En el Municipio de Laja se presenta un clima característico del altiplano boliviano, con marcada estacionalidad. La precipitación media anual es de 667 mm que se concentra entre noviembre y marzo, siendo este el periodo óptimo para realizar actividades agropecuarias. La época seca y fría se presentan entre los meses de mayo a agosto, periodo en el que se restringe de manera brusca la producción, incluso en carpas debido a las bajas temperaturas (GAML, 2023).

3.1.2.2. Temperatura

La temperatura media anual es de 8.4 °C, el promedio de las máximas es de 15.7 °C y las mínimas de hasta -4 °C. El mes más cálido es noviembre con un promedio de 20 °C y el más frío el mes de junio con picos de hasta -9 °C, condiciones que exponen a la producción agropecuaria a riesgos de heladas y con una variación solar en esos meses (GAML, 2023).

3.1.2.3. Suelo

El Municipio de Laja presenta una diversidad edáfica clasificada principalmente en asociaciones cambisoles – leptosoles, con inclusión de fluvisoles, gleysoles, luvisoles y regosoles, así como presencia de litosoles. Esta variabilidad responde a un origen fluvio lacustre, colinas bajas, llanuras y piedemontes. La fertilidad de estos suelos varía y llega a ser adecuada para cultivos andinos tradicionales como papa, quinua, cebada y haba (GAML, 2023).

3.1.2.4. Flora

La vegetación del Municipio es mayormente nativa y arbustiva, con una extracción para uso doméstica (como leña). Se atribuye principalmente en zonas de piedemonte y serranías, donde predominan pajonales de ichu (*Stipa ichu*), chilliwa (*Festuca dolichophylla*), añahuaya (*Adesmia miraflorensis*), kaylla (*Tetraglochin cristatum*) y especies de la familia Baccharis. Estas especies son resistentes a las condiciones climáticas extremas y tienen valor forrajero y cultural para las comunidades locales del Municipio de Laja (Perez, 2022).

3.1.2.5. Fauna

Entre las especies más comunes se encuentran: Camélidos (llamas y alpacas), ovinos, vacunos, zorros andinos, aves altoandinas como el quirquincho, gaviotas, patos silvestres y otras especies adaptadas a las condiciones extremas del altiplano y muchas cumplen funciones ecológicas importantes en los sistemas de producción (Perez, 2022).

3.2. Materiales

3.2.1. Material de escritorio

- Libro de campo.
- Escalímetro.
- Balanza digital de precisión.
- Cámara fotográfica.

3.2.2. Material de campo

- Estante metálico de 4 niveles.
- Bomba eléctrica de agua.
- Timer automático.
- Politubos PVC.
- Accesorios hidráulicos para sistema de riego.
- Bandejas caseras de forraje verde hidropónico.
- Luces Led (rojo, azul, magenta y blanca).
- Fuente de alimentación de 12V-10a.
- Cables de ambos polos positivo y negativo.
- Bolsa de polipropileno.
- Balanza reloj.
- Estufa.
- Sobres manilas.

3.2.3. Biológico

- Semilla de cebada.

3.3. Metodología

3.3.1. Desarrollo del ensayo

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la Estación Experimental de Kallutaca, que se encuentra en el Municipio de Laja perteneciente a la Universidad Pública de El Alto en el cual se hizo uso de una carpa atemperada dentro de la estación experimental, ocupando un espacio en la infraestructura.

3.3.1.1. Adecuación y desinfección del ambiente atemperado

Se dio inicio a esta actividad con la adecuación del módulo hidropónico, en el cual se preparó un espacio donde se instalará la estructura para el soporte de las bandejas para la producción, seguidamente se procedió a la limpieza con una solución de hipoclorito de sodio con una concentración de 10%, roció a las paredes, las esquinas y el piso con el objetivo de eliminar diversos patógenos que puedan influir en el desarrollo de la investigación.

3.3.1.2. Instalación de la investigación

La investigación propuesta se estableció en la Estación Experimental de Kallutaca, en un ambiente atemperado, en el módulo de bioabonos este mismo nos permitió tener mayor control del ambiente y también minimizar los efectos del clima externo, tener mejor optimización del crecimiento del cultivo de FVH y generar, recabar información útil de aporte científico.

3.3.1.3. Preparación del estante para sistema FVH

El estante se lo hizo de fierro metálico considerando 4 niveles, el primero a una altura de 1.5 m del suelo, la segunda 0.25 m del primero, la tercera de la misma manera 0.25 m del segundo y con la misma distancia el cuarto del tercero. Dando homogeneidad y uniformidad en el ensayo.

3.3.1.4. Preparación de las bandejas caseras

Se obtuvieron los bidones de 20 l en una feria urbana conocida por vender este tipo de material, por cantidad y a buen precio, de esa manera se procedió a dimensionar y

posteriormente se recortó estos mismos con el fin de poder obtener dos bandejas caseras por bidón.

3.3.1.5. Selección de Semilla

La semilla fue adquirida de productores del municipio de Iaja, provincia Ingavi una de las regiones de mayor producción y rendimiento de cebada, obteniendo material genético de esta región que está adaptado a las condiciones climáticas del altiplano paceño. Semilla que fue sometida a pruebas de: Pureza, germinación y viabilidad.

a) Pureza

Se realizó la selección de impurezas por técnica de venteado y selección manual, donde se pudo extraer rastrojos, piedras, entre otros. Se hizo la limpieza del total de semilla a utilizar siendo 6 kg y se obtuvo un peso del total de impureza de 235 g, se determinó bajo la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de pureza} = 100 - \left(\frac{\text{Peso de impurezas}}{\text{Peso total de semilla}} \right) * 100$$

$$\text{Porcentaje de pureza} = 100 - \left(\frac{273 \text{ g}}{6.072 \text{ g}} * 100 \right) = 95.5\% \text{ de pureza}$$

b) Germinación

Se estableció en las mismas bandejas a producir, realizando la prueba de germinación con un total de 160 individuos seleccionadas de manera aleatoria, obteniendo un total de 148 semillas y para determinar el PGN, se usó la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de germinación (PGN)} = \frac{\text{Número de semillas germinadas}}{\text{Número total de semillas de ensayo}}$$

$$(PGN) = \frac{148}{160} = 92.5\%$$

c) Viabilidad

Con los datos de pureza y el porcentaje germinación se determinó que la viabilidad de la semilla es de un 87.95% bajo la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de viabilidad} = 100 - \left(\frac{g \text{ impurezas} + g \text{ no germinadas}}{100} * 100 \right)$$

$$\text{Porcentaje de viabilidad} = 0.955 * 0.925 = 88.34\%$$

3.3.1.6. Densidad de siembra

Condori (2016), en la evaluación de distintas densidades de siembra de cebada obtuvo mejores resultados en los tratamientos que se aplicaron densidad de siembra de 5 kg/m² y por otra parte determino que la aplicación de distintos niveles de lixiviado de vermicompost no muestra diferencias en la producción de FVH de cebada. Considerando las dimensiones de la bandeja casera de bidón se determinó 379.5 g por unidad experimental.

Shit (2019), sugiere una densidad de siembra óptima para cebada, (así como trigo y sorgo) de 4 – 6 kg/m², tomando en cuenta un promedio de 5 kg/m² de referencia para esta presente investigación.

3.3.1.7. Remojado de semilla

Se hizo un lavado previo con agua e hipoclorito de sodio al 10% y se lo introdujo en un recipiente de 10 l con agua una vez enjuagada, se lo dejo por un periodo de 12 horas, posterior a ese lapso de tiempo se dispersó la semilla para que pueda oxigenarse por 1 hora y luego se puso nuevamente a remojar en agua por 12 horas nuevamente (Nina, 2017).

3.3.1.8. Siembra

Una vez realizada las tareas anteriores y teniendo la semilla desinfectada y ya remojada, así mismo los recipientes lavados y desinfectados se procedió a la siembra en las bandejas caseras, identificándolas por tratamiento y numero de repetición, considerando el porcentaje de pureza y de germinado se incrementó 50.5 g, siendo un total de 429.62 g (430 g) por unidad experimental para posteriormente finalizar estableciéndolo en un ambiente oscuro con el fin de garantizar la germinación.

3.3.1.9. Iluminación

Previamente se determinó las horas luz por el método empírico de observación de la salida y puesta del sol, posteriormente se aplicó la misma cantidad de horas de iluminación con luz LED al ensayo, iluminación controlada que se aplicó al cultivo al 4to día, presenciando

el coleóptilo y teniendo ya casi en su totalidad germinadas las semillas recibiendo 11 hrs de iluminación artificial.

3.3.1.10. Riego

La aplicación del riego se realizó diariamente con la ayuda de un sistema de riego con nebulizadores. Para poder estimar la cantidad de riego a aplicar se hizo el cálculo de evapotranspiración, determinando un riego de: 1.23 l/m²/día en la fase de germinación, 1.5 l/m²/día en emergencia inicial, 1.84 l/m²/día en desarrollo, 2.5 l/m²/día en máximo crecimiento y 1.2 l/m²/día último día antes de la cosecha. Se estimó tomando en cuenta el ETo de la región para el cálculo del respectivo lamina de riego según su fase fenológica.

Cuadro 2. Litros de agua para 16 bandejas

Día(s)	FASE	Riego (l/m ² /día)	Área/Trat (m ²)	L/16 bandejas
0 - 4	Germinación	1,23	1,2144	1,49
4 - 7	Emergencia inicial	1,84	1,2144	2,23
7 - 12	Desarrollo	2,5	1,2144	3,04
13 - 15	Final	1,2	1,2144	1,46
TOTAL (l)				8,22

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.11. Cosecha

La cosecha se realizó a los 15 días cuando la plántula obtuvo una altura promedio de 15 a 20 cm, con precaución, identificando los tratamientos se procedió a retirar el FVH para la toma de datos posteriores.

3.3.2. Diseño experimental

La presente investigación fue conducida bajo un Diseño de Bloques completos al Azar (DBCA) con 4 tratamientos y 4 repeticiones, haciendo un total de 16 unidades experimentales distribuidos en 4 bloques Ochoa (2009), por lo que el modelo lineal aditivo es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + \alpha_i + \epsilon_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ij} = Una observación cualquiera de la variable de respuesta.

μ = Media poblacional.

β_j = Efecto del j-ésimo bloque.

α_i = Efecto de la i-ésimo variedad de espectro de luz LED.

ε_{ijk} = Error experimental.

3.3.3. Tratamientos de estudio

Como tratamientos se tuvo:

3.3.3.1. Formulación de tratamientos

T_1 = Luz visible diurno techo amarillo 570 – 590 nm.

T_2 = Luz LED blanca 365-450 nm.

T_3 = Luz LED azul 450-470 nm y rojo 650-670 nm.

T_4 = Luz LED magenta (roja 620-750nm, azul 450 - 495 nm).

3.3.4. Variables de respuesta

3.3.5. Peso de materia verde (PMV)

Esta variable se determinó en la fase de cosecha, pesando cada bandeja y registrando en el cuaderno de registro cada tratamiento, como indicamos anteriormente el tiempo es 15 días después de la siembra, el material que se utilizó para determinar esta variable fue la balanza analítica, y la unidad que se utilizó fue en gramos (Nina, 2017).

3.3.6. Rendimiento (RE)

En base a una relación de peso fresco de materia verde entre el área se determinó el rendimiento de cada unidad experimental, registrando en el libro de campo, la unidad a registrar fue kg/m².

3.3.7. Porcentaje de hoja fresca (%HJF)

Se realizó la pesa de una muestra por tratamiento, posteriormente se procedió a separar las hojas de las raíces y se pesaron ambos, obteniendo la relación de porcentaje de hoja fresca de cada unidad experimental

3.3.8. Porcentaje de raíz fresca (%RZF)

Se pesó las raíces que fueron separadas de las hojas y se procedió a determinar el porcentaje de raíz fresca con relación al total de la muestra de cada unidad experimental.

3.3.9. Altura de planta (AP)

La altura de planta se determinó en la cosecha cuando se estimó concluir con la investigación, a los 15 días después de la siembra, con la ayuda de la regla se midió la longitud desde el cuello de la planta hasta el ápice de la hoja y se anotó en el cuaderno de registro, se repitió este ejercicio en diez plantas seleccionadas al azar. Las unidades que se utilizaron para esta variable fueron los centímetros (Nina, 2017).

3.3.10. Longitud de raíz (LR)

La longitud de raíz se determinó seguidamente luego de determinar la altura de planta también en la cosecha, con la ayuda de la regla se midió la longitud desde el cuello de la planta hasta el extremo de la raíz, se anotó en el cuaderno de registro, como en la variable anterior se repitió en diez plantas seleccionadas al azar. Las unidades que se utilizaron para esta variable fueron los centímetros (Nina, 2017).

3.3.11. Peso de materia seca (PMS)

Para el peso de materia seca se determinó pesando un aproximado de 100 g de FVH y se introdujo en bolsas de papel madera y se introdujo al horno secador por 24 horas a una temperatura de 105 °C, para posteriormente pesarlo nuevamente y registrarlo en nuestra libreta de registro. Este paso se desarrolló para cada tratamiento (Nina, 2017).

3.3.12. Porcentaje de hoja seca (%HJS)

Una vez extraído las muestras del horno, se pesó la muestra total y se procedió posteriormente a separar las hojas de las raíces, con lo cual se determinó el porcentaje de

hoja seca, este procedimiento se realizó por cada unidad experimental para luego registrarlo en libro de campo.

3.3.13. Porcentaje de raíz seca (%RZS)

De la misma manera se pesó la raíz separada de las hojas y con el peso total que se tenía ya registrado se determinó el porcentaje de raíz seca de cada tratamiento teniendo 16 datos que se registraron en el libro de campo.

3.3.14. Porcentaje de humedad (%HMDA)

Se tomó una muestra representativa del forraje verde hidropónico, se pesó en estado fresco (materia verde) y luego se secó en una estufa a 65 °C por 48 horas, se vuelve a pesar (materia seca) y esa diferencia nos determina el porcentaje de humedad.

3.3.15. Porcentaje de humedad total (%HMDA TTL)

Se empleó el método gravimétrico, utilizando el peso total de la biomasa fresca y el peso total de la biomasa seca.

Al finalizar el ciclo de producción, se cosechó todo el FVH de cada bandeja o unidad experimental, se registró el peso total en estado fresco (materia verde total) utilizando una balanza digital con precisión y posteriormente, se tomó una muestra representativa del forraje cosechado. Se secó en una estufa a 65°C por 48 horas y se calculó.

3.3.16. Proteína (PTN)

Esta variable fue obtenida mediante análisis químico en laboratorio INLASA, una vez fue cosechada se apartó una muestra de 250 g de FVH de cebada para determinar el parámetro de porcentaje de proteína.

B	TRATAMIENTO	%PTN (gr/100g)
I	T1 (natural diurna)	1,89
II	T2 (LED blanca)	1,62
III	T3 (LED roja + azul)	1,68
IV	T4 (Magenta)	2,04

3.3.17. Análisis económico

Los costos variables parciales son los costos relacionados con los insumos comprados, mano de obra que varían de un tratamiento a otro (Casas, 2022).

$$CVp = \text{precio de insumos} + \text{mano de obra}$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Temperatura de máximas y mínimas

En la Figura 2, se observa el comportamiento de la temperatura durante el tiempo de la presente investigación, en el cual se evidencia las temperaturas promedio de máximas y mínimas, donde se registra que la temperatura mínima presenta un valor de $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la temperatura máxima alcanzada fue de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el promedio $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

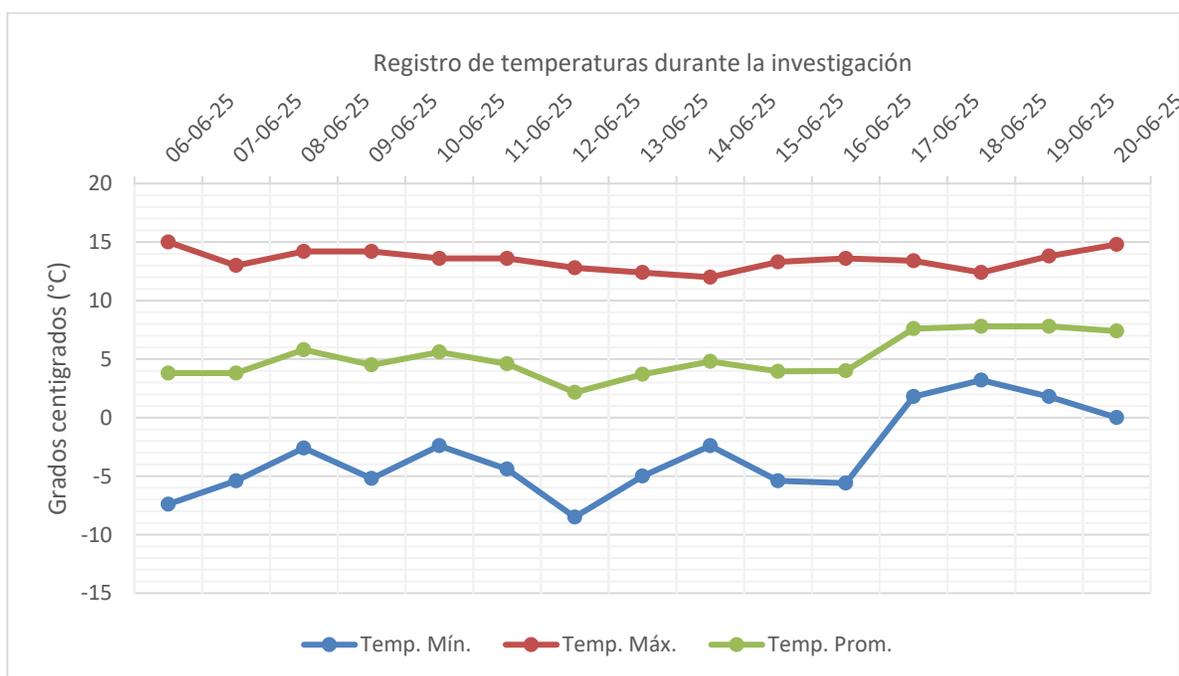


Figura 2. Temperaturas máximas y mínimas registradas

La presente investigación alcanzó y estuvo próximas a las temperaturas máximas recomendadas, pero por otro lado teniendo temperaturas bajas de hasta $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lo cual, pese a equilibrarse con una temperatura media de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, demostró que tuvo temperaturas bajas que podrían afectar en las fases de crecimiento.

Cómo señala Duran (2009), la temperatura influye en los procesos de desarrollo de la planta. Las temperaturas extremas afectan el rango de adaptación y la distribución de las especies. El rango es distinto para cada especie se considera entre $15 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lo más constante posible, un exceso puede causar estrés u presencia de hongos y una temperatura baja retarda el crecimiento.

Según la FAO (2001), manifiesta que la temperatura óptima para la producción de FVH está entre los 18 °C de temperatura máxima y una mínima de 5 °C.

4.2. Peso de materia verde (g)

Cuadro 3. Estadísticos del peso de materia verde

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
1723,75	2000	1965	1962,5	0,8	0,66	5,54

En el Cuadro 3, ANOVA del peso de materia verde de FVH de cebada mostrando un coeficiente de variación de 5.54% que señala la confianza de los datos.

El Cuadro 4 de análisis de varianza del peso de materia verde nos muestra que el diseño es altamente significativo, indicando que tanto el efecto de los tratamientos de luz LED y los bloques explican la varianza del peso de materia verde, por otra parte, nos muestra que la varianza del efecto de luz LED fue significativo con un $p < 0.05$ lo que indica que el tipo de espectro de luz LED afecta en la producción de biomasa, el efecto de bloques también tiene un valor de $p < 0.05$ lo que puede sugerir que el ambiente, temperaturas u otros factores influyeron en el peso de materia verde.

Cuadro 4. ANVA de peso de materia verde

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	194154,69	3	64718,23	5,76	0,0176
BLQ	201429,69	3	67143,23	5,98	0,0159
Error	101064,06	9	11229,34		
Total	496648,44	15			

$p < 0,05$

En la Figura 3, prueba de Duncan nos indica que los tratamientos T2 (luz LED blanca), T3 (luz LED rojo + azul) y T4 (luz LED magenta) tienen una media significativamente superior con respecto al T1 (luz natural diurna) quien fue el que presentó menor peso de materia verde. Esto nos indica que los espectros de luz LED, incrementan significativamente la producción de peso de materia verde a comparación del T1 (luz natural diurna) que fue expuesta a la luz natural de calamina amarilla. Las medias nos indican que no existe diferencia significativa entre T2, T3 y T4 con un peso de materia verde de: 2000 g, 1965 g y 1962.5 g respectivamente, sin embargo, el T1 muestra diferencia significativa con un peso

menor de materia verde de 1723.75 g, confirmando que existen diferencias significativas en la producción de FVH de cebada bajo el efecto de iluminación artificial de diferentes espectros de luz LED a diferencia de iluminación natural diurna.

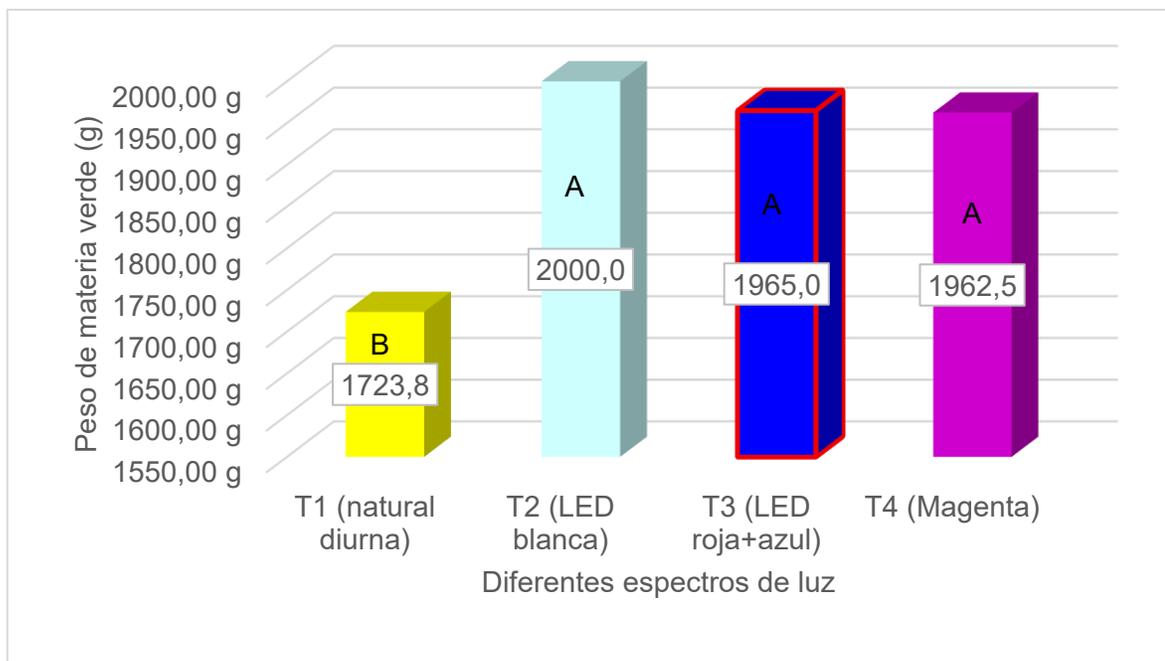


Figura 3. Duncan de peso de materia verde

4.3. Rendimiento (kg/m²)

Cuadro 5. ANOVA de rendimiento

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
22,71	26,35	25,89	25,86	0,8	0,66	5,54

En el Cuadro 5, de ANOVA de rendimiento se observa que el coeficiente de variación nos muestra un valor de 5.54% el cual refleja confianza en los datos.

Cuadro 6. ANVA de rendimiento

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	33,05	3	11,02	5,62	0,0189
BLQ	35,31	3	11,77	6	0,0157
Error	17,65	9	1,96		
Total	86,01	15			

* p<0,05

El Cuadro 6 de análisis de varianza de rendimiento, nos señala que el rendimiento de FVH de cebada bajo el efecto de iluminación artificial con luz LED de diferentes espectros, es significativo teniendo un valor de $p < 0.05$.

(Perez, 2017) destaca un rendimiento de 2.4 kg/ha con la aplicación en riego de 100% agua, siendo menores a los resultados obtenidos aplicando el efecto de iluminación led con rendimiento de 2.64 kg/ha, marcando una diferencia significativa.

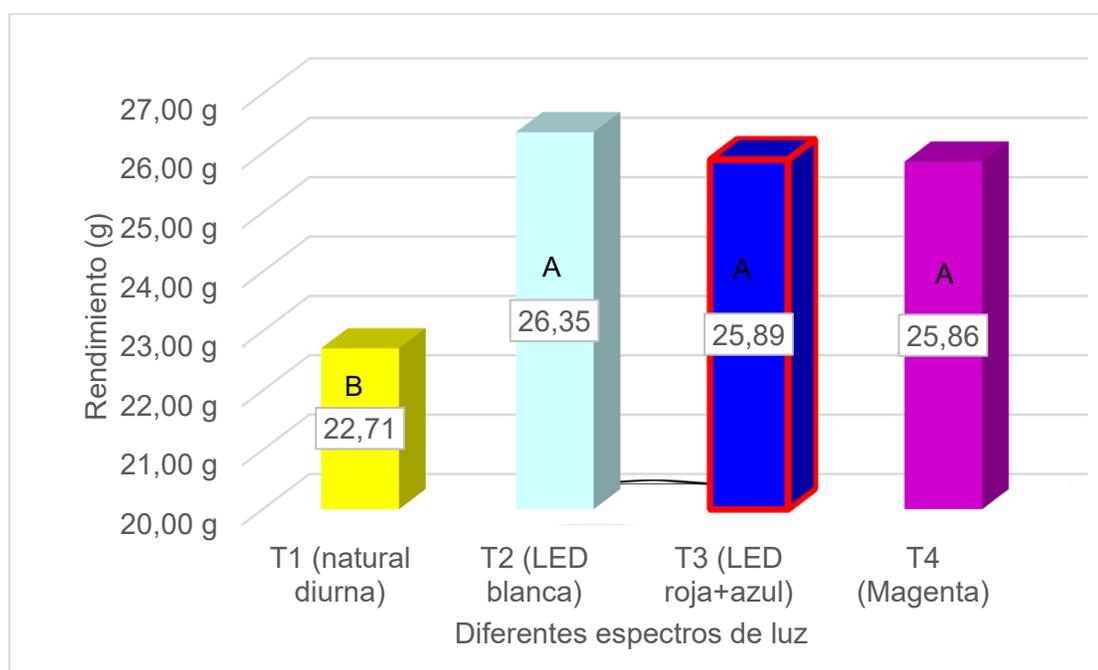


Figura 4. Duncan de rendimiento

En La Figura 4, de la comparación de Duncan podemos observar que existen diferencias significativas entre los tratamientos que fueron aplicados bajo el efecto de iluminación artificial con luz LED, mostrando una diferencia de rendimiento superior a T1 (luz natural quien tuvo un rendimiento de 22.71 kg/m², a diferencia de los tratamientos T2, T3 Y T4 obteniendo rendimientos de 26.35 kg/m², 25.89 kg/m² y 25.86 kg/m², respectivamente.

4.4. Porcentaje de hoja fresca (%)

Cuadro 7. ANOVA de porcentaje de hoja fresca

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
34,41%	31,85%	37,42%	34,45%	0,51	0,19	23,23

En el Cuadro 7, de ANOVA de porcentaje de hoja fresca, nos señala un coeficiente de variación de 23.23%, estando aun dentro del rango de aceptabilidad en la confianza de datos.

Cuadro 8. ANVA de porcentaje de hoja fresca

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	62,31	3	20,77	0,32	0,809
BLQ	547,74	3	182,58	2,84	0,0983
Error	579,26	9	64,36		
Total	1189,32	15			

* p<0,05

En el Cuadro 8, el análisis de varianza del porcentaje de hoja fresca nos muestra que el efecto de iluminación con diferentes espectros T1 (luz natural diurna de 570 – 600 nm), T2 (luz LED blanca de 500 – 700 nm), T3 (luces LED rojo 700 nm + azul 470 nm) y el T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm), no son significativos en el desarrollo de porcentaje de hoja fresca, en la producción de forraje verde hidropónico de cebada.

4.5. Porcentaje de raíz fresca (%)

Cuadro 9. ANOVA de porcentaje de raíz fresca

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
65,59%	68,15%	62,58%	65,55%	0,51	0,19	12,25

En el Cuadro 9, ANOVA de porcentaje de raíz fresca nos muestra un coeficiente de variación de 12.25% el cual nos da aceptabilidad y confianza en los datos.

Cuadro 10. ANVA de porcentaje de raíz fresca

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	610,05	6	101,68	1,58	0,2578
Luz LED	62,31	3	20,77	0,32	0,809
BLQ	547,74	3	182,58	2,84	0,0983
Error	579,26	9	64,36		
Total	1189,32	15			

* p<0,05

En el Cuadro 10, nos señala que el efecto de luz LED tiene un valor de p mayor a 0.05 siendo no significativo, lo cual indica que el efecto de iluminación con diferentes espectros T1 (luz natural diurna de 570 – 600 nm), T2 (luz LED blanca de 500 – 700 nm), T3 (luces LED rojo 700 nm + azul 470 nm) y el T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm), no son significativos en el desarrollo del porcentaje de raíz en la producción de forraje verde hidropónico de cebada.

4.6. Altura de planta (cm)

Cuadro 11. ANOVA de altura de planta

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
10,28	10,77	10,99	11,34	0,63	0,39	13,91

En el Cuadro 11, podemos observar un coeficiente de variación de 13.91% lo cual nos refleja que los datos son confiables y se encuentran de los rangos de aceptabilidad.

Cuadro 12. ANVA de altura de planta

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	2,39	3	0,8	0,35	0,79
BLQ	33,17	3	11,06	4,86	0,0281
Error	20,47	9	2,27		
Total	56,04	15			

* p<0,05

El análisis de varianza del Cuadro 12, un valor de p > a 0.05 en el efecto de luz LED lo cual nos indica que el efecto de iluminación con diferentes espectros T1 (luz natural diurna de 570 – 600 nm), T2 (luz LED blanca de 500 – 700 nm), T3 (luces LED rojo 700 nm + azul 470 nm) y el T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm), nos son significativos en el desarrollo de la altura de planta en la producción de forraje de cebada bajo un sistema hidropónico, teniendo medias de T1 = 10.28 cm, T2 = 10.77 cm, T3 = 10.99 cm y T4 = 11.34 cm.

4.7. Longitud de raíz (cm)

Cuadro 13. ANOVA de longitud de raíz

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
8,62	10,18	9,44	7,31	0,53	0,22	18,08

En el Cuadro 13, ANOVA de longitud de raíz nos muestra un coeficiente de variación de 18.08% el cual se encuentra dentro del rango de aceptabilidad y refleja la confianza de los datos.

Cuadro 14. ANVA de longitud de raíz

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	18,16	3	6,05	2,35	0,141
BLQ	8,01	3	2,67	1,03	0,4227
Error	23,23	9	2,58		
Total	49,41	15			

* $p < 0,05$

En el Cuadro 14 de análisis de varianza de la longitud de raíz, nos muestra que el efecto de luz LED nos muestra un valor de $p > 0,05$ indicando que no es significativo, concluyendo que el efecto de iluminación con diferentes espectros T1 (luz natural diurna de 570 – 600 nm), T2 (luz LED blanca de 500 – 700 nm), T3 (luces LED rojo 700 nm + azul 470 nm) y el T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm), nos son significativos en el desarrollo de longitud de raíz en el producción de forraje verde hidropónico, teniendo medias de: T1 = 8.62 cm, T2 = 10.18 cm, T3 = 9.44 cm y T4 = 7.31 cm.

4.8. Porcentaje de materia seca (%)

Cuadro 15. ANOVA de porcentaje de materia seca

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
15,18%	14,34%	12,28%	13,79%	0,68	0,47	11,77

En el Cuadro 15, ANOVA de porcentaje de materia seca nos muestra un valor de coeficiente de variación de 11.77% el cual nos refleja que los datos son confiables.

Cuadro 16. ANVA de porcentaje de materia seca

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	17,91	3	5,97	2,23	0,1539
BLQ	33,46	3	11,15	4,17	0,0416
Error	24,08	9	2,68		
Total	75,46	15			

* $p < 0,05$

En el Cuadro 16, de análisis de varianza de materia seca, nos muestra que el efecto de luz LED no es significativo en el porcentaje de materia de forraje verde hidropónico de cebada,

teniendo un valor de $p > 0.05$, lo cual nos indica que el efecto de iluminación con diferentes espectros T1 (luz natural diurna de 570 – 600 nm), T2 (luz LED blanca de 500 – 700 nm), T3 (luces LED rojo 700 nm + azul 470 nm) y el T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm), nos son significativos en el porcentaje de materia seca en la producción de forraje verde hidropónico, con medias de: T1 = 15.18% de MS, T2 = 14.34% de MS, T3 = 12.28% de MS y T4 = 13.79% de MS.

4.9. Porcentaje de hoja seca (%)

Cuadro 17. Porcentaje de hoja seca

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
19,73%	16,74%	17,31%	14,68%	0,56	0,27	22,71

En el Cuadro 17, nos muestra que el coeficiente de variación es de 22.71% estando dentro de los rangos de aceptabilidad y de confianza en los datos.

Cuadro 18. ANVA, de porcentaje de hoja seca

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	51,82	3	17,27	1,14	0,3833
BLQ	122,35	3	40,78	2,7	0,1086
Error	136,03	9	15,11		
Total	310,2	15			

* $p < 0,05$

En el Cuadro 18, de análisis de varianza del porcentaje de hoja seca, nos muestra un valor de $p > 0.05$ siendo no significativo en el porcentaje de hoja seca, lo cual nos señala que el efecto de iluminación con diferentes espectros T1 (luz natural diurna de 570 – 600 nm), T2 (luz LED blanca de 500 – 700 nm), T3 (luces LED rojo 700 nm + azul 470 nm) y el T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm), nos son significativos en el porcentaje de hoja seca en forraje verde hidropónico de cebada.

4.10. Porcentaje de raíz seca (%)

Cuadro 19. ANOVA de porcentaje de raíz seca

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
79,51%	83,35%	64,71%	85,07%	0,32	0	23,79

En el Cuadro 19, de ANOVA de porcentaje de raíz seca nos muestra un coeficiente de variación de 23.79% el cual se encuentra dentro de los rangos de aceptabilidad y de confianza en los datos.

Cuadro 20. ANVA de porcentaje de raíz seca

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	1029,6	3	343,2	0,99	0,4391
BLQ	424,2	3	141,4	0,41	0,7504
Error	3110,66	9	345,63		
Total	4564,46	15			

* p<0,05

En el Cuadro 20 de análisis de varianza del porcentaje de raíz seca, nos muestra un valor de $p > 0.05$ siendo no significativo el efecto de luz LED, lo que nos indica que el efecto de iluminación con diferentes espectros T1 (luz natural diurna de 570 – 600 nm), T2 (luz LED blanca de 500 – 700 nm), T3 (luzes LED rojo 700 nm + azul 470 nm) y el T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm), no son significativos en el porcentaje de raíz seca en forraje verde hidropónico de cebada.

4.11. Porcentaje de humedad (%)

Cuadro 21. ANOVA de porcentaje de humedad

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
89,75%	95,52%	94,58%	94,24%	0,4	0	6,03

En el Cuadro 21, ANOVA de porcentaje de humedad nos muestra que el valor de coeficiente de variación es de 6.03% lo cual nos brinda y refleja alta confianza en los datos.

Cuadro 22. ANVA de porcentaje de humedad

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	79,35	3	26,45	0,83	0,509
BLQ	109,63	3	36,54	1,15	0,3807
Error	285,95	9	31,77		
Total	474,94	15			

* p<0,05

En el Cuadro 22 del análisis de varianza del porcentaje de humedad de FVH de cebada nos muestra un valor de $p > 0.05$ indicando que el efecto de iluminación con diferentes

espectros T1 (luz natural diurna de 570 – 600 nm), T2 (luz LED blanca de 500 – 700 nm), T3 (luces LED rojo 700 nm + azul 470 nm) y el T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm), no es significativo en el porcentaje de humedad en producción de forraje verde hidropónico de cebada.

4.12. Porcentaje de humedad total (%)

Cuadro 23. ANOVA de porcentaje de humedad total

T1	T2	T3	T4	R ²	R ² Aj	CV
89,75%	95,52%	94,58%	94,24%	0,4	0	6,03

En el Cuadro 23, de ANOVA de porcentaje de humedad total, nos muestra un coeficiente de variación de 1.9% lo cual nos refleja alta confianza en los datos de humedad total.

Cuadro 24. ANVA de porcentaje de humedad total

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Luz LED	79,35	3	26,45	0,83	0,509
BLQ	109,63	3	36,54	1,15	0,3807
Error	285,95	9	31,77		
Total	474,94	15			

* p<0,05

En el Cuadro 24 del análisis de varianza al determinar el porcentaje de humedad total nos muestra que el efecto de iluminación con diferentes espectros T1 (luz natural diurna de 570 – 600 nm), T2 (luz LED blanca de 500 – 700 nm), T3 (luces LED rojo 700 nm + azul 470 nm) y el T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm), no son significativo en el porcentaje de humedad total en forraje verde hidropónico de cebada, teniendo un p > 0.05.

4.13. Proteína (gr/100gr)

En la Figura 5, los resultados de Instituto Nacional de Laboratorios de Salud (INLASA) nos muestran que existe una variación proteica en los diferentes tratamientos bajo el efecto de iluminación de diferente espectros de luz en la producción de forraje verde hidropónico de cebada, indica que el T1 (Luz diurna 570 – 600 nm) quien fue expuesta a luz natural diurna obtuvo 1.89 g de proteína que se encuentra dentro de los rangos conocidos siendo 1.9 g el parámetro general en investigaciones como el de (Parsons, 1999), por otra parte el T2 (luz

LED blanca 500 – 700 nm) y T3 (luces LED azul 470 nm + roja 700 nm) nos muestran una reducción en el nivel proteico con 1.62 g y 1.68 g respectivamente, siendo significativamente inferior entre los tratamientos a comparación de la T4 (luz LED magenta rojo 650 – 750 nm + azul 380 – 500 nm) quien presenta un incremento de proteína con 2.04 g de proteína por cada 100 g de FVH de cebada siendo este significativamente superior a los cuatro tratamientos.

El contenido de proteína obtenido en esta investigación (2.04 g por bandeja) supera ligeramente al valor reportado por (Carballido, 2007), quien obtuvo 1.9 g en condiciones similares sin uso de fertilizantes. Esto demuestra que el sistema de producción utilizado en este experimento fue eficiente, logrando mejorar el valor nutricional del FVH de cebada aún sin aplicación de nutrientes en el riego.

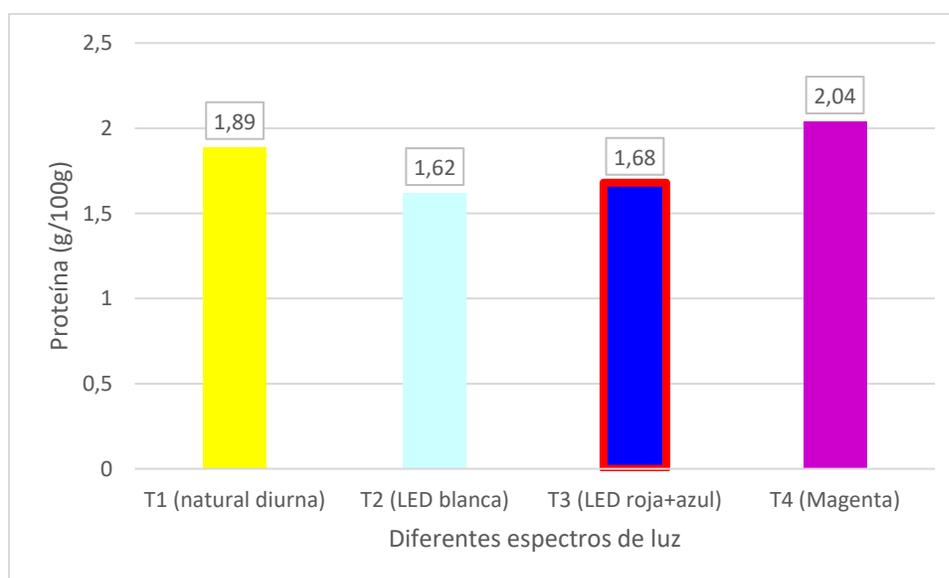


Figura 5. Proteína de FVH de cebada

4.14. Variables económicas

Los costos de producción del presente estudio se basan en la determinación del valor de costos variables desarrollados por Casas (2022), se detalla a continuación:

Cuadro 25. B/C 16 bandejas bajo el mismo tratamiento

Variable	Unidad	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Rendimiento	kg/m ²	27,62	32	31,44	31,4
Precio oportunidad	Bs/kg	7,00	7,00	7,00	7,00
Costo fijo (prorratedo)	Bs	63,75	74,25	74,25	74,25
Costo variable	Bs.	43,72	56,02	56,02	56,02
Beneficio bruto	Bs.	193,34	224,00	220,08	219,80
Beneficio neto	Bs.	85,87	93,73	89,81	89,53
Beneficio/costo	Bs/Bs	1,80	1,72	1,69	1,69

Fuente: Elaboración propia

El Cuadro 25, nos muestra que los costos fijos debido al elevado precio en la implementación de este, se consideró un prorratedo de T1 (luz natural diurna) y T2, T3 y T4 (luzes LED) en 24 ciclos de producción (1 año, 2/mes), teniendo un valor de costo fijo de 63.75 Bs para T1 (luz natural diurna) y T2, T3 y T4 (luzes LED) con un valor de 74.25 Bs mismo que al completar un año sea retribuido la inversión realizada en la implementación de los materiales reutilizables y que requieren un trabajo de mantenimiento simple, a comparación de los costos variables que consta del material biológico (semilla que podría tener una variación del 10% en el mercado), recurso hídrico que según (AAPS, 2009) (las tarifas oscilan entre 1.78 Bs/m³ a 12.21 Bs/m³ según la cantidad de agua en m³ usados) y el recurso energético (podría variar de un mínimo de 13.73 Bs/15 kWh a una cotización de 1.48 Bs/kWh con consumos superiores a 1000 kWh).

En el beneficio neto de los tratamientos se puede mencionar al tratamiento T2 (luz LED blanca) con el valor más alto de 93.7 Bs, por otra parte, se muestra al tratamiento T1 (luz natural diurna) con un valor de 85.9 Bs siendo el menor entre los tratamientos.

En la variable de beneficio costo se indica que el tratamiento que mejor se comportaría es el tratamiento T1 con 1.80, el cual indica que por cada unidad de boliviano invertido se logra tener un beneficio de 0.80 Bs.

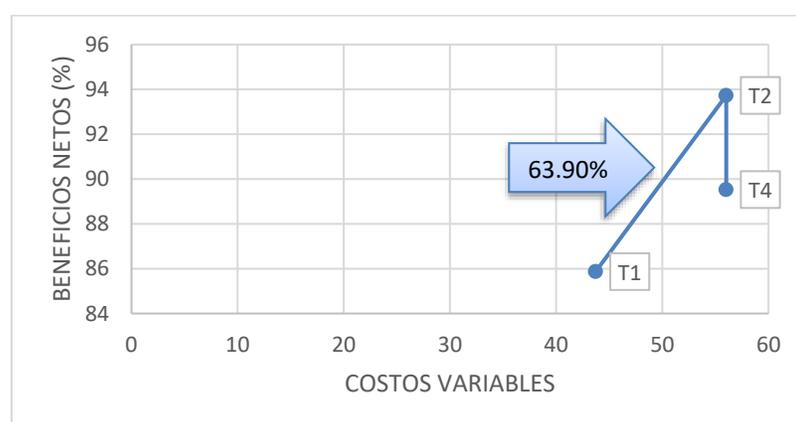
Cuadro 26. Análisis de la de retorno marginal

TRATAMIENTO	COSTOS		COSTOS		BENEFICIOS		BENEFICIOS		T.R.M. (%)
	FIJOS		MARGINALES		NETOS		MARGINALES		
T2 luz LED blanca	Bs	56,02	Bs	12,30	Bs	93,73	Bs	7,86	63,90%
T1 luz diurna natural	Bs	43,72	Bs	-	Bs	85,87		-	

Solo las TRM marcadas con (*) sobrepasan TRM mínima estimada en 0

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 26 se observa el análisis de la tasa de retorno marginal, en el cual se aprecia el valor de la TRM, que se incrementa de T1 a T4 con 63.90%.

**Figura 6. Relación entre costos variables y beneficios brutos**

La Figura 6, muestra el comportamiento de los tratamientos en relación a los costos variables y beneficio bruto, en el cual se aprecia variabilidad en los valores, podemos mencionar que del T1 al T2 se evidencia un incremento de 63.90%, por lo cual mencionamos que es con el tratamiento que se obtiene mejores resultados ya que los otros tratamientos no se logra mismo incremento.

Cuadro 27. Análisis de dominancia

TRATAMIENTOS	Costo Total	Beneficios netos	
T1	107,47	85,87	*
T2	130,27	93,73	*
T3	130,27	89,81	D
T4	130,27	89,53	D

5. CONCLUSIONES

De los objetivos planteados y los resultados obtenidos en el presente estudio, se permite sustentar las siguientes conclusiones:

- En cuanto al comportamiento agronómico relacionado con la altura de planta, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($p = 0.7986$). Esto indica que los diferentes espectros de iluminación aplicados no influyeron de manera considerable en esta variable. Los valores oscilaron entre 14.23 cm (T4 – luz magenta) y 14.67 cm (T1 – luz natural), sin evidenciarse diferencias significativas según el análisis estadístico.
- En la variable longitud de raíz, tampoco se hallaron diferencias significativas ($p = 0.1411$), sin embargo, se identificó una tendencia creciente en los tratamientos con iluminación artificial. El tratamiento T4 (luz magenta) alcanzó la mayor longitud promedio de raíz con 13.95 cm, mientras que el T1 (luz natural) presentó la menor con 11.97 cm, lo que sugiere un posible efecto favorable de la luz magenta, aunque no se demostró estadísticamente.
- Para el peso de materia verde (PMV), se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.0176$; CV = 5.54%). El tratamiento T2 (luz LED blanca) fue el que registró el mayor peso (2000 g), seguido por T3 (1965 g) y T4 (1962.5 g), los cuales fueron estadísticamente superiores al tratamiento T1 (1723.75 g) según la prueba de Duncan. Esto permite concluir que la iluminación artificial, especialmente con luz LED blanca, tiene un impacto positivo en el rendimiento del FVH de cebada.
- Respecto al peso de materia seca, si bien no se encontraron diferencias significativas ($p = 0.1539$), se observó una tendencia en la que el tratamiento T1 (luz natural) alcanzó el mayor porcentaje de materia seca (15.18%), lo que podría indicar que la luz natural favorece una mayor concentración de biomasa seca, aunque esta diferencia no fue estadísticamente relevante.
- El análisis del porcentaje de humedad total no arrojó diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.5090$), con valores relativamente homogéneos: T1 (84.82%), T2 (85.65%), T3 (87.71%) y T4 (86.21%). Esto sugiere que el contenido de agua del FVH no se ve afectado de manera significativa por el tipo de iluminación aplicada.

- El rendimiento por metro cuadrado fue mayor en los tratamientos con iluminación artificial, destacando T2 (luz LED blanca) con 26.35 kg/m² frente a T1 (luz natural) con 22.71 kg/m². Estos resultados refuerzan la conclusión de que el uso de luz artificial, específicamente LED blanca, mejora la producción total del FVH de cebada. El análisis estadístico respalda esta afirmación ($p = 0.0189$; CV = 5.54%).
- En el análisis de contenido proteico, los resultados de laboratorio (INLASA) evidenciaron que el tratamiento T4 (luz magenta) presentó el valor más alto (2.04 g/100 g de FVH), superando incluso al tratamiento control T1 (1.89 g), que se encuentra dentro del rango reportado por Parsons (1999). Los tratamientos T2 y T3 presentaron los valores más bajos (1.62 g y 1.68 g, respectivamente). Esto indica que el espectro de luz magenta puede promover un mayor contenido proteico en el FVH de cebada, lo cual puede ser relevante para fines nutricionales.
- En cuanto a los costos de producción, aunque T2 fue el tratamiento con mayor inversión (Bs. 130.27), también fue el que logró el mayor rendimiento. En cambio, T1 tuvo el menor costo (Bs. 107.47), pero con resultados productivos inferiores. Esto evidencia que, a pesar de la inversión adicional, el uso de luz LED blanca resulta más eficiente y rentable en términos productivos.
- El análisis de la tasa marginal de retorno (TMR) muestra que al pasar de T1 a T2 se obtiene una ganancia del 63.90%, siendo esta diferencia económicamente significativa. Los demás tratamientos no alcanzaron este nivel de rentabilidad, lo que permite concluir que T2 es la opción más adecuada desde un punto de vista económico y productivo.

6. RECOMENDACIONES

En base a los objetivos, resultados y conclusiones del presente trabajo, se pueden formular las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda firmemente el uso de iluminación artificial con luz LED blanca (Tratamiento T2) en sistemas de producción de forraje verde hidropónico, ya que fue el tratamiento que alcanzó el mayor peso de materia verde (2000 g por bandeja) y el más alto rendimiento por área (26.35 kg/m²). Esta alternativa superó significativamente al uso de luz natural diurna, demostrando una mayor eficiencia en ambientes controlados. Su adopción puede significar un salto en productividad para sistemas comerciales.
- Si bien no se observaron diferencias estadísticas significativas en el contenido de materia seca, el tratamiento con luz natural (T1) presentó el porcentaje más alto (15.18%). Por tanto, en sistemas donde el contenido de materia seca tenga un papel importante (por ejemplo, para mejorar la conservación o el aporte nutricional en raciones animales), la luz natural puede ser una alternativa económica y adecuada, especialmente en regiones con buena radiación solar.
- Aunque la implementación de luz LED blanca supone un mayor costo inicial (Bs. 130.27) en comparación con la luz natural, el análisis económico muestra que este tratamiento obtuvo la mejor tasa marginal de retorno (TMR) con un 63.90%, lo que indica una excelente recuperación de la inversión con alta rentabilidad. Se recomienda su adopción en sistemas de producción comercial bajo ambientes atemperados o controlados, donde se busque optimizar recursos y aumentar márgenes de ganancia.
- Se sugiere realizar estudios complementarios utilizando combinaciones de espectros de luz LED blanca y magenta, ya que el tratamiento con luz magenta (T4) mostró un incremento en el contenido proteico del FVH (2.04 g/100g), siendo el más alto entre todos los tratamientos. Explorar estas combinaciones podría abrir nuevas oportunidades para mejorar la calidad nutricional del forraje sin sacrificar rendimiento, convirtiéndose en un valor agregado para mercados exigentes o ganaderías de alto rendimiento.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AAPS. 2009. Estructura de tarifas. EPSAS S.A.
- Abad, M. 1994. El cultivo del tomate. F Nuez (ed.). Madrid, España,
- Albrechtová, J. S., L.; Čížková, V. 2017. Photomorphogenesis – Theoretical Background. BiCheZ. Place Published. Disponible en https://es.wikipedia.org/wiki/Fotomorfo%C3%A9nesis?utm_source=chatgpt.com 10.14712/25337556.2017.4.3
- Aquino, C. 2010. Producción, manejo y uso de forraje verde hidropónico para zonas de altura. 75.
- Carballido, J. 2007. Forraje verde hidropónico. Consultoría Forrajera Chile. Place Published. Disponible en <http://www.agroportal.cl/articulo88.htm>
- Casas, T. 2022. Efecto de la aplicación de concentraciones de lixiviado de vermicompost y densidades de siembra en el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) como forraje verde hidropónico en ambiente atemperado. Tesis Ing. Agr. El Alto, Bolivia. Universidad pública de El Alto. 79 p.
- Colque, T. 2005. Evaluación de variedades de cebada (*H. vulgare*) bajo épocas de siembra en la localidad de Janko Marca, Prov. Pacajes de La Paz. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. 65 p.
- Condori, C. 2016. Evaluación de biolixiviados del proceso de biocompostaje en sistema vertical de residuos sólidos urbanos y estiércol de bovino en el centro experimental de Kallutaca. Tesis Ing. Agr. El Alto, Bolivia. Universidad Pública de El Alto. 71 p.
- Corona, L. 2011. Producción de forraje verde en la Mixteca poblana una alternativa nutricional para la época de sequía. Place Published. Disponible en <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/forraje-verde-hidroponico-t28712.htm>
- Delgado, J. 2016. Producción de avena (*Avena sativa*) como forraje verde hidropónico con tres métodos de producción, en el distrito 8 de la Ciudad de El Alto. Tesis Ing. Agr. Universidad Mayor de San Andres Disponible en https://www.researchgate.net/publication/373986981_Produccion_de_avena_en_corte_e_hidroponica_sembrada_a_diferentes_dosis_y_tiempo_de_cosecha?utm_source=chatgpt.com
- Duran, F. 2009. Cultivo de pastos y forrajes: silvopastoriles – forraje verde hidropónico. Granja integral. 208.
- Espinal, J. 2021. Efecto de la iluminación LED en un sistema vertical de producción con lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo ambiente controlado. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia,. Universidad Mayor de San Andres. 76 p. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/26650/T-2930.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Fabián, L. 2017. Efecto de intensidad lumínica de diodos emisores de luz y del fotoperiodo en la producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays*) y utilización de agua. Tesis Ing. Agr. Trujillo, Peru,. Universidad Nacional de Trujillo 16 p. Disponible en <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/d212c762-e5e5-42e7-827e-7f107d217d82/content>
- FAO. 2001. Mejoramiento de la disponibilidad de alimentos en los centros de desarrollo infantil del INNFA. Santiago, Chile Disponible en <https://www.fao.org/4/ah472s/ah472s00.pdf>
- FAO. 2001. Manual técnico: Forraje verde hidropónico. (TCP/ECU/066). 68–350.
- Fuentes, F., Poblete, C., Huerta, M., & Palapé, I. 2011. Evaluación de la producción y calidad nutritiva de avena como forraje verde hidropónico en condiciones de desierto. IDESIA. Place Published, 75–81.
- GAM, L. 2023. Plan Territorial de Desarrollo Integral para Vivir Bien del Municipio de La Paz 2021–2025. Concejo Municipal / Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. Disponible en <https://pdfcoffee.com/ptdi-laja-pdf-4-pdf-free.html>
- Huiza, M. 2015. Evaluación de la producción de forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*) bajo tres niveles de abonamiento con té de humus de lombriz. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andres. 9 - 54 p.
- Ibarra, A. 2010. Hidroponía, Manual Técnico. 19.
- Izquierdo, J. 2002. Producción de forraje verde hidropónico (en línea). Santiago, Chile., Disponible en <https://www.fao.org/4/ah472s/ah472s00.htm>
- Johan, T. 1999. Cultivos Forrajeros. Trillas. (ed.). San José, Costa Rica.,
- Mendoza, M. 2009. Producción de cebada (*Hordeum vulgare* L.) bajo sistema hidropónico, en cuatro soluciones nutritivas. . Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andres. 61 p. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/4856>
- Navarrete, O. 2008. Estudio de la productividad de dos gramíneas (*Hordeum vulgare* y *Triticum aestivum*) y una leguminosa (*Vicia sp.*) para forraje verde hidropónico (FVH) con tres cortes sucesivos en la granja ECAA. Tesis Ing. Agr. Ibarra, Ecuador. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. 96 p. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/20661/T-2657.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Nina, E. 2017. Uso de diferentes métodos de producción bajo tres densidades de siembra en el cultivo verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en carpa solar. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andres. 39 – 49 p.
- Ochoa, R. 2009. Diseños experimentales. 1 ed. La Paz, Bolivia. ,

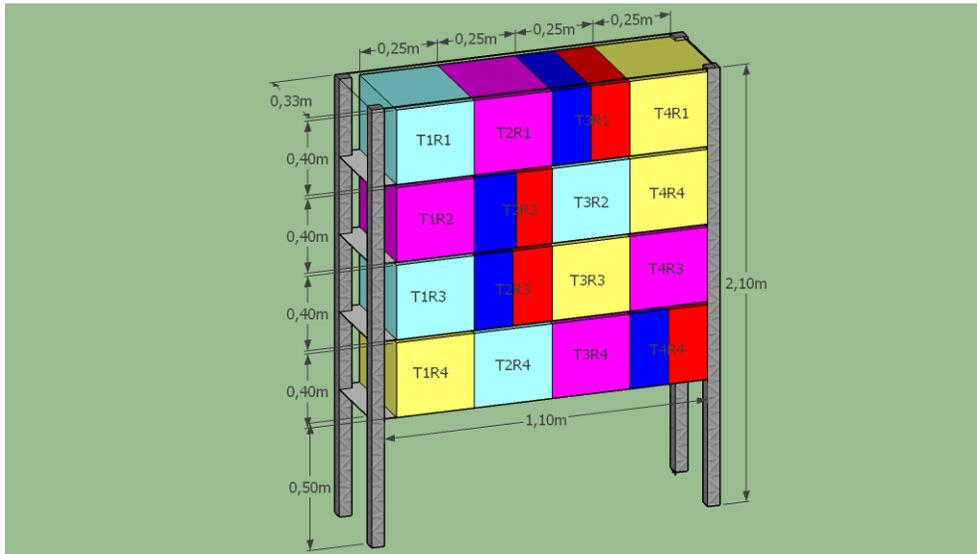
- Parsons, C. 1999. Trigo, Triticale, avena y cebada. E México (ed.).
- Perez, J. 2017. Evaluación de la aplicación de biolixiviados de residuos sólidos urbanos y estiércol de bovino en forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare*) en la Estación Experimental de Kallutaca. Tesis Ing. Agr. El Alto, Bolivia. Universidad Publica de El Alto. 53 p.
- Pérez, J. C., J. 2003. Fotosíntesis: Aspectos Básicos. REDUCA (ed.).
- Philips. 2020. Vertical farming | Philips lighting. Disponible en <https://www.usa.lighting.philips.com/application-areas/specialist-applications/horticulture/vertical-farming>
- Rivero, E. 2022. Efecto del color de la luz led en la producción de kale (*Brassica oleracea* L. var. acephala) en el Municipio de El Alto. Tesis Ing. Agr. La paz, Bolivia., Universidad Mayor de San Andres. 90 p. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/30152/T-3054.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, S. 2003. Hidroponía: una solución de producción en chihuahua, México. Boletín Informativo de la Red Hidroponía. 9 26.
- Roeber, V. 2022. The Photoperiod: Handling and Causing Stress in Plants. Frontiers in Plant Science. Place Published. Disponible en https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8821921/?utm_source=chatgpt.com <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.781988>
- Salveti, N. L., M.; Ricci, N.; Lorente, J.; Gapel, C.; Ortega, H. 2002. Influencia del fotoperíodo sobre la morfología gonadal del ratón (*Mus Musculus*): efecto de la falta de alternancia luz/oscuridad. *In*. 2002. s.l. p. 21 - 29.
- Samperio, R. 2007. Forraje Verde Hidropónico. 20. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/10527/T-2348.pdf?isAllowed=y&sequence=1&utm>
- Sánchez, C. 2005. Hidroponía (documento en línea). Lima, Perú. Disponible en https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/174/10/03%20AGP%2029%20CAPITULO%20X.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Santander, F. 2006. Forraje verde hidropónico 5p.
- Ticona, M. 2022. Comparación de diferentes frecuencias de iluminación con luz LED en el cultivo de menta (*Mentha piperita* L.) en el Municipio De La Paz. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andres. 99 p. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/31499/T-3108.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Trujillano, E. 2016. Evaluación agronómica en la producción de cuatro variedades de cebada (*Hordeum sp.*), por hidroponía en la Comunidad de Murmuntani, Municipio de Luribay, Provincia Loayza del departamento La Paz. Tesis Ing. Agr. Luribay, La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andres 63 p. Disponible en

<https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/6776/TS-2218.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Yang, J., Sun, J., Wang, X., & Zhang, B. 2024. Light Intensity Affects Growth and Nutrient Value of Hydroponic Barley Fodder. *Agronomy*. Place Published, (6): 14. Disponible en <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/6/1099>
<https://doi.org/10.3390/agronomy14061099>

8. ANEXOS

Anexo 1. Croquis de la investigación



Anexo 2. Elaboración de las bandejas caseras



Anexo 3. Acondicionamiento de ambiente atemperado.

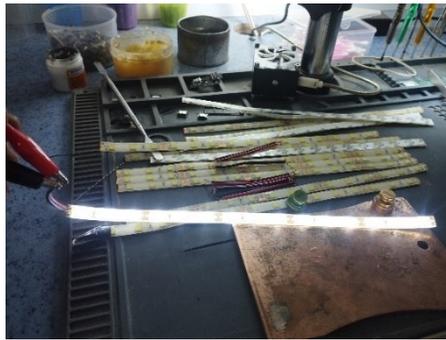
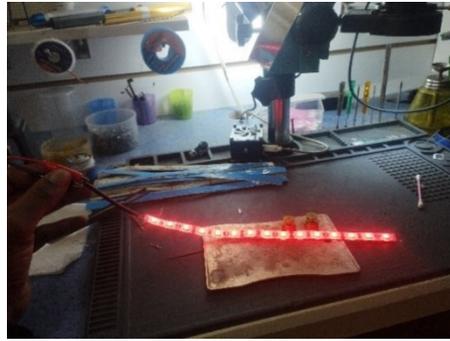


Anexo 4. Armado e instalación del sistema de riego

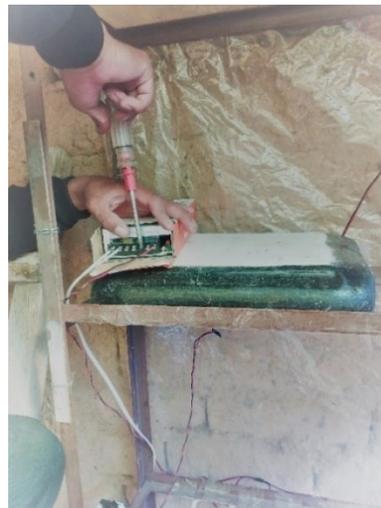
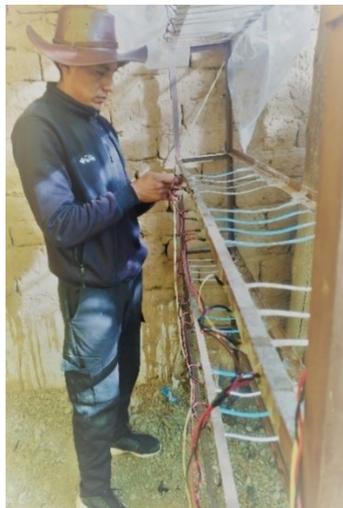


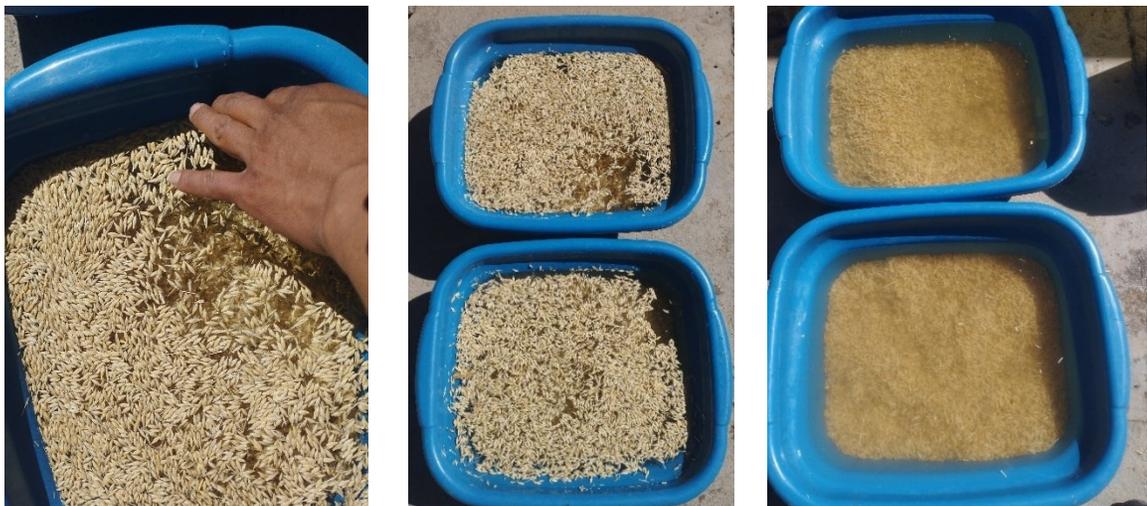
Anexo 5. Dimensionamiento y jumper de cintas de luz LED.





Anexo 6. Instalación del sistema de iluminación artificial.



Anexo 7. Prueba de germinación**Anexo 8. Selección de impurezas****Anexo 9. Lavado, desinfectado y remojo de semilla**



Anexo 10. Oxigenación de semilla



Anexo 11. Siembra en bandejas



Anexo 12. Ambiente oscuro**Anexo 13. Cálculo de riego****Anexo 14. Día 1 de desarrollo de FVH de cebada**

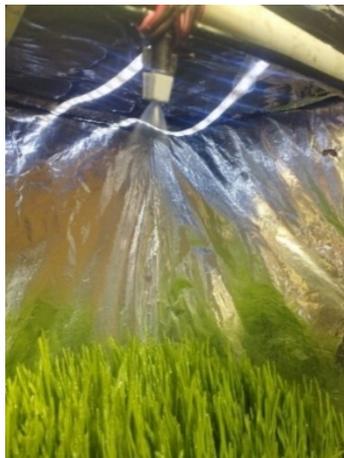
Anexo 15. Día 2-3 de desarrollo de FVH de cebada**Anexo 16. Día 4, Presencia de coleóptilo y aplicación de luz LED**

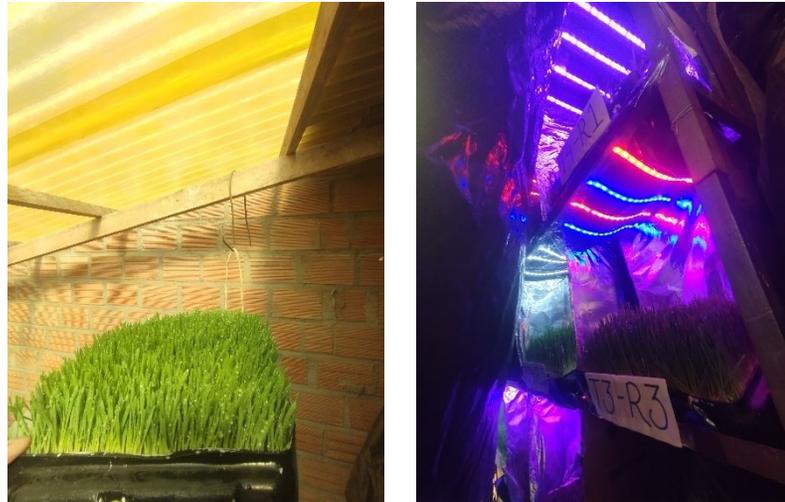
Anexo 17. Día 5 de desarrollo de FVH de cebada**Anexo 18. Día 6-7 de desarrollo de FVH de cebada****Anexo 19. Día 8 – 9 de desarrollo de FVH de cebada**

Anexo 20. Dia 10-11 de desarrollo de FVH de cebada

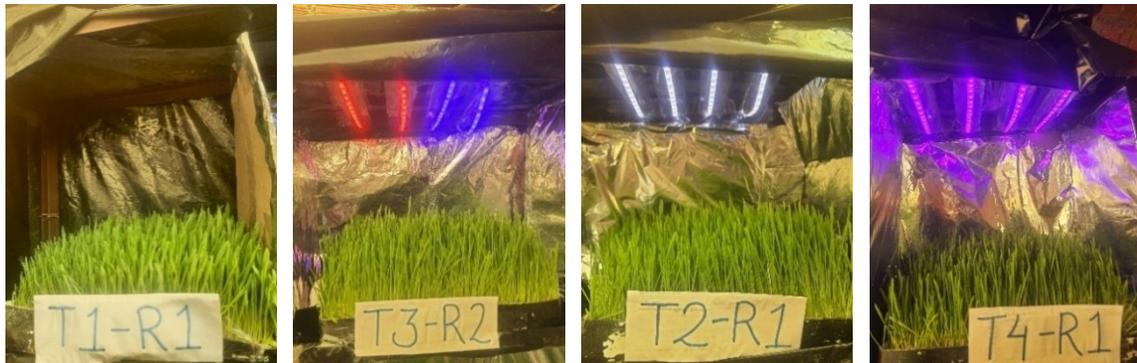


Anexo 21. Dia 12 – 13 de desarrollo de FVH de cebada





Anexo 22. Día 14 de desarrollo de FVH de cebada



Anexo 23. Día 15, final de ciclo de desarrollo de FVH de cebada



Anexo 24. Cosecha y pesaje de FVH.**Anexo 25. Retirado de bordura**

Anexo 26. Llevado de muestra al INLASA.**Anexo 27. Laboratorio, peso de materia seca**

Anexo 28. Porcentaje de hoja y raíz seca.



Anexo 29. Costos fijos y variables de producción para T2, T3 y T4

Costos fijos				
NRO	ITEM	CANTIDA	Precio (Bs)	Total (Bs)
1	Bomba de agua eléctrica	1	Bs380,00	Bs380,00
2	Estante metálico	1	Bs350,00	Bs350,00
3	Politubo PVC	1	Bs35,00	Bs35,00
4	Accesorios hidráulicos	1	Bs20,00	Bs20,00
5	Tarraja	1	Bs20,00	Bs20,00
6	Teflón	1	Bs5,00	Bs5,00
7	Kit nebulizador	1	Bs100,00	Bs100,00
8	Mano de obra riego y luz led	1	Bs150,00	Bs150,00
9	Luz led	16	Bs12,00	Bs192,00
10	Adaptador de voltaje	1	Bs60,00	Bs60,00
11	Temporizador	1	Bs110,00	Bs110,00
12	Cinta adhesiva	1	Bs6,00	Bs6,00
13	Bidones para bandejas caseras	8	Bs18,00	Bs144,00
14	Filtro	1	Bs120,00	Bs120,00
15	Válvula antirretorno	1	Bs30,00	Bs30,00
16	Bolsa negra	4	Bs8,00	Bs32,00
17	Bateas para lavado y remojado	2	Bs14,00	Bs28,00
Costos Variables		subtotal costos fijos		Bs1.782,00
1	Consumo de agua para riego	1	Bs8,22	Bs8,22
2	Consumo energético para luz led	1	Bs12,30	Bs12,30
3	Semilla de cebada	6,8	Bs5,22	Bs35,50
subtotal costos variables				Bs56,02
total				Bs1.838,02

Fuente: elaboración propia

Anexo 30. Costos fijos y variables de T1

Costos fijos				
NRO	ITEM	CANTIDAD	Precio (Bs)	Total (Bs)
1	Bomba de agua eléctrica	1	Bs 380,00	Bs 380,00
2	Estante metálico	1	Bs 350,00	Bs 350,00
3	Polituvos pvc	1	Bs 35,00	Bs 35,00
4	Accesorios hidráulicos	1	Bs 20,00	Bs 20,00
5	Taraja	1	Bs 20,00	Bs 20,00
6	Teflón	1	Bs 5,00	Bs 5,00
7	Kit nebulizador	1	Bs 100,00	Bs 100,00
8	Mano de obra riego y luz led	1	Bs 150,00	Bs 150,00
9	Temporizador	1	Bs 110,00	Bs 110,00
10	Cinta adhesiva	1	Bs 6,00	Bs 6,00
11	Bidones para bandejas caseras	8	Bs 18,00	Bs 144,00
12	Filtro	1	Bs 120,00	Bs 120,00
13	Válvula anti retorno	1	Bs 30,00	Bs 30,00
14	Bolsa negra	4	Bs 8,00	Bs 32,00
15	Bateas para lavado y remojado	2	Bs 14,00	Bs 28,00
Costos Variables		subtotal fijos		Bs 1.530,00
1	Consumo de agua para riego	1	Bs 8,22	Bs 8,22
2	Semilla de cebada	6,8	Bs 5,22	Bs 35,50
subtotal costos variables				Bs 43,72
total				Bs 1.573,72

Fuente: elaboración propia

Anexo 31. Resultado INLASA tratamiento T1



INLASA
INSTITUTO NACIONAL DE LABORATORIOS DE SALUD
DR. NÉSTOR MORALES VILLAZÓN
LABORATORIO DE CONTROL DE ALIMENTOS
COORDINADOR NACIONAL DE LA RELOAA



LCA-P18-F01

Versión: 02

INFORME DE ENSAYO

Emisión: 2018-05-11

Página: 1 de 1

Código: 25 - 1175	Muestra: FORRAJE VERDE HIDROPONICO CODIGO: FVH-KAL-01			
Nombre de Cliente:	IVAN OMAR TARQUI QUENTA-TESIS DE GRADO-UPEA ING			
Dirección del Cliente:	Estación Experimental de Kallutaca			
Procedencia:	Kallutaca			
Envase: Sobre Manilla	Cantidad: 250 g			
Número de Orden: 0675/25	Tarjeta de muestra: T-2102			
Fecha de muestreo:	2025-06-22	Hora: 17h30		
Fecha de ingreso a laboratorio:	2025-06-23	Hora: 12h00		
Fecha de análisis:	2025-06-24	Hora: 08h30		
RESULTADOS				
CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS:				
Color: Verde	Sabor: Característico			
Olor: Característico	Aspecto: Característico			
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO				
PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO	LÍMITE:
Proteína	1,89	g/100g	LCA-QA-P-01 ISO 20483-2013	Sin Límite de Referencia
Clasificación: Forraje				
Analista (s): Dra. C. Zenteno. Rev.CZ.				
La Paz, 30 de Junio de 2025				
 Dra. C. Zenteno RESPONSABLE DEL AREA FISIQUÍMICA DEL LABORATORIO DE CONTROL DE ALIMENTOS AL INLASA		 Msc. Monica Silberstein Morales JEFE DE LABORATORIO CONTROL DE ALIMENTOS INLASA		 Msc. Faviola Vidal Velásquez COORDINADORA DE LA DIVISION DE CONTROL INLASA

Los resultados se refieren únicamente a la muestra que ingresa al Laboratorio.

Está prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin aprobación escrita del Laboratorio.

Anexo 32. Resultado INLASA Tratamiento T2



LCA-P18-F01

Versión: 02

INFORME DE ENSAYO

Emisión: 2018-05-11

Página: 1 de 1

Código: 25 - 1176	Muestra: FORRAJE VERDE HIDROPONICO CODIGO: FVH-KAL-02		
Nombre de Cliente:	IVAN OMAR TARQUI QUENTA-TESIS DE GRADO-UPEA ING		
Dirección del Cliente:	Estación Experimental de Kallutaca		
Procedencia:	Kallutaca		
Envase: Sobre Manilla			Cantidad: 250 g
Número de Orden: 0675/25			Tarjeta de muestra: T-2103
Fecha de muestreo:	2025-06-22	Hora:	17h30
Fecha de ingreso a laboratorio:	2025-06-23	Hora:	12h00
Fecha de análisis:	2025-06-24	Hora:	08h30

RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS:

Color: Verde	Sabor: Característico
Olor: Característico	Aspecto: Característico

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO	LÍMITE:
Proteína	1,62	g/100g	LCA-QA-P-01 ISO 20483-2013	Sin Límite de Referencia

Clasificación: Forraje

Analista (s): Dra. C. Zenteno. Rev. Cz.

La Paz, 30 de Junio de 2025



[Firma]
Lc. Dayali Lizbeth Velásquez
COORDINADORA DEL ÁREA FÍSICO QUÍMICA
DEL LABORATORIO DE CONTROL
DE ALIMENTOS INLASA

[Firma]
Msc. Monica Silberstein Morales
JEFE DE LABORATORIO
CONTROL DE ALIMENTOS
INLASA

[Firma]
Msc. Faviola Vidal Velásquez
COORDINADORA DE LA
DIVISIÓN DE CONTROL
INLASA

Los resultados se refieren únicamente a la muestra que ingresa al Laboratorio.
Está prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin aprobación escrita del Laboratorio.

Anexo 33. Resultado INLASA tratamiento T3



INLASA
INSTITUTO NACIONAL DE LABORATORIOS DE SALUD
DR. NÉSTOR MORALES VILLAZÓN
LABORATORIO DE CONTROL DE ALIMENTOS
COORDINADOR NACIONAL DE LA RELOAA



LCA-P18-F01

Versión: 02

INFORME DE ENSAYO

Emisión: 2018-05-11

Página: 1 de 1

Código: 25 - 1177	Muestra: FORRAJE VERDE HIDROPONICO CODIGO: FVH-KAL-03			
Nombre de Cliente:	IVAN OMAR TARQUI QUENTA - TESIS DE GRADO - UPEA ING. AGRONOMICA			
Dirección del Cliente:	Estacion Experimental de Kallutaca			
Procedencia:	Kallutaca			
Envase: Sobre Manila	Cantidad: 250 g			
Número de Orden: 0675/25	Tarjeta de muestra: T-2104			
Fecha de muestreo:	2025-06-22	Hora: 17h30		
Fecha de ingreso a laboratorio:	2025-06-23	Hora: 12h00		
Fecha de análisis:	2025-06-24	Hora: 08h30		
RESULTADOS				
CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS				
Color: Verde	Sabor: Característico			
Olor: Característico	Aspecto: Característico			
ANÁLISIS FISIQUÍMICO				
PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO	LÍMITE
Proteína	1,68	g/100g	LCA-QA-P-01 ISO 20483-2013	Sin límite de Referencia
Clasificación: Forraje				
<small>Analista (s): Dra. C. Zenteno. Rev.: DLV.</small>				

La Paz, 01 de Julio de 2025



[Firma]
Lic. Dayra Laura Velásquez
SUBDIRECCIÓN DEL ÁREA FÍSICO QUÍMICA
DEL LABORATORIO DE CONTROL
DE ALIMENTOS AL
INLASA

[Firma]
MSc. Monica Silberstein Morales
JEFE DE LABORATORIO
CONTROL DE ALIMENTOS
INLASA

[Firma]
MSc. Faviola Vidal Velásquez
COORDINADORA DE LA
DIVISIÓN DE CONTROL
INLASA

Los resultados se refieren únicamente a la muestra que ingresa al Laboratorio.
Está prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin aprobación escrita del Laboratorio.

Dirección: Rafael Zubieta N° 1889 (Lado Hospital del Niño) Miraflores
Teléfonos: 2224078 - 2226048 - 2226670 - 2225194 - 2225198 • Fax: 591-2-2228254 - 2225007
La Paz - Bolivia

Anexo 34. Resultado INLASA Tratamiento T4



INLASA
 INSTITUTO NACIONAL DE LABORATORIOS DE SALUD
 DR. NÉSTOR MORALES VILLAZÓN
 LABORATORIO DE CONTROL DE ALIMENTOS
 COORDINADOR NACIONAL DE LA RELOAA



LCA-P18-F01

Versión: 02

INFORME DE ENSAYO

Emisión: 2018-05-11

Página: 1 de 1

Código: 25 - 1178	Muestra: FORRAJE VERDE HIDROPONICO CODIGO: FVH-KAL-04		
Nombre de Cliente:	IVAN OMAR TARQUI QUENTA - TESIS DE GRADO - UPEA ING. AGRONOMICA		
Dirección del Cliente:	Estacion Experimental de Kallutaca		
Procedencia:	Kallutaca		
Envase: Sobre Manila	Cantidad: 250 g		
Número de Orden: 0675/25	Tarjeta de muestra: T-2105		
Fecha de muestreo:	2025-06-22	Hora: 17h30	
Fecha de ingreso a laboratorio:	2025-06-23	Hora: 12h00	
Fecha de análisis:	2025-06-24	Hora: 08h30	

RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS

Color: Verde	Sabor: Característico
Olor: Característico	Aspecto: Característico

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO	LÍMITE
Proteína	2,04	g/100g	LCA-QA-P-01 ISO 20483-2013	Sin límite de Referencia

Clasificación: Forraje

Analista (s): Dra. C. Zenteno. Rev.: DLV.

La Paz, 01 de Julio de 2025



Los resultados se refieren únicamente a la muestra que ingresa al Laboratorio.
 Está prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin aprobación escrita del Laboratorio.

Dirección: Rafael Zubieta N° 1889 (Lado Hospital del Niño) Miraflores
 Teléfonos: 2224078 - 2226048 - 2226670 - 2225194 - 2225198 • Fax: 591-2-2228254 - 2225007
 La Paz - Bolivia

Anexo 35. Promedios por tratamiento de rendimiento

TRATAMIENTO	g/m ²
T1 (natural diurna)	22,71
T2 (LED blanca)	26,35
T3 (LED roja + azul)	25,89
T4 (Magenta)	25,86

Anexo 36. Promedios por tratamiento de peso de materia verde

TRATAMIENTO	g
T1 (natural diurna)	1723,8
T2 (LED blanca)	2000,0
T3 (LED roja + azul)	1965,0
T4 (Magenta)	1962,5

Anexo 37. Promedio por tratamiento de porcentaje de hoja fresca

TRATAMIENTO	%
T1 (natural diurna)	34,41%
T2 (LED blanca)	31,85%
T3 (LED roja + azul)	37,42%
T4 (Magenta)	34,45%

Anexo 38. Promedio por tratamiento de porcentaje de raíz fresca

TRATAMIENTO	%
T1 (natural diurna)	65,59%
T2 (LED blanca)	68,15%
T3 (LED roja + azul)	62,58%
T4 (Magenta)	65,55%

Anexo 39. Promedio por tratamiento de porcentaje de hoja seca

TRATAMIENTO	%
T1 (natural diurna)	19,73%
T2 (LED blanca)	16,74%
T3 (LED roja + azul)	17,31%
T4 (Magenta)	14,68%

Anexo 40. Promedio por tratamiento de porcentaje de raíz seca

TRATAMIENTO	%
T1 (natural diurna)	79,51%
T2 (LED blanca)	83,35%
T3 (LED roja + azul)	64,71%
T4 (Magenta)	85,07%

Anexo 41. Promedio por tratamiento de altura de planta

TRATAMIENTO	mm
T1 (natural diurna)	10,28
T2 (LED blanca)	10,77
T3 (LED roja + azul)	10,99
T4 (Magenta)	11,34

Anexo 42. Promedio por tratamiento de longitud de raíz

TRATAMIENTO	mm
T1 (natural diurna)	8,62
T2 (LED blanca)	10,18
T3 (LED roja + azul)	9,44
T4 (Magenta)	7,31

Anexo 43. Promedio por tratamiento de porcentaje de materia seca

TRATAMIENTO	%
T1 (natural diurna)	15,18%
T2 (LED blanca)	14,34%
T3 (LED roja + azul)	12,28%
T4 (Magenta)	13,79%

Anexo 44. Promedio por tratamiento de porcentaje de humedad

TRATAMIENTO	%
T1 (natural diurna)	89,75%
T2 (LED blanca)	95,52%
T3 (LED roja + azul)	94,58%
T4 (Magenta)	94,24%

Anexo 45. Promedio por tratamiento de porcentaje de humedad total

TRATAMIENTO	%
T1 (natural diurna)	84,82%
T2 (LED blanca)	85,66%
T3 (LED roja + azul)	87,72%
T4 (Magenta)	86,21%

Anexo 46. Promedio por tratamiento de proteína

Bloque	Tratamiento	%PTN (g/100g)
I	T1 (natural diurna)	1,89
II	T2 (LED blanca)	1,62
III	T3 (LED roja + azul)	1,68
IV	T4 (Magenta)	2,04